

ELEKTRONKOVÉ ZESILOVAČE

Karel Rochelt

Ačkoliv se dnes vyrábí absolutní většina spotřební audioelektroniky na bázi polovodičů, a koneckonců by nešla její převážná část bez polovodičů vůbec realizovat, stále si udržuje oblast nízkofrekvenčních zesilovačů jistý zájem o využívání elektronek jako aktivních součástí. Je to zejména díky dosažitelné kvalitě zvuku. Tímto článkem chci přispět k zpráhlednění této problematiky, která je často obestřena nepravdami, bludy a mýty. Součástí tohoto článku je i návod na elektronkový zesilovač ve dvou různých verzích, který svoji kvalitou uspokojí i ty nejnáročnější zájemce o kvalitní zvuk.

Původně jsem předpokládal, že napíšu článek, ve kterém bude jednoduše uveden návod na stavbu elektronkového zesilovače, ale protože jsem si však uvědomil, že v dnešní době převážná část zájemců o tuto techniku již téměř vůbec neví, s čím se mohou setkat a na jaké narazí problémy; začnu tedy poněkud zešíroka.

V počátcích využívání sloužila audioelektronika hlavně k dorozumívání lidí mezi sebou a byly tedy kladeny požadavky pouze na to, aby byla zajištěna základní srozumitelnost řeči. Tato zařízení využívala jako první armáda (jako téměř vždy je hnacím motorem vývoje) a spoje. Pro jejich účely vyhovovala zařízení s relativně malým výkonem a malým přenášeným frekvenčním pásmem. Později se pochopitelně využití audioelektroniky přeneslo i do oblasti běžné zábavy, kde vzrostla potřeba větších dosažitelných výkonů zesilovačů a jejich kvality. Zatímco spoje a armáda využívaly především vysíláčky, u kterých výkon 1 W bylo možné dosáhnout bez problémů v jednočinném zapojení, pro potřeby v oblasti zábavy (ať už to byla různá gramofónia nebo zesilovače pro ozvučení sálů) silně vzrostla poptávka po větším výkonu a kvalitě zvuku. S jednočinným zapojením bylo v té době se sehnatelnými elektronekami možné získat výkon max. 8 W při zkreslení 10 %. S vývojem, který přinesl dvojitě zapojení (tzv. Push - Pull - PPP) a výrobu výkonnějších elektronek jako EL34, bylo možné dosáhnout s dvěma EL34 výkon až 100 W při zkreslení okolo 5 %.

Tímto zapojením byla zahájena masová výroba výkonnějších zesilovačů, na základě kterých bylo možné zlepšovat parametry reproduktorů (účinnost přestala být základním požadavkem na reproduktor a začalo se více hledět také na šířku přenášeného pásma a kvalitu zvuku). Po určité době, když kvalita reproduktorů a vlastně i ostatních zařízení zpracovávajících hudební signál dosáhla již velmi solidní úrovně, opět nastala poptávka po možnostech zlepšení kvality zvuku zesilovačů, a to zejména v nahrávacích studiích a podobných náročných aplikacích. Tento další vývoj přinesl paralelní dvojitě zapojení (Parallel - Push - Pull - PPP), které bylo využíváno zejména v na-

hrávacích studiích, protože jeho zapojení požaduje podstatně složitější zdroj napájecího napětí. Tyto zesilovače to (v době, kdy teprve nastupovaly senlenové usměrňovače a veškeré součástky byly poměrně drahé) velmi prodražovalo. Proto bylo jejich rozšíření malé a nevyrolo se výrazně do podvědomí audiotechniků i přes své podstatné přínosy na kvalitu zvuku (zkreslení 1 %, menší vnitřní odpor, možnost dosáhnout většího činitele tlumení).

Navíc poměrně brzy po tomto vývoji v zapojení nastal masový nástup polovodičové techniky, který umožnil její podstatné zlevnění a tím velkou dostupnost - tomu nemohla elektronková technika dostatečně konkurovat. Nicméně po určité době se nejnáročnější posluchači začali opět k elektronkové technice navracet, protože tato technika má stále v audiooblasti co říci. Poptávka po těchto zesilovačích přinesla to, že dnes opět existuje celá řada výrobců nabízejících tyto zesilovače - je však v mnoha případech otázkou, jestli elektronka sama o sobě je vždy přínosem v kvalitě zvuku.

Pokud se podíváme blíže na zapojení těchto zesilovačů, zjistíme, že se jedná většinou o téměř totožná zapojení typu Push-Pull nebo jednočinná zapojení často využívající exkluzivních výkonových elektronek (většinou triody), které díky své malosériové výrobě a exkluzivitě vyhnějí cenu k absurdním částkám.

Je však jen omezený počet výrobců, u kterých je patrná snaha o další vývoj, většina víceméně kopíruje ověřená zapojení. Avšak i u těchto zesilovačů jsou patrné rozdíly v kvalitě zvuku, a to zejména díky kvalitě použitých výstupních převodníků (transformátorů), které si většina výrobců vyrábí sama - proč, to si osvětlíme dále.

V následujících odstavcích se zaměříme na určité oblasti, které zásadně měrou ovlivňují kvalitu zvuku elektronkových zesilovačů a na které bychom se tedy měli při stavbě těchto zesilovačů zaměřit.

Jsou to: typ zapojení a jeho vliv na kvalitu zvuku; vliv nastavení zpětné vazby na kvalitu zvuku; vliv vyvážení zpětné vazby na kvalitu zvuku; výstupní převodník a jeho vliv na kvalitu zvuku; vzájemné ovlivňování zesilovače a reproduktorů; vliv použitých součástí

VYBRALI JSME NA



OBÁLKU



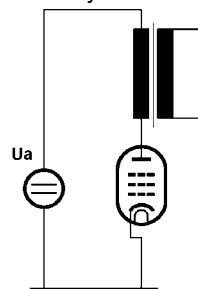
a síťového transformátoru na kvalitu zvuku a spolehlivost zesilovače; vliv konstrukce skříně zesilovače na kvalitu zvuku a jeho parametry.

Typ zapojení

Z hlediska zapojení výkonových elektronek k výstupnímu převodníku se v podstatě vyskytují pouze tři typy zapojení :

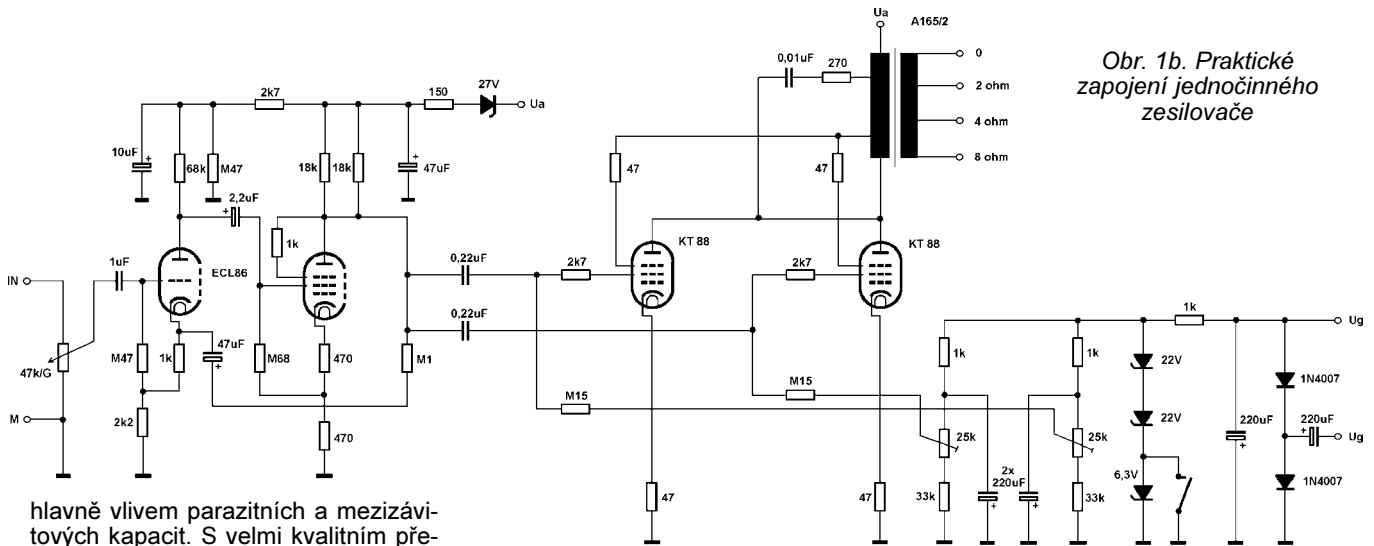
- **Jednočinné zapojení** - (Single-Ended) nejjednodušší zapojení, v praxi vyžadující minimálně jednu výkonovou elektronku (výkonovou triodu nebo pentodu v ultralinearním zapojení (viz obr. 1a) a budící stupeň, který vzhledem k potřebnému napětovému zesílení a impedančnímu přizpůsobení musí být řešen jako dvojitě stupňový. Z hlediska zvuku teoreticky jistě nejlepší řešení, protože zcela odpadá přechodové zkreslení. Toto zapojení sice produkuje značné harmonické zkreslení, protože se však jedná v převážné míře vždy o druhou harmonickou, není toto zkreslení sluchem téměř postřehnutelné.

Při konstrukci však narazíme na určitá omezení, kterými jsou zejména maximální možný dosažitelný výkon daný elektronekou, který se dá poměrně bez problémů v určitých mezích zvětšit paralelním řazením výkonových elektronek. Potom na omezení plynoucí z konstrukce převodníků pro tato zapojení. Protože těmito převodníky protéká vždy poměrně velký stálý klidový proud, musí být železné jádro i pro poměrně malé výkony značně velké, a to i při velmi kvalitní konstrukci. To se vždy nepříznivě projeví na přenosových vlastnostech převodníku - minimálně v kmitočtovém rozsahu. Jak si v příštích odstavcích řekneme, vlastní fyzická velikost převodníku ve svých důsledcích negativně ovlivňuje možný přenášený kmitočtový rozsah,



Obr. 1a. Princip zapojení jednočinného zesilovače

Obr. 1b. Praktické zapojení jednočinného zesilovače

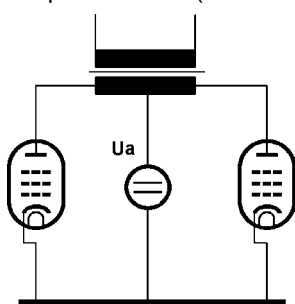


hlavně vlivem parazitních a mezizávitových kapacit. S velmi kvalitním převodníkem se dá dosáhnout výkon pouze asi 30 W, aniž by se převodník začal již příliš negativně projevovat. Na druhou stranu 30 W je již pěkný výkon a takoveto zesilovače lze i poměrně levně (např. s dvěma KT88 v jednom kanále - viz obr. 1b) realizovat při dosažení výborné kvality zvuku.

Nevýhodou těchto zesilovačů je nutnost napájení velmi kvalitními stabilizátory anodového napětí, které celé zapojení poměrně prodraží (což není to nejhorší), a dále to, že převodníky pro tato zapojení mají vždy poměrně velký stejnosměrný odpor sekundárního vinutí, a tím klesá činitel tlumení zesilovače běžně na hodnoty 2 až 4. U takovýchto zesilovačů je tedy nutné vybírat připojené reproduktorové soustavy nebo upravovat jejich impedanční průběh, což je v praxi pro běžného spotřebitele značný problém.

Pokud se vám však podaří nalézt vhodně kvalitní soustavy (výrobci běžně neudávají frekvenční a impedanční průběh) nebo si je dokážete vyrobit, případně stávající upravit, jistě dostanete aparaturu nejvyšší kvality. S výkonem 30 W můžete většinou bez problémů napájet soustavy s citlivostí od 85 dB výše, aniž byste měli pocit, že se výkonu nedostává (i když to neplatí vždy - viz dále).

- Dvojčinné zapojení - (Push-Pull)
- z hlediska kvality zvuku značně problematické zapojení. Toto zapojení (viz obr. 2a) vzhledem k tomu, že při své činnosti využívá dvě primární vinutí a výkonové elektronky, musí pracovat ve třídě AB, takže pokud chceme dosáhnout trochu rozumný výkon, produkuje ještě značné přechodové zkreslení. Primární vinutí musí být pro ideální činnost naprosto shodná (to nelze v praxi



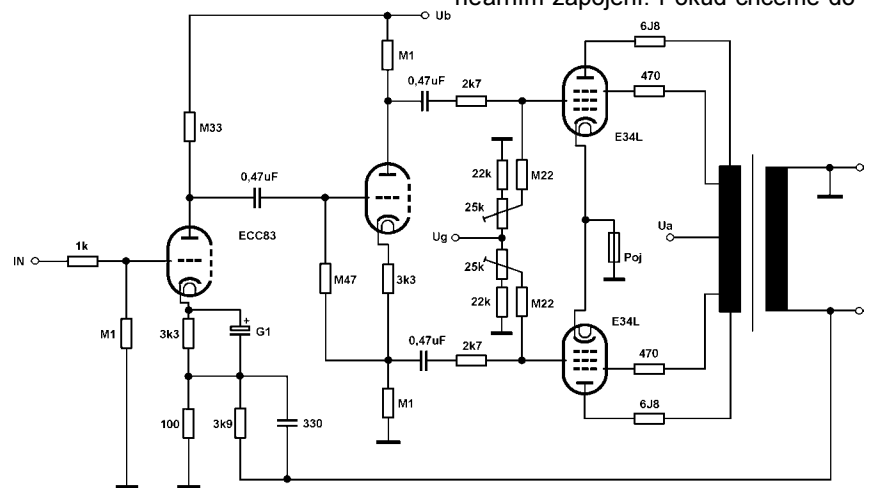
Obr. 2a. Princip zapojení dvojčinného zesilovače

nikdy dosáhnout), protože potom nastupují ve zvýšené míře i zkreslení vzniklá přechodovými jevy v převodníku. Navíc, protože jsou sekundární vinutí vlastně dvě, je zde i problém ve větším vnitřním odporu zesilovače, protože pro stejné vybuzení převodníku je nutná dvojnásobná délka vinutí než u jednočinného nebo zapojení PPP. Vnitřní odpor způsobuje horší dynamické vlastnosti a menší činitel tlumení. Navíc toto zapojení neumožňuje úspěšně fungující vyvážení zpětné vazby jiné, než ze sekundárního vinutí převodníku (že toto vyvážení je to nejméně vhodné, si povíme dále).

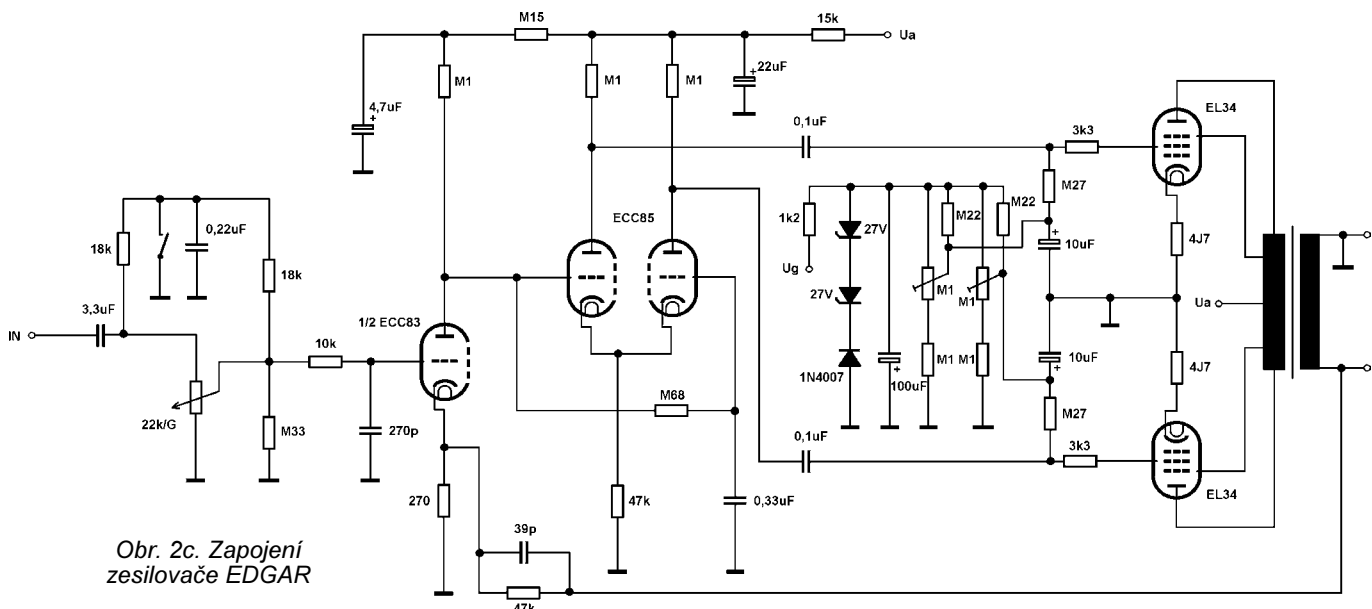
Toto schéma zapojení potřebuje pro svoji funkci minimálně dvě výkonové elektronky a dvě (nebo jednu dvojitou) v budícím stupni - jedna bude plnit funkci rozkmitového stupně a druhá funkci invertoru (viz obr. 2b). Jedná se o typické nejjednodušší zapojení, které sice využívá s malými obměnami celá řada výrobců, avšak bohužel má celou řadu nedostatků. Protože téměř celé napětové zesílení musí obstarávat první elektronka, nezbyvá u ní příliš mnoho místa pro rozsah funkce zpětné vazby (vliv zpětné vazby si podrobněji upřesníme později). Aby bylo možné dosáhnout co možná největšího napětového zesílení, je zde použit sériový člen RC (100 μ F/25 V + 100 Ω) v obvodu katody. Navazujícím stupněm je již invertor. Zde je problémem to, že výstup z takto řešeného invertoru není nikdy dokonale symetrický vlivem „nizkoohmového“ výstupu na katodě a „vysokoohmového“ na anodě. Tento problém se poněkud zmenšuje vložením přídavného rezistoru v katodě (zde 3,3 k Ω), sto procentně to však problém neodstraní. Protože je zesílení celého zesilovače naprázdno (bez uzavřené zpětné vazby) poměrně malé, využívá se ještě menšího zesílení výkonovými pentodami.

Lepší řešení ukazuje zapojení invertoru u zesilovače EDGAR (viz obr 2c). Takto řešený invertor je využíván hlavně americkými výrobci. Protože elektronky použité v tomto typu invertoru nemusí mít velké zesílení, mohou se na jejich místech osadit typy s větší proudovou zatížitelností. To umožňuje vytvořit „nizkoohmovější“ výstup pro řízení výkonových elektronek a jejich řízení je následně přesnější - musí se však vždy v zapojení použít větší množství elektronek. Oproti předchozí verzi je jeho výstup zcela symetrický a ještě mírně zesílený, proto zřejmě výrobce upustil od členu RC v katodě první elektronky. Že to asi nebylo nejlepší řešení, bohužel dokazuje slyšitelně větší zkreslení než u předcházejícího typu. U tohoto zesilovače se však také uplatňuje vliv nevhodně nastavené velikosti zpětné vazby a méně kvalitního výstupního převodníku (menší přenosové pásmo), který zásadní měrou vždy ovlivňuje celkovou kvalitu celého zesilovače bez ohledu na typ zapojení.

Koncové elektronky jsou klasické EL34 nebo E34L zapojené v ultraliniárním zapojení. Pokud chceme do-



Obr. 2b. Zapojení JADIS

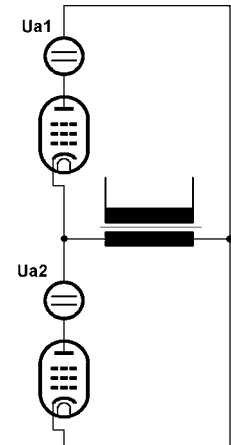


Obr. 2c. Zapojení zesilovače EDGAR

sáhnout velkou kvalitou zvuku, musíme u pentod vždy sáhnout k tomuto řešení. Na stínici mřížku se přivádí část napětí z převodníku, která se mění v závislosti na vybudzení. Tím je zavedena zpětná vazba, která linearizuje průběh zesílení pentody, avšak omezuje její možný vydaný výkon. Proto se dvěma EL34 můžeme získat výkon pouze 30 až 35 W na kanál.

Výhodou PP zapojení jsou poměrně malé nároky na filtraci anodového napětí, takže mohou být zesilovače levnější. Toto zapojení používá převážná část výrobců, i když s ním nelze dosáhnout nikdy (určitě ne s takto jednoduchými řešeními) absolutně špičkových kvalit zvuku. Na druhou stranu i tato kvalita zvuku je dost dobrá na to, aby dokázala přesvědčit mnoho zájemců ke koupi, pokud tyto zesilovače porovnají se stejně drahými nebo dražšími polovodičovými „kolegy“.

- **Paralelní dvojčinné zapojení** (Parallel Push-Pull - PPP). Toto zapojení využívá nezvykle zapojené dva zdroje anodového napětí, kdy každý zdroj napájí jednu výkonovou elektronku. Tyto elektronky jsou však připojeny k jednomu sekundárnímu vinutí polaritou obráceně (viz obr. 3a). Protože je jedna výkonová elektronka v daném okamžiku buzena kladnou půlvlnou a druhá elektronka zápornou půlvlnou,

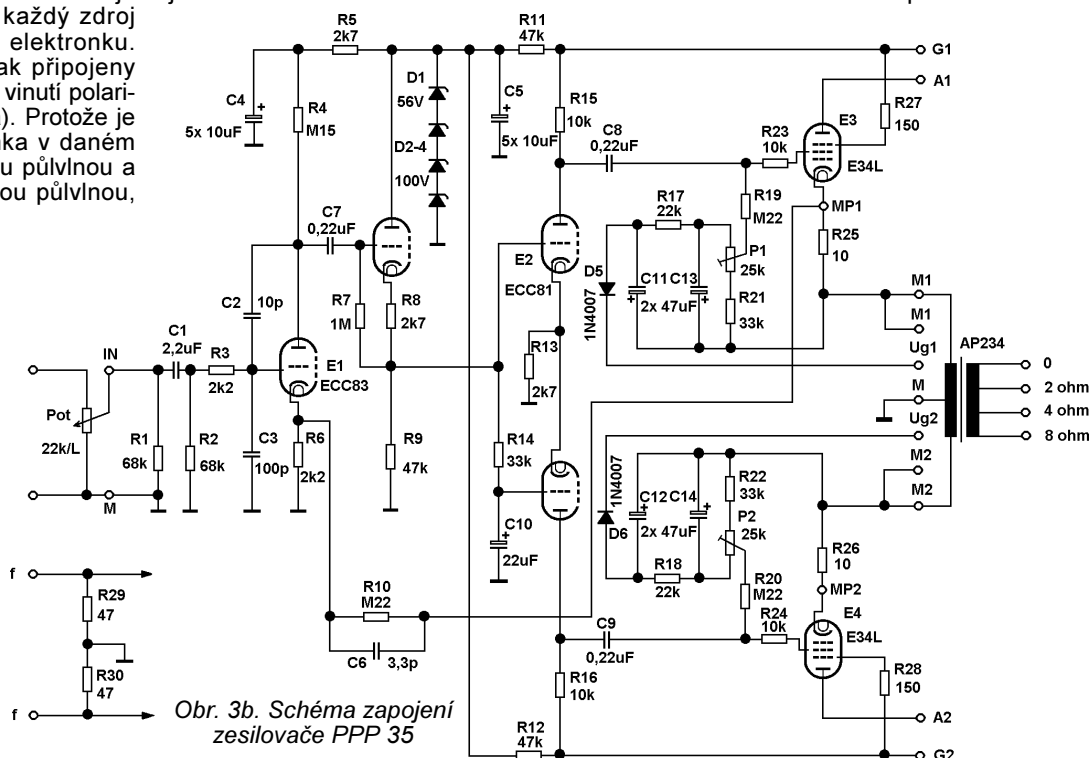


Obr. 3a. Princip zapojení paralelního dvojčinného zesilovače

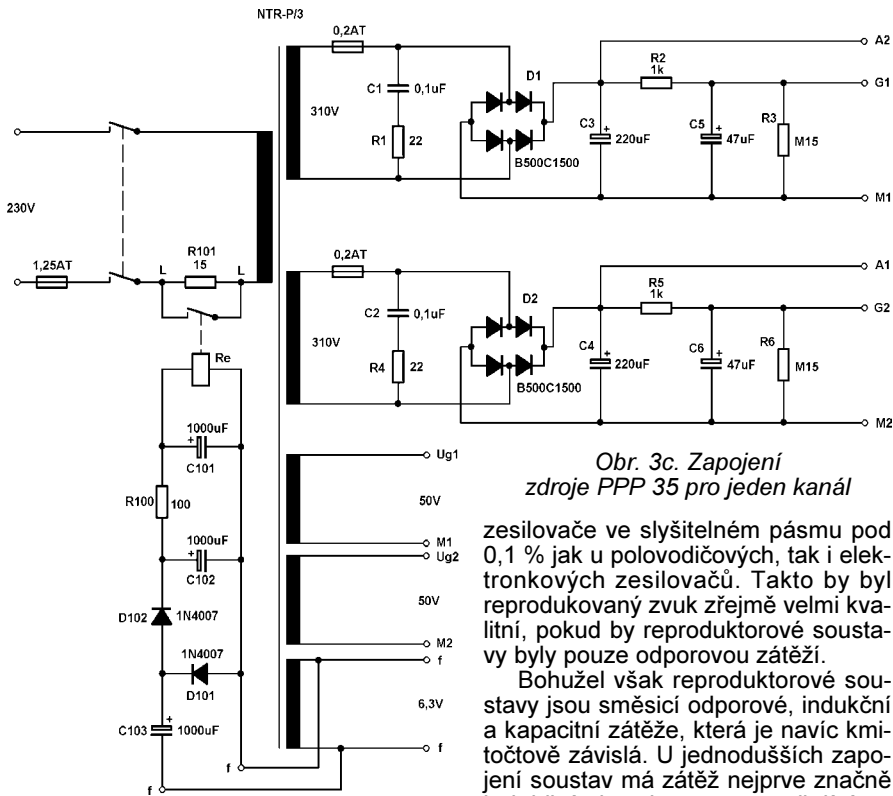
avšak jejich výstup na převodník je připojen obráceně, pracují vždy obě elektronky společně paralelně „do výkonu“ zesilovače. Výhodou tohoto zapojení je potřeba pouze jednoho sekundárního vinutí, které má oproti srovnatelnému převodníku PP pouze poloviční délku. Tím je možno omezit negativní jevy vzniklé na převodníku. Další výhodou je to, že se převodník připojuje na katodu výkonových elektronek a jeho připojení je „nizkoohmové“ - výkonové elektronky plní funkci katodových sledovačů. O výhodách tohoto připojení se není třeba rozepisovat, protože jsou známy i z polovodičové techniky. Další výhodou je možnost vyvázat zpětnou vazbu ještě před převodníkem, takže ta není nevhodně ovlivňována připojenou zátěží. Protože výkonové elektronky pracují jako katodové sledovače, nemohou již přinášet další vlastní zesílení, proto se musí budič a inverter skládat z více stupňů, aby bylo dosaženo potřebného napětíového zesílení (viz obr. 3b). Toto zapojení je vlastně schématem našeho zesilo-

vače v jednodušším (levnějším) provedení.

První elektronka obstarává větší část celkového zesílení, za ní je druhá zapojená jako katodový sledovač, aby mohl být připojený inverter navázan „nizkoohmově“ a měl tak lepší výsledky. Inverter ještě „lehce“ zesiluje budič signál pro výkonové pentody. Abychom dobře pochopili funkci zesilovače, musíme se podívat i na schéma zdroje, který je zde uveden pro jeden kanál (viz obr. 3c). Pokud si prohlédneme body připojení a spojíme si to s funkcí zesilovače, zjistíme, že toto zapojení má v bodě přenosu energie blíže k jednočinnému zapojení než k PP. Protože je sekundární vinutí převodníku pouze jedno, může být jeho konstrukce jednodušší bez nároků na absolutní symetrii jako u PP, a tím se zmenšují problémy s přechodovými jevy na převodníku. Větší zkreslení oproti zesilovačům v jednočinném zapojení vyvažuje tento typ zesilovače menším vnitřním odporem a možností zkonstruovat převodník



Obr. 3b. Schéma zapojení zesilovače PPP 35



Obr. 3c. Zapojení zdroje PPP 35 pro jeden kanál

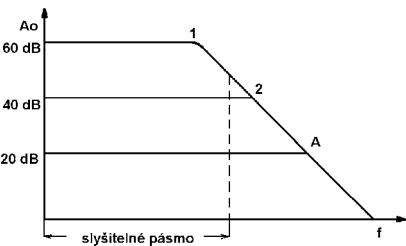
zesilovače ve slyšitelném pásmu pod 0,1 % jak u polovodičových, tak i elektronkových zesilovačů. Takto by byl reprodukován zvuk zřejmě velmi kvalitní, pokud by reproduktorové soustavy byly pouze odporovou zátěží.

Bohužel však reproduktorové soustavy jsou směsicí odporové, indukční a kapacitní zátěže, která je navíc kmitočtově závislá. U jednodušších zapojení soustav má zátěž nejprve značně indukční charakter a se zvyšující se frekvencí přechází na kapacitní. U složitějších soustav se může zátěž i několikrát měnit z indukční na kapacitní. Navíc v oblasti rezonance basového reproduktoru nebo basreflexového nastavení se prudce mění charakter zátěže nejen z hlediska fázových poměrů, ale tento charakter se mění dynamicky v závislosti na tom, jak se membrána zpožďuje za budícím signálem. V tomto smyslu připomíná chování reproduktoru běžný elektromotor.

Protože se reakce membrány na budící signál hlavně vlivem její vlastní hmotnosti vždy zpozdí, nastane stav, kdy se vlivem vzniklého fázového posuvu zesilovač snaží dohnat zpoždění membrány větším dodaným výkonem. Při přiblížení k požadované poloze membrány se fázový posuv zmenší a zmenšuje se navíc i dodávaný výkon zesilovače. Tento stav vzniká při rozkmitávání membrány. Při odeznění signálu zase membrána dokmitává jako pružina a je třeba ji brzdit „výrobou výkonu“ v protifázi (prakticky vinutí reproduktoru zkratovat). I když je toto velmi zjednodušené vysvětlení chování reproduktoru a zesilovače mezi sebou, ukazuje, jaké složité věci nastávají při jejich činnosti.

V praxi potom vlivem těchto změn připojené zátěže vzniká celá řada fázových posuvů, které způsobují částečně správnou a částečně špatnou činnost zpětné vazby. Signál přivedený do sčítacího bodu z výstupu zesilovače je za původním signálem potom zpožděn nebo ho předchází, na výstupu zesilovače tímto způsobem vzniká celá řada zákmitů a tvarových zkreslení. Teoreticky lze vliv připojených reproduktorových soustav zcela omezit pouze tím, že by měl zesilovač nekonečný výkon, nulový vnitřní odpor a nekonečnou rychlost. Ani jedno z toho však nelze dosáhnout.

Mnoho nesmyslů je v tvrzení, že kvalita zvuku je závislá na velikosti



Obr. 4. Zesílení dvou zesilovačů bez uzavřené smyčky zpětné vazby

zpětné vazby, která je pak vypočítána z poměru odporů v bodě, kam je zpětná vazba přivedena - u elektronkových zesilovačů tedy zpravidla z poměru odporů přivádějícího zpětnou vazbu z výstupu zesilovače a katodového odporu elektronky budícího stupně. Tento poměr však vůbec neurčuje velikost zpětné vazby - určuje pouze velikost napětového zesílení zesilovače k danému bodu.

Pokud bychom chtěli zjistit opravdovou velikost zpětné vazby (nebo spíše velikost možné regulace zpětnou vazbou), museli bychom odpor přivádějící signál odpojit a změřit, jaké je teď zesílení zesilovače bez uzavřené napětové zpětné vazby. Poměr mezi velikostí napětového zesílení bez uzavřené zpětné vazby a zesílením při uzavřené zpětné vazbě je skutečně možný rozsah regulace zpětné vazby. Velikost regulace je navíc kmitočtově závislá (viz obr. 4). Koncový stupeň č. 1 má zesílení při chodu na prázdko (bez uzavřené smyčky zpětné vazby) 60 dB, koncový stupeň č. 2 pouze 40 dB. Požadované napětové zesílení je 20 dB. První koncový stupeň má tedy 40 dB možné rezervy pro regulaci zpětné vazby, druhý pouze 20 dB. Rozdíl je však v tom, že druhý koncový stupeň může kdykoliv regulovat celým svým rozsahem zpětné vazby celou slyšitelnou kmitočtovou oblast, zatímco u prvního koncového stupně nastává pokles již ve slyšitelném pásmu. Ve vysokotónové oblasti je tedy koncový stupeň č. 1 více náchylný k přebuzení. Pokud se chceme tomuto problému vyhnout, musí se bezpodmínečně zvětšit šířka přenášeného pásma při chodu naprázdno, což vždy přináší při velkých zesíleních problémy s celkovou stabilitou zesilovače.

Naproti tomu u zesilovače č. 2 můžeme mít zase obavy z toho, že se zvětší celkové zkreslení a zmenší činitel tlumení. Tomu se dá dobře zamezit konstrukcí zesilovače tak, že základní zapojení bez zpětné vazby musí mít samo o sobě malé zkreslení a velkou šířku přenášeného pásma. Tento požadavek lze bez problémů v elektronkové technice splnit, pokud pomineme vliv výstupního převodníku.

Dalším problémem týkajícím se zpětné vazby je rychlost její reakce. Signál zpětné vazby je vždy poněkud opožděný za budícím signálem. Ten musí napřed proběhnout vstupními, budícími a koncovými aktivními součástkami v zesilovači, než se dostane do bodu, ze kterého je opět vrácen na vstup. Protože na každé aktivní součástce vzniká určité zpoždění zejména vlivem parazitních kapacit přecho-

s větším činitelem tlumení. Tím se získá větší univerzálnost k možnostem připojení různých typů reproduktorových soustav. V praxi lze dosáhnout víceméně stejné zvukové kvality jako s jednočinnými typy - v tomto případě daleko více záleží na tom, jaké soustavy a jakým způsobem připojíme, než jaké jsou vlastnosti toho kterého zesilovače.

Praktickou nevýhodou tohoto zapojení je složitost napájecího zdroje a z ní plynoucí potřeba deseti sekundárních vinutí síťového transformátoru pro stereofonní verzi zesilovače, která tuto verzi prodražuje. Tato potřebná složitost však vždy nutí výrobce k tomu, že nenapájí oba kanály z jednoho zdroje, ale každý kanál má svůj separátní zdroj, kanály se vzájemně neovlivňují, což se následně velmi dobře projeví na kvalitě zvuku. Dosažitelný výkon je prakticky shodný s obdobně osazenými zesilovači PP.

Vliv zpětné vazby na kvalitu zvuku zesilovače

Okolo tohoto tématu se vyskytuje mnoho chybných tvrzení vyplývajících z nepochopení problému. V první řadě si musíme uvědomit, co vlastně zpětná vazba opravuje. Základní funkcí je nastavit napětové zesílení daného obvodu. Protože použité součástky mají vždy nějakou výrobní toleranci, zavedení zpětné vazby vliv těchto tolerancí prakticky vynuluje a zesílení je v praxi závislé pouze na přesnosti rezistorů, které porovnávají přímý a zesílený signál. Tímto způsobem dokáže opravit i nelinearity aktivních součástek, pokud pro to má dostatečný rozsah regulace. Konečně i přechodové jevy vzniklé uvnitř zesilovače se jejím zavedením značně redukuje, se zvyšující se frekvencí se však zmenšuje schopnost zpětné vazby tyto chyby opravovat. Takto lze zajistit běžně zkreslení

důležitou roli u polovodičových součástek a parazitních kapacit u mřížek elektronek, je reakce zpětné vazby poněkud opožděná. Z tohoto lze usuzovat, že čím je počet aktivních součástek v cestě signálu menší, tím bude reakce zpětné vazby rychlejší.

Z důvodů uvedených v tomto odstavci by se mohlo zdát, že nelze navrhnout zesilovač tak, aby se zpětná vazba negativně neprojevovala vytvářením určitých typů zákmítů ve výsledném zvuku. Ve skutečnosti (při výběru kvalitních součástek v zapojení) je vliv zpětné vazby vždy dobrý vzhledem k dosažené kvalitě zvuku a záleží daleko více na tom, jak je v zapojení aplikována.

Vliv vyvázání zpětné vazby na kvalitu zvuku

Jistě jste se již setkali s tvrzením, že zesilovač bez zpětné vazby mají absolutně nejlepší zvuk. To lze považovat za velmi odvážné tvrzení. Každá aktivní součástka v zapojení zesilovače není zcela lineární - nebo spíše pravdivěji řečeno, má téměř lineární průběh zesílení při určitých pracovních podmínkách. To přenesené znamená, že řízený signál při daném napětí a proudu řídicí součástky získá určitou hodnotu a že při zvětšení řídicího proudu nebo napětí o x -násobek se i tato hodnota změní o x -násobek. Výrobní praxe však neumožňuje výrobu zcela identických součástek a je vždy poznamenána určitou tolerancí dosažovaných hodnot. Z tohoto důvodu bychom již museli pečlivě vybírat každou párovou součástku do stereofonního zesilovače, aby zesilovaly oba kanály shodně. To je v praxi velmi problematické a nákladné, protože tolerance součástek jsou dost velké a musí se vždy vybírat z velkého počtu kusů. Např. u tranzistoru BC549C může být zesílení v rozsahu 380 až 800. Zesílení může být tedy i více jak dvojnásobně rozdílné. To samé platí i u elektronek, i když zde jsou výrobní tolerance zpravidla menší, např. ECC83 může mít zesílení v rozsahu 75 až 125, což je asi 1,6násobek.

Dalším problémem je to, že tyto aktivní součástky, zejména vlivem parazitních kapacit produkují vlastní zkreslení, které je žádoucí omezit. To vše nám pomůže vyřešit zavedení zpětné vazby. Z výše uvedeného je patrné, že už díky menším tolerancím elektronek lze zmenšit nároky na možný rozsah potřebné regulace zpětné vazby v jimi osazených zesilovačích.

Dalo by se tedy říci - pokud zavedeme zpětnou vazbu z výstupu zesilovače (bude vyvázána z výstupu zesilovače) máme vyhráno, protože veškerý chybový signál bude opraven - tak, jak je to u zesilovačů JADIS a EDGAR. Bohužel toto je zcela chybná domněnka. U elektronkových zesilovačů vstupuje do hry podstatnou měrou vliv výstupního převodníku. Ten má z hlediska funkce několik vlivů. Kromě žádoucího převodu audiosignálu také působí jako dolní propust a to v obou směrech - jak v převodu signálu ze zesilovače ven, tak

stejně ve směru do zesilovače. Dalším vlivem je to, že má snahu zesilovač vlivem parazitních kapacit rozkmitávat na určitých kmitočtech. Tyto zákmity, které jsou v nadzvukové oblasti, nemůže převodník přenést ven, zůstávají uvnitř zesilovače, avšak zpětná vazba je nemůže opravovat. Na výstupní vinutí je připojena reproduktorová soustava. Ta má velmi daleko k ideální odporové zátěži, protože se skládá nejen z odporové zátěže, ale i z mnoha kapacit a indukčností. Aby to nebylo tak jednoduché, mají navíc reproduktory pořad snahu dělat něco, co nechceme - tj. hlavně vlivem pružného zavěšení membrány dokmitávat a indukovat tak další napětí, které se zpětně objeví na výstupu zesilovače.

Součtem různých nabíjecích a vybíjecích konstant a indukci napětí vzniká celé spektrum chybových signálů, které se snaží zpětná vazba opravit. U slyšitelných signálů se jí to vcelku daří, avšak protože spektrum chybových signálů je i značně nadzvukové, nemůže je zpětná vazba díky nepropustnosti vysokých kmitočtů převodníku opravit na vlastním výstupu zesilovače. Zpětná vazba tedy neopraví všechny chybové signály, avšak oprava je kmitočtově závislá. Uvnitř zesilovače před převodníkem se zvětšuje zkreslení, protože k užitečnému signálu se navíc připojuje opravný nadzvukový signál vytvořený zpětnou vazbou. Toto zkreslení je poměrně značné. Na měřicích přístrojích sice naměříte při běžných metodách měření zkreslení asi 1 %, to však platí pouze pro ideální sinusový průběh. V důsledku složeného signálu z různých frekvencí a tvarů se zkreslení podstatně zvětšuje.

Zkreslení výrazně stoupá s vybuzením zesilovače a u méně výkonných a u zesilovačů s menším rozsahem regulace zpětné vazby vede napřed k výraznému „zdrsnění“ reprodukce a následně až k vypudávání signálů. Někdo si vysvětluje tyto efekty nedostatečnou výkonovou rezervou zdroje, avšak pravá příčina je v takto vyvázané zpětné vazbě. Takto vyvázanou zpětnou vazbu lze nalézt u všech typů zapojení elektronkových zesilovačů, ale u podstatě je nutná pouze u typu PP, kde ji prakticky nelze vyvázat jinde.

Další možností je vyvázat zpětnou vazbu z místa připojení primárního vinutí převodníku, jak je to v případě zapojení PPP. Zde zpětná vazba bez problémů opravuje veškerý chybný signál vzniklý uvnitř zesilovače. Chybový signál vzniklý za převodníkem opravuje pouze ve slyšitelné oblasti, výrazně nadzvukovou oblast již neopravuje. Protože však zákmity v reproduktorových soustavách vznikají spíše ve slyšitelné oblasti, jsou chybové signály opraveny ve velké míře a zhoršený zvuk mají na svědomí jiné vlivy - zejména vliv reproduktorových kabelů a ovlivňování reproduktorů a zesilovače mezi sebou.

Oba představené typy vyvázání zpětné vazby mají společné znaky v tom, že zvětšují činitel tlumení zesilovače na výstupu a linearizují výstupní frekvenční průběh. To znamená, že vyrovnávají změny frekvenčního průběhu,

kteří nastávají vlivem kmitočtově nestejných impedančního průběhu připojených soustav a relativně velkého stejnosměrného odporu sekundárního vinutí převodníku.

V případě vyvázání zpětné vazby z primárního vinutí by se mohlo zdát, že to není pravda, avšak je třeba si uvědomit, že v tomto případě se chová výstupní převodník stejně jako běžný transformátor. Pokud na sekundární vinutí připojíme místo jedné žárovky dvě (zmenší se odpor zátěže a zvětší se odebraný proud), zvedne se pouze převáděný výkon. To samé vzniká i v případě zesilovače, kdy zmenšení odporové zátěže (impedance) způsobí větší dodávaný výkon, i když v tomto případě již se nevyrovnává frekvenční průběh zcela dokonale vlivem ztrát na převodníku.

Jiná situace nastane, pokud zpětnou vazbu vyvážeme ještě před výkonovou elektronkou tak, jak je to ve zde uvedeném zesilovači v jednočinném zapojení. Zpětná vazba omezuje pouze zkreslení vzniklé v budicím stupni a zkreslení vzniklá na výkonových elektronekách a jejich interakcích s převodníkem zůstávají beze změny. Také zkreslení vzniklá vlivem funkce reproduktorů a reproduktorových kabelů nejsou omezena.

Dalo by se předpokládat, že větší podíl zkreslení bude u tohoto zesilovače zřetelný.

V praxi tomu však u tohoto zapojení tak není ze dvou důvodů. Jednak lokální zpětná vazba zavedená z odbočky převodníku na stínici mřížky výkonových elektronek značně linearizuje jejich průběh zesílení a omezuje vlastní zkreslení, navíc je toto zkreslení charakteristické především největším podílem druhé harmonické, na kterou lidský sluch není tak citlivý. I když naměříme u tohoto zesilovače zkreslení 10 % při plném vybuzení, není ve zvuku prakticky slyšet a reprodukce se zdá být velmi „čistá“. Nevýhodou tohoto vyvázání je to, že zpětná vazba již nezmenšuje činitel tlumení na výstupu ani nelinearizuje frekvenční průběh. Reproduktorové soustavy dostanou pouze čistý budicí signál, žádný opravný. Z části je to nevýhoda, z části výhoda. Nevýhoda je to v oblasti rezonance basového reproduktoru, kde zesilovač nemůže dodávat výkon navíc a membrána se tedy více zpoužďuje, než u jiných způsobů vyvázání zpětné vazby. Výhodou je to ve středních a vysokých oblastech, ve kterých reproduktory nedostávají také chybný signál vytvořený zpětnou vazbou, a je tedy méně zkreslený.

To klade zvýšené nároky na připojené reproduktorové soustavy, zejména na jejich impedanční průběh. Ten by měl být co nejvíce vyrovnaný a bez prudkých změn, jinak bude vlivem malého činitele tlumení ovlivňován frekvenční průběh připojených soustav. Tento vliv sice není až tak velký, jak se často prezentuje, nicméně při kritickém poslechu je dobře slyšitelný a záleží již na každém konkrétním typu soustav, jak se pro tento druh zesilovačů hodí.

(Pokračování příště)

ELEKTRONKOVÉ ZESILOVAČE

Karel Rochelt

(Pokračování)

Vliv výstupního převodníku na kvalitu zvuku

Výstupní převodník určuje podstatnou měrou výslednou kvalitu reprodukce. V podstatě funguje stejně jako každý síťový transformátor - převádí určitý proud a napětí na proud a napětí v určitém daném poměru určeném počtem závitů jednotlivých vinutí. Potřebný kmitočtový rozsah je však 1000krát větší a převod musí být kmitočtově nezávislý.

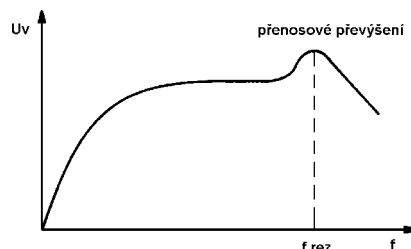
Na obr. 5a je náhradní schéma převodníku. R1 je vnitřní odpor zdroje, R2 je zátěž na sekundárním vinutí, U_s - zdroj signálu. Rcu je stejnosměrný odpor všech vinutí převodníku, na němž vznikají odporové ztráty, které se mění jednoduše na teplo.

To, co je pro převodníky důležité, jsou vlivy primární indukčnosti L1, rozptylové indukčnosti L2 a celkové mezizávitové kapacity C. Ty ovlivňují více nebo méně frekvenční průběh. Co má kdy jaký vliv, můžeme vyčíst z obr. 5b pro nízké frekvence a 5c pro vysoké frekvence. Pro zjednodušení byla vynechána zátěž R2 a převodní poměr železného jádra (nemají žádný vliv). Také odpor vinutí Rcu byl vynechán, protože při vhodném dimenzování je vzhledem k R1 a R2 relativně malý. Na obr. 5b je vidět, že při nízkých frekvencích nemá rozptylová indukčnost L2 žádný vliv, protože je vzhledem k primární indukčnosti velmi malá. Primární indukčnost s parazitní kapacitou vinutí C spolu tvoří paralelní rezonanční obvod. Na rezonanční frekvenci se zvětšuje impedance obvodu teoreticky do nekonečna, v praxi je však utlumena dalšími ztrátami v převodníku a malým odporem zdroje R1, takže se projevuje pouze nepatrným zvlněním frekvenčního průběhu. Při vysokých frekvencích se impedance primární indukčnosti zvětšuje do nekonečna, a proto se neprojevuje. Při vysokých frekvencích (obr. 5c) vytváří spolu rozptylová indukčnost a kapacita vinutí sériovou rezonanční obvod. Odpor se v tomto rezonančním místě zmenšuje k nule, je však tlumen vnitřním odporem R1, odporem vinutí Rcu a odporem zátěže R2. Protože je R2 oproti R1 mnohem větší, je rezonance

tlumena pouze odporem vinutí. Protože je R1 velmi malý, je rezonance velmi silná a nad touto rezonancí klesá i frekvenční průběh velmi strmě - viz obr. 6. Na spodním konci kmitočtového pásma je také zřetelný pokles. Při nejnižších frekvencích se neuplatňuje vliv rozptylové indukčnosti a kapacity vinutí, proto je můžeme vynechat. Uplatňuje se pouze primární indukčnost a vnitřní odpor zdroje, které spolu tvoří odporový dělič. Od určitého bodu k nižším kmitočtům se neustále zmenšuje impedance L1, což má za následek pokles ve frekvenčním průběhu. Na nejnižších frekvencích se navíc jádro blíží ke stavu nasycení, způsobuje zkreslení signálu a ještě více omezuje přenos nejnižších frekvencí.

Z toho je patrné, že by optimální převodník měl být co nejmenší, aby se mohly omezit vlivy parazitních kapacit a rozptylové indukčnosti. Na druhou stranu je potřebná určitá velikost primární indukčnosti. Pokud chceme tyto požadavky splnit, nezbyvá než použít velmi kvalitní transformátorové plechy s velkou permeabilitou a navíjet převodník prokládaným způsobem. Navíc musí být plechy co nejtenčí, aby se nemohly uplatňovat ztráty vířivými proudy na vyšších frekvencích. Velká permeabilita plechů umožní navíjet menší počet závitů, takže se zmenšuje také odpor vinutí, aniž by klesla potřebná primární indukčnost. Zmenšením kapacit vinutí se zase dosáhne rozšíření přenášeného pásma směrem nahoru.

Z těchto důvodů je jistě patrné, že výroba takových převodníků potřebuje určité zkušenosti, vybavení měřicí technikou a dostupnost speciálních dílů a techniky. Dostupnost plechů s velkou permeabilitou je prakticky nulová. Takové plechy se vyrábějí pouze na zakázku a jsou podmíněny minimálními odběry. To si mohou dovolit pouze specializované firmy na výrobu převodníků. Aby byla zajištěna velká elektrická pevnost, používají tyto firmy také dvakrát lakovaný drát. Ten se také běžně nedodává a je dražší. Špičkové firmy vyrábějící transformátory používají také způsob zalévání izolačním lakem pomocí vakuové techniky, což určitě nenajdete v každé navijárně.



Obr. 6. Frekvenční průběh převodníku

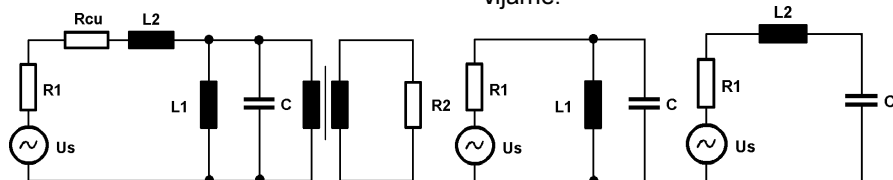
Pokud si tedy někdo myslí, že k výrobě převodníků stačí pouze navíjecí předpis, velmi se mylí. Už jenom změna tloušťky izolačních fólií nebo použití fólií z jiného materiálu s jinými dielektrickými vlastnostmi změni významně parazitní kapacitu, která se projeví změnou rezonancí na převodníku.

Pokud chceme vyrobit zesilovač bez zpětné vazby vyvázané za převodníkem (to je velmi žádoucí, pokud chceme dosáhnout opravdu špičkové kvality zvuku), musí vykazovat převodník opravdu špičkové parametry, jinak bude ovlivněn přenášený frekvenční průběh. Použijeme-li málo kvalitní převodník v zapojení s vyvázanou zpětnou vazbou za převodníkem, zpětná vazba sice značně opraví nerovnosti ve frekvenčním průběhu, avšak na úkor zmenšené rezervy regulace zpětné vazby a tím se vlastně zvětší celkové zkreslení.

Ovlivňování zesilovače a reproduktorových soustav mezi sebou

Jak již bylo zmíněno, nejsou reproduktorové soustavy pouze jednoduchým odporovým spotřebičem energie, avšak kombinovanou komplexní zátěží. Navíc i část energie vyrábí. Těmito vlastnostmi určitým způsobem ovlivňuje funkci zesilovače. Komplexní zátěž způsobuje, že má zesilovač snahu „nakmitávat“. To se dá technicky v určité míře omezit kvalitním návrhem koncového stupně, který musí být dostatečně rychlý v reakci na základy, a to vlastně určuje šířka přenášeného pásma. Také musí mít dostatečnou rezervu regulace zpětné vazby i v nadzvukových kmitočtech, aby byly základy dostatečně potlačeny.

Na každém jednotlivém reproduktoru v soustavě vzniká vlivem jejich činnosti celá řada indukovaných napětí, která je nejvíce patrná na funkci basového reproduktoru, a ta se zpětně objeví na výstupu zesilovače. Každý reproduktor funguje tak, že po přivedení signálu se musí membrána rozkmitat, což nikdy není bez určitého zpoždění, a po odeznění signálu se zase membrána nezastaví okamžitě, avšak po určitou dobu dokmitává. Protože kmitačka reproduktoru je umístěna v magnetickém poli, indukuje se v ní napětí. Toto napětí by teoreticky měla vynulovat reakce zpětné vazby zesilovače, avšak protože do hry vstupují ještě další ovlivnění vzniklá přenosem signálu po připojovacích kabelech, není reakce zpětné vazby dokonalá. Indukovaná energie jde cestou nejmenšího odporu - to zna-



Obr. 5a. Náhradní schéma převodníku; b - náhradní schéma převodníku pro nízké frekvence; c - náhradní schéma převodníku pro vysoké frekvence

mená přes výhybku do ostatních reproduktorů v soustavě. Protože ty ji zase vyzáří, avšak tvarově změněnou a s fázovými posuvy, nevymažou se signály, avšak naopak se vytvoří rušivé signály. To se dá částečně omezit zapojením typu „Bi-Wiring“, ve kterém musí jít indukovaný signál napřed k výstupu zesilovače a teprve potom může do zbývajících reproduktorů.

V bodě připojení k zesilovači ho zpětná vazba již lépe opraví a do ostatních reproduktorů jde pouze jeho část. Navíc odpor kabelu zmenší rušivý signál pronikající do druhého reproduktoru. Ještě lepší je situace, když se chybový signál vůbec nemůže dostat do ostatních reproduktorů, protože je zcela oddělen. Takový případ nastává pouze v případě „Bi-Amping“, ve kterém je každý reproduktor napájen samostatným zesilovačem. Takhle na papíře vypadá problém ovlivňování reproduktorů mezi sebou jako akademická otázka - ve skutečnosti se jedná o velmi závažný problém, který se významně projevuje ve zhoršené kvalitě zvuku. Kdo si neměl možnost vyzkoušet, jaký je rozdíl mezi zvukem soustav napájených jedním zesilovačem „Bi-Wiring“ a zvukem soustav napájených dvěma zesilovači „Bi-Amping“, nebudě zřejmě věřit, jak dramaticky se mohou zvukové kvality zlepšit.

Problém lze také v omezené míře řešit tím, že k reproduktorům použijeme kabel s velmi velkým průřezem a tím i menším odporem. Chybový signál se potom lépe dostává na svorky zesilovače. Pro elektronkové zesilovače však toto postrádá smysl, protože odpor výstupního vinutí převodníku je běžně i 1Ω a ten se musí připočítat k odporu kabelu. Určitě bychom se však měli zaměřit na konstrukci kabelu. Vzhledem k připojenému odporu soustav není vlastní průřez vodiče tak důležitý, jak vám kdejaký prodáváč ve snaze prodat dražší kabel bude tvrdit. Pokud vezmeme různé průřezy kabelů, zjistíme, že od průřezu $1,5 \text{ mm}^2$ se stejnosměrný odpor mědi zmenšuje pouze velmi pozvolna. Co je u kabelů opravdu důležité, je jeho vlastní indukčnost, protože ta se projevuje úbytkem vysokých kmitočtů. A nejedná se zde zřejmě pouze o slyšitelné pásmo, ale i nadzvukové. Zjevně i dobrý přenos nadzvukových kmitočtů je důležitý, aby mohla zpětná vazba korigovat zákmity, protože reprodukce s těmito kabely není zvukem „výškovější“, avšak je spíše více bez zkresení, a to tedy mluví spíše o vlivu oprav zpětnou vazbou.

Kabely s malou indukčností jsou buď silně kroucené z více žil, nebo koaxiálního provedení. Z vlastní zkušenosti mám ověřeno, že čtyři nebo osm silně kroucených zvonkových drátů $0,8 \text{ mm}$, zapojených k soustavám stylem „Bi-Wiring“ poskytuje určitě jeden z nejlepších zvukových přenosů, jaký se dá dosáhnout. Silně omezit indukčnost lze také použitím splepeného vícežilového kabelu, jaký se používá například u počítačové nebo sdělovací technice - musí se však vybrat typ s dostatečným průřezem vodičů a jejich počet musí být alespoň dvacet. Potom

se spojí všechny liché vodiče a všechny sudé. Protože indukčnost se zmenšuje paralelním řazením, tak se tímto způsobem výrazně zmenší (při dvaceti žilách desetkrát) a přitom bude průřez kabelu dostatečně velký.

Vliv použitých součástek a síťového transformátoru na kvalitu zvuku a spolehlivost zesilovače

Kvalitě součástek je vždy dobré věnovat potřebnou pozornost a uvědomit si, že elektronkový zesilovač není až tak běžný typ zesilovače. Na rozdíl od polovodičových zesilovačů se v něm vždy pracuje s podstatně vyššími napájecími napětími, žhavení elektronek zase vyžaduje někdy značně trvalé proudy a při provozu zesilovače vzniká velké množství tepla. Pokud se zaměříme na velikost napětí, musí na ně být součástky dimenzovány. To se týká kondenzátorů a rezistorů. Velikost napětí si v souvislosti s kondenzátory většinou každý dobře uvědomí a vybere je na potřebnou velikost. Někdy je pouze vhodné použít kondenzátory (elektrolytické) s větším teplotním rozsahem, zejména pokud jsou v blízkosti elektronek.

U rezistorů bývá problém, že se většinou zaměříme zejména na výkonovou zatížitelnost. Musí se však počítat i s povoleným napětím. Na mnoha místech se proto musí používat místo miniaturních typů (běžně 300 V) rezistory se zatížitelností 2 W , protože ty bývají většinou na 500 V . To platí pro zesilovače s napájecím napětím do 500 V , pokud je větší, je nutné na mnoha místech použít sériově řazení součástek, aby byla napěťová pevnost dostatečná.

Návrh zesilovače tedy také potřebuje určité znalosti, aby byly tyto rezistory použity všude tam, kde je to nutné. Je třeba mnohdy počítat také s přechodovými jevy, které mohou nastat. Jako příklad bych uvedl nevhodné použití rezistorů u zesilovače EDGAR. Zde výrobce používá na místě katodových rezistorů u výkonových elektronek miniaturní typy $4,7 \Omega$. Ty jsou na 300 V . Teoreticky by na tomto místě měly vyhovět, protože na nich je běžně v klidu úbytek napětí asi 150 mV bez vybuzení a asi $0,5 \text{ V}$ při plném vybuzení. Protože však při chodu zesilovače mohou vznikat různé přechodové jevy a poruchy elektronek, objevuje se zde občas napětí mnohem větší a použití těchto rezistorů je v praxi příčinou velké poruchovosti zesilovače. Měl jsem tu čest už opravovat čtyři kusy zesilovače EDGAR a vždy byly přerušeny popsané rezistory. Zde tedy mohu doporučit majitelům těchto zesilovačů, aby si rezistory vyměnili za rezistory na zátěž 2 W . Navíc je také vhodné jejich odpor zvětšit na 10Ω , protože se poněkud zlepší linearita a zesilovač má menší sklon k zakmitávání.

Podceňována bývá také deska s plošnými spoji. Zejména plochy vedoucí žhavicí proud musí mít dostatečný průřez. Je proto také nutné používat

plošné spoje s tloušťkou mědi $70 \mu\text{m}$, aby se zmenšila možnost vyhrátí měděných ploch na exponovaných místech. Mnoho konstruktérů má stále tendenci nepoužívat u elektronkových zapojení desky s plošnými spoji. Je sice pravda, že zapojení těchto zesilovačů není moc složitá, ale tak jednoduché také není. Oproti zesilovačům používaným v „muzikantské“ praxi, kde se nehledí tolik na zkresení a zapojení jsou proto maximálně zjednodušena, je těchto součástek v hifi zesilovačích běžně více než dvojnásobek. Použití desky s plošnými spoji přinese vždy snazší výrobu a přehlednost zapojení. S tím potom souvisí i menší poruchovost, protože jsou součástky méně mechanicky namáhány při přepravě (právě ulomený přívod bývá častou závadou v „muzikantských“ zesilovačích).

Zřejmě také ze zkušeností s „muzikantskými“ zesilovači minulé éry pramení i přesvědčení, že keramické patice pro elektrony jsou zárukou větší spolehlivosti - méně se lámaly vlivem vyhrátí a byly odolnější při zašpinění proti vzniku vodivé cesty mezi jednotlivými kontakty. Jistě to v určité době také platilo, avšak v dnešní době, kdy jsou k dostání patice z kvalitních termoplastů, nejsou tyto obavy na místě. Je třeba se však zaměřit na kvalitu kontaktů a jejich povrchovou úpravu. Tím mám na mysli hlavně to, že jsou stále ještě nabízeny patice, které byly vyrobeny již před velmi dlouhou dobou, skladovány v nevhodném prostředí, a proto mají zoxidované kontakty.

Velký vliv na výslednou reprodukci má síťový transformátor. Hlavně jeho rozptylové magnetické pole může ovlivňovat výstupní převodníky, a v reprodukci se tak bude objevovat brum. Proto je třeba takový transformátor konstruovat podle určitých zásad, které se liší od běžné praxe výroby transformátorů. Jádro by mělo být asi o 30% větší, než by odpovídalo danému maximálnímu přenášenému výkonu. Tím se významně omezí nasycení jádra a rušivé magnetické pole je výrazně menší. Zde by se mohlo zdát použití toroidního typu jako výhodné. Jistě jste si ale všimli, že téměř nikdo z výrobců tyto transformátory nepoužívá. Mají pro to své důvody, kterých je hned několik. Jedním z nich je, že toroidní transformátory lépe přenášejí vyšší kmitočty. Protože v elektronkových zesilovačích se běžně používají pouze jednoduché usměrňovače s vyhlazovacím kondenzátorem, není žádoucí, aby se přes transformátor dostávaly rušivé vyšší kmitočty ze sítě do zesilovače. Dalším praktickým důvodem je to, že mají větší sklon k bruceň, které bývá znatelné až po určité době provozu. Protože elektronkové zesilovače mají velký stálý příkon, může být vlastní brum transformátoru i dost velký. Nelze sice čekat, že při těchto trvalých výkonech budete mít transformátor, který nebude „trochu vrčet“, běžné transformátory EI se však s tímto problémem vyrovnávají určitě lépe.

Výrobní praxe transformátorů EI také umožňuje snazší výrobu s více

vinutími a aplikací stínících bezpečnostních vrstev nebo fólií mezi jednotlivými vinutími, spojených s ochrannou svorkou transformátoru.

Nakonec i možnost lepšího a výrobně snazšího upevnění je důvod pro použití klasického transformátoru EI. Protože transformátory jsou běžně velmi těžké, určitě je výhodnější váhu rozložit do čtyř šroubů než do jednoho.

Vliv konstrukce skříně na zvuk zesilovače a jeho parametry

V tomto případě se jedná hlavně o požadavek, aby skříň byla vyrobena z nemagnetického materiálu. V praxi se nikdy zcela nevyhne tomu, aby byl síťový transformátor v blízkosti nějaké plechové stěny nebo krytu. Pokud nechceme, aby se jeho rozptylové pole šířilo k výstupním převodníkům a na nich se indukovalo napětí na sekundárních vinutích, musíme vyrobit skříň z dostatečně tlustého nemagnetického plechu. Nejvhodnější je asi hliník - snadno se obrábí a dá se ještě poměrně snadno sehnat. Další možnost je nerezový plech, avšak tady pozor - existuje celá řada druhů nerezových plechů a některé jsou magneticky vodivé. Nevýhodou těchto plechů je také vysoká cena, špatně se shánějí a špatně se obrábějí, protože jsou zpravidla velmi tvrdé. Jistou výhodou jsou ještě měděné plechy, avšak jsou málo dostupné a jejich povrchová úprava není zrovna snadná.

Skříň vzhledem k tomu, že jsou na ní připevněny tři transformátory s hmotností běžně i přes 15 kg, musí být velmi pevná a odolná rezonancím, které způsobuje síťový transformátor. Ten je schopen při nevhodné konstrukci skříně rozezvučet větší plochy plechu.

O funkci stínění a ochrany před nebezpečným dotykem se zde nemusím snad ani zmiňovat, protože je lze považovat za samozřejmé.

Návod na stavbu zesilovačů PPP 120 a PPP 35

Základní schémata pocházejí od Gerharda Haase a jeho firmy EXPERIENCE electronics, která je známá výrobou výstupních převodníků a síťových transformátorů nejlepší kvality. Jejich převodníky a i síťové transformátory využívají nejlepší plechy, které jsou k dostání (tloušťka 0,35 mm, výkonové ztráty 1,11 W/kg - pro srovnání běžné plechy 0,5 mm mají výkonové ztráty 5,3 W/kg), navíc mají svoji raznici na tyto plechy, která jim dává nezvyklý tvar označovaný MD (viz obr. 7). Protože magnetické siločáry jsou k přerušení magnetického obvodu více kolmé, omezi se tím i ztráty jádra. Převodníky jsou díky těmto plechům podstatně menší než srovnatelné převodníky jiných firem, a to, jak jsme si řekli, umožňuje dosáhnout širšího přenášeného pásma a většího činitele tlumení.

Oproti původnímu návrhu jsou tato zapojení mírně upravena a jsou pro ně navrženy nové desky s plošnými spoji, které umožňují použít více druhů typů součástek.

Při výběru zapojení byl vzat v úvahu požadavek, aby bylo možné tímto zesilovačem napájet jakékoliv reproduktorové soustavy, aniž by se musel upravovat jejich impedanční průběh. Také výkon u obou zesilovačů umožňuje připojit i málo citlivé soustavy, aniž bychom měli pocit nedostatečného výkonu zesilovače (od asi 85 dB).

Protože jsou obě zapojení prakticky shodná, bude popsána pouze silnější varianta zesilovače - slabší se liší pouze menším počtem výkonových elektronek, jiným typem převodníku s jiným převodem a slabším zdrojem. Popsán bude pouze jeden kanál zesilovače a jemu příslušná polovina napájecího zdroje. Seznam součástek je také pouze pro jeden kanál.

Technické údaje zesilovačů

PPP 120

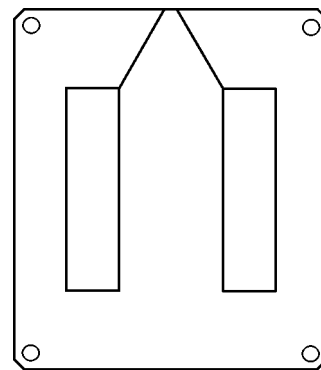
Maximální výkon:	2x 120 W.
Připojovací impedance:	2, 4, 6, 8 Ω + 2x 4 Ω Bi-Amping, 2x 2 Ω Bi-Amping.
Zkreslení:	2 % - 120 W, 0,1 % - 12 W, 0,04 % - 1 W.
Odstup rušivých signálů:	82 dB.
Přeslechy:	1 kHz - 76 dB, 10 kHz - 65 dB.
Vstupní citlivost:	1,5 V.
Vstupní impedance:	11 k Ω .

PPP 35

Maximální výkon:	2x 35 W.
Připojovací impedance:	2, 4, 8 Ω .
Zkreslení:	2,8 % - 35 W, 0,13 % - 1 W.
Odstup rušivých signálů:	86 dB.
Přeslechy:	1 kHz - 76 dB, 10 kHz - 65 dB.
Vstupní citlivost:	1,25 V.
Vstupní impedance:	11 k Ω .

Elektrické zapojení

Protože se jedná o elektronkový zesilovač, je zapojení poměrně jednoduché (obr. 8a). Vstupní signál je přiveden přímo na potenciometr 22 k Ω /N. Použití lineárního potenciometru má své důvody. Protože citlivost zesilovače je 1,5 V, budeme využívat spíše menší zeslabení signálu a použití logaritmického potenciometru by způsobilo, že bychom v praxi měli dost hrubou využívanou regulaci v rozsahu typicky 30 stupňů otočení knoflíku. S lineárním potenciometrem získáme rozsah dobrých 90 stupňů. Pokud však spíše posloucháte při menších hlasitostech, nic nebrání použít logaritmický typ. Lineární potenciometr také přináší výhodu v lepším souběhu u tandemového provedení, než jaký mají logaritmické typy. Signál je veden z potenciometru na kondenzátor C1. Je zde navržen typ MKT nebo MKP, může být použit i bipolární typ elkos 2,2 μ F/50 V. Zvukové rozdíly nejsou



Obr. 7. Tvar plechu MD

na rozdíl od tvrzení „kondenzátorových maniaků“ žádné, pouze u svítkových typů lze čekat dlouhodobější stabilitu.

R1 mírně upravuje průběh potenciometru na logaritmický, lze ho také vynechat. Z kondenzátoru C1 je veden signál na řídicí mřížku dvojitě triody E1 (ECC83), polovina elektronky signál zesiluje, druhá slouží jako impedanční převodník pro další stupeň. Je tady použit typ ECC83, který má požadovanou velikost zesílení, lze jej zaměnit i za E83CC, který je jeho vylepšenou verzí z hlediska životnosti a odolnosti proti otřesům. Napájecí napětí pro tuto elektronku je stabilizováno obvodem R11, R12, C5 a D1 až D4, napájecí napětí zesilovací části je navíc dodatečně filtrováno R5 a C4. Na katodu zesilovací části elektronky je přivedena zpětná vazba přes R10. Kondenzátory C2, C3 a C6 blokují vysokofrekvenční zákmitý zesilovače. Z katody druhé poloviny E1 je veden signál na řídicí mřížku E2, která je zapojena jako invertor. Na výstupu z anod této elektronky (ECC81) je vzájemně otočený signál, který je veden přes oddělovací kondenzátory na řídicí mřížky výkonových pentod.

Jako E2 je použita dvojitá trioda ECC81, která je dostatečně proudově zatížitelná, aby mohla bez problémů a s dlouhou životností budít výkonové pentody. Budicí napětí z invertorů je vedeno přes kondenzátory C8, C9, C11 až C14 a rezistory R31 až R36 na řídicí mřížky výkonových pentod E3 až E8. Rezistory R31 až R36 tvoří spolu s kapacitou mřížky výkonové elektronky vysokofrekvenční filtr zamezující pronikání např. rádiových signálů.

Na místě výkonových pentod jsou použity elektronky E34L, které jsou vylepšenou verzí známých EL34. V praxi je můžete bez obav zaměnit. Pentody jsou zapojeny jako triody - napětí pro brzdicí mřížku je pevně spojeno s katodou, napětí pro stínící mřížku je odebíráno přes omezující rezistory R43 až R48 ze zvlášť filtrovaného napětí z napájecího zdroje. Na řídicí mřížky výkonových pentod je také přiváděno záporné stejnosměrné předpětí, které je získáváno pro každou polovinu elektronek samostatným zdrojem tvořeným jednocestným usměrňovačem a dvojitým filtračním obvodem. Vyhlazené napětí se potom přivádí pro každou výkonovou elektronku přes trimr a omezující rezistor na řídicí mřížky.

(Pokračování příště)

ELEKTRONKOVÉ ZESILOVAČE

Karel Rochelt

(Pokračování)

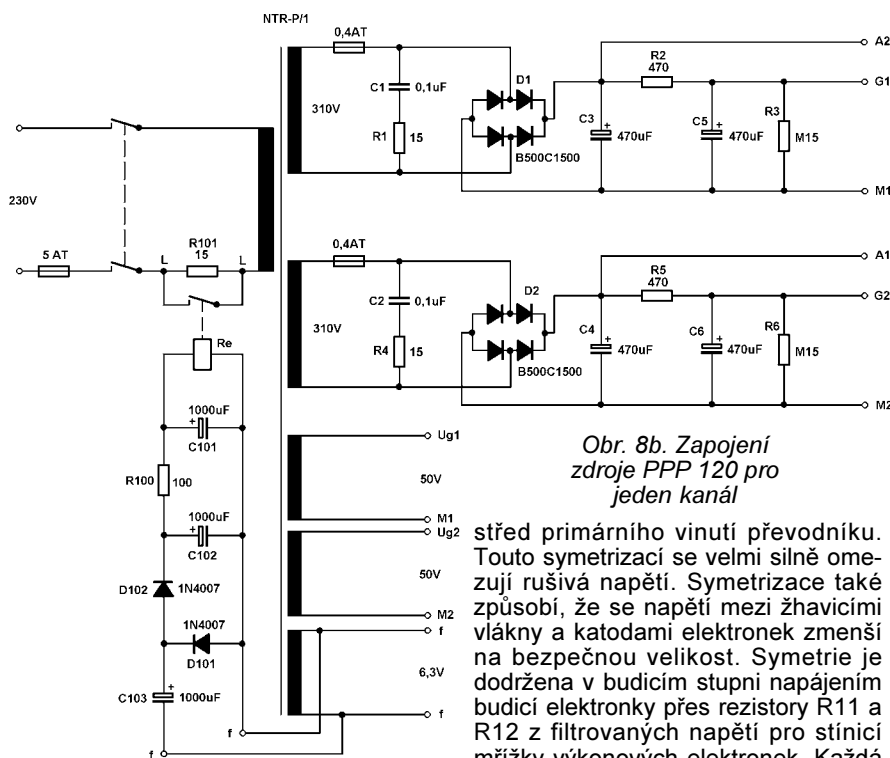
Tímto předpětím se nastavuje klidový proud procházející každou výkonovou elektronkou - takto se nastaví klidový proud u každé elektronky samostatně na stejnou hodnotu a není tedy třeba elektronky vybírat. Klidový proud pro PPP 120 je 35 mA pro každou elektronku, pro PPP35 je to 55 mA. Klidový proud zjistíme odečtením úbytku napětí na linearizačních katodových rezistorech R37 až R42, na kterých se nastaví úbytek napětí 0,35 V (0,55 V u slabší verze). Výstupní signál z katod výkonových elektronek se přivádí již na primární vinutí výstupního převodníku.

Každá trojice výstupních elektronek má svůj samostatný napájecí zdroj. Proud prochází v každé polovině z plus pólu ze zdroje na anody elektronek, přes ně pak na primární vinutí převodníku, kde využívá celé délky vinutí a na druhém konci vinutí je připojen k minus pólu zdroje. Druhá trojice, která je zapojena jako invertující, má také svůj samostatný zdroj, je připojena k primárnímu vinutí výstupního převodníku v obráceném směru. Díky tomu pracují vždy obě trojice elektronek společně „do výkonu“ a tím vzniká i menší vnitřní odpor zesilovače.

Z katody E3 je vyvázána zpětná vazba. Tady by se mohlo zdát, že zpětná vazba kontroluje pouze tuto elektronku. Protože jsou však odpory katodových rezistorů vzhledem k velikosti odporu vinutí a R10 zanedbatelně malé, kontroluje činnost celé větve

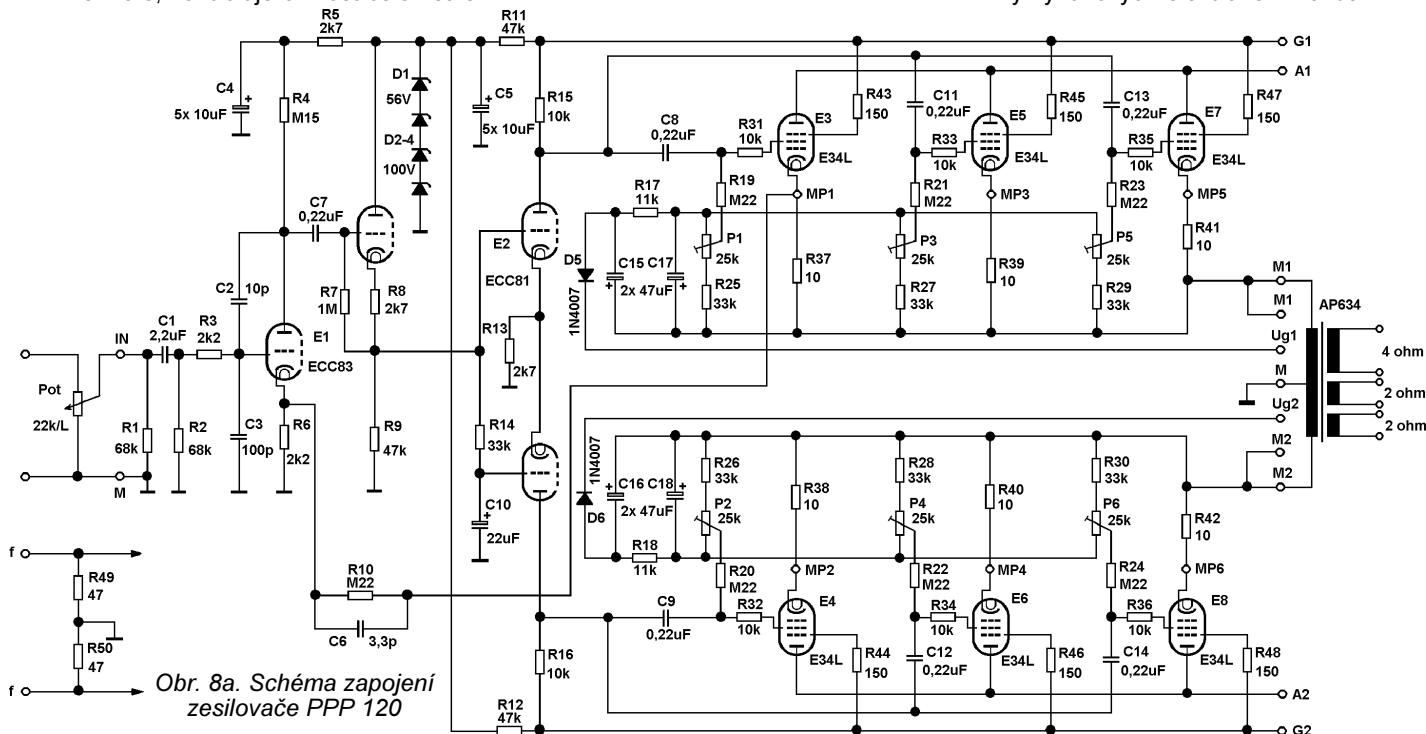
výkonových elektronek. A protože druhá větev elektronek pracujících v protifázi je spojena přes stejné vinutí převodníku, objeví se i všechny chybové signály na katodě E3. Tímto způsobem tedy kontroluje zpětná vazba všechny výkonové elektronky.

Protože každá polovina výkonových elektronek potřebuje svůj oddělený napájecí zdroj, musí být zdroje dva (obr. 8b). Také každá polovina potřebuje oddělený zdroj pro předpětí řídicích mřížek elektronek a všechny elektronky vyžadují žhavicí napětí. Z toho plyne potřeba deseti oddělených sekundárních vinutí na síťovém transformátoru ve stereoфонní verzi zesilovače. Větší složitost transformátoru je na druhé straně vyvážena menšími nároky na filtraci napájecího napětí, protože zdroje jsou v konečném důsledku zapojeny k výstupnímu převodníku v protifázi a rušivá napětí se tímto významně omezují. Žhavicí napětí je symetrizováno k pracovní zemi zesilovače přes rezistory R49 a R50, zdroje zase přes odbočku upro-



Obr. 8b. Zapojení zdroje PPP 120 pro jeden kanál

střed primárního vinutí převodníku. Touto symetrizací se velmi silně omezují rušivá napětí. Symetrizace také způsobí, že se napětí mezi žhavicími vlákny a katodami elektronek zmenší na bezpečnou velikost. Symetrie je dodržena v budicím stupni napájením budící elektronky přes rezistory R11 a R12 z filtrovaných napětí pro stínící mřížky výkonových elektronek. Každá



Obr. 8a. Schéma zapojení zesilovače PPP 120

výkonová část zdroje má svoje jištění tavnou pojistkou, která se přeruší v případě poruchy elektronky. Zabrání tak zničení některých součástek v zapojení a i přetížení reproduktorových soustav - při poruše vzniklé zkratem mřížek v elektronce mohou vzniknout i dosti hlasité signály na výstupu zesilovače. Členy RC za pojistkami ve zdrojích napájecího napětí slouží k odfiltrování nežádoucích napěťových špiček vznikajících na usměrňovacích diodách. Protože vinutí transformátoru je zdroj s velkou indukční složkou, který je připojen přes nelineární součástku (diodu) ke kapacitní zátěži, vzniká vlivem velkého fázového posuvu při každém sepnutí diody velký proudový náraz, který se projeví vznikem napěťových špiček o kmitočtu 100 Hz a jeho dalších harmonických. Ty potom pronikají všude a projevují se zřetelným brumem v reproduktorech.

Na výstupu jednotlivých usměrňovačů jsou připojeny také vybíjecí rezistory 150 kΩ, protože by se napětí na nabitých filtračních kondenzátorech mohlo při neosazených elektronkách vyskytovat i několik hodin po odpojení napájecího napětí. Před síťovým transformátorem je zapojen obvod, omezující proud tekoucí do zesilovače při zapnutí, protože by jinak mohly „vypadávat“ jističe elektrického rozvodu. Tento obvod nejprve napájí transformátor přes omezující rezistor a asi po půl sekundě, kdy jsou již filtrační kondenzátory částečně nabity, se tento rezistor přemostí kontaktem relé a vstupní proud již není dále omezen. Napájecí napětí pro tento obvod se získává z jednoho sekundárního vinutí 6,3 V pro žhavení elektronek.

Každý typ zesilovače používá jiný druh výstupního převodníku s jiným převodem. Menší PPP 35 používá typ AP234. Výstupní vinutí je spojeno v celku, pro jednotlivé připojovací impedance jsou k dispozici odbočky z tohoto vinutí. Tady je vhodné vždy vyzkoušet, která odbočka poskytuje nejlepší zvukové výsledky jak z hlediska kvality, tak i z hlediska dosažitelné hlasitosti zvuku.

PPP 120 používá typ AP634/2, který má tři výstupní vinutí: 2x pro 2 Ω a 1x pro 4 Ω. Různými způsoby zapojení lze dosáhnout potřebný ideální výstup. Jedna z možností je sériovým řazením zapojit impedance 2, 4, 6 nebo 8 Ω v klasickém nebo „Bi-Wiring“ zapojení. Absolutně perfektní možností však je, že můžete získat dvě oddělená vinutí 4 Ω a soustavy zapojit ve stylu „Bi-Amping“. Takto připojené soustavy poskytují perfektně dokonale zvuk. Teprve při tomto zapojení si uvědomíte, jak velké zkreslení vzniká

tím, že se reproduktory mezi sebou ovlivňují.

Pokud k tomuto zesilovači připojíte trochu slušný přehrávač CD a přiměřeně kvalitní soustavy, budete překvapeni, co se ve zvukových nahrávkách skrývá a s jakou „čitelností a čistotou“ je lze reprodukovat. Z toho plyne ideální impedance připojených soustav pro tento zesilovač 4 Ω. Avšak i soustavy s impedancí 8 Ω lze bez obav připojit, protože budete mít k dispozici pouze poloviční výkon, který je však stále na výsost dostatečný. Toto připojení je zvukově zcela rovnocenné pravému „Bi-Amping“ zapojení se dvěma zesilovači - získáme tady výhodu v poloviční ceně za výkonové zesilovače.

Výrobce u tohoto převodníku předpokládá sériové nebo sérioparalelní řazení výstupních vinutí převodníku k dosažení co nejnižšího odporu vinutí a tím většího činitele tlumení. Tak se dá sice dosáhnout i činitele tlumení 25 při zátěži 4 Ω, bohužel však musím konstatovat, že paralelní spojení výstupních vinutí vede vždy ke znatelnému zhoršení zvuku (větší zkreslení). Při vysokých nárocích na kvalitu zvuku lze tedy používat pouze sériové řazení výstupních vinutí.

Ačkoliv jsou teoreticky vinutí 4 Ω a dvě sériově spojená vinutí 2 Ω shodná a i měření bez zátěže to napěťově potvrzují, v praxi se vlivem jiných průřezů drátů chovají odlišně. Vinutí 4 Ω poskytuje při zatížení o asi 1 dB větší napětí než spojená vinutí 2 Ω. Proto je ve většině případů nutné připojit basovou větev soustavy k vinutí 4 Ω a středovýškovou ke spojeným vinutím 2 Ω, jinak se bude zdát výsledný zvuk příliš „hubený“ s nedostatečným podílem základních kmitočtů. Není se třeba obávat příliš silného zvuku v basech, zvuk je spíše „hutnější“ v základních kmitočtech, což kladně přispívá k zpřehlednění výsledného zvuku.

Tady by si mohli zájemci o zesilovač PPP 35 říci, že mají smůlu, že nemohou využít výhod „Bi-Amping“ zapojení. Mohu však říci, že za určitých podmínek mohou využít veškerých výhod zcela nebo alespoň částečně. Pokud chceme získat veškeré výhody, musíme zapojit basovou větev mezi svorku 0 a vývod 4 Ω a středovýškovou mezi vývod 4 Ω a vývod 8 Ω (obr. 9). Takto získáme také dvě prakticky oddělená vinutí, která se neovlivňují - spojení na svorce 4 Ω nemá vliv. Je tady ale problém, že vinutí mezi 4 a 8 Ω odbočkou poskytuje o asi 6 dB menší výstupní napětí než vinutí 0 až 4 Ω. To je příliš velký rozdíl na to, aby mohl být zvuk kmitočtově vyrovnaný. Je však několik typů soustav (např. VISATON VIB EXTRA 2, GF, G, GGF), které mají

místo pevně nastaveného útlumu středovýškové oblasti regulatory úrovně pro středotónové a výškové reproduktory. Ty mají většinou nastaven v běžném provozu útlum větší, než je tady potřebných 6 dB, a tak pouhým otočením regulátoru stačí tento rozdíl vyrovnat k plné spokojenosti a dosáhnout stejných kvalit jako PPP 120. Většina soustav však tuto možnost nemá. Zde se nabízí zapojení, kdy se opět basová část připojí mezi 0 a 4 Ω vývod, středovýšková část se však připojí mezi svorku 2 a 8 Ω. Rozdíl mezi jednotlivými vývody je pak asi 2 dB. Takto vytvořené vývody využívají přibližně třetinu celkové délky výstupního vinutí převodníku společně a další části odděleně. I takto částečně oddělená vinutí poskytují zvukově dokonalejší výsledky než klasické zapojení - zlepšení je spíše v kvalitnějších oddělení nástrojů od sebe a větším klidu ve zvuku, ale taková zkreslení, jako např. v sykavkách, zůstávají téměř nezměněna.

Z předchozích řádek je jisté patrné, že velkou výhodou budou mít samovýrobci reproduktorových soustav, pokud jsou dostatečně znalí a dokáží si případně potřebné korekce hlasitosti zvuku jednotlivých pásem upravit. I tak musím upozornit, že pokud mají být požadovaná zlepšení slyšitelná, musí být jak soustavy, tak i zdroj signálu dostatečně kvalitní, protože jinak přichází veškerá snaha vniveč.

Seznam součástek PPP 120, výkonový stupeň, jeden kanál

Rezistory (metalizované 0,5 W/1 %)

R1, R2	68 kΩ
R3, R6	2,2 kΩ
R4	150 kΩ/2 W
R5, R13	2,7 kΩ/2 W
R7	1 MΩ
R8	2,7 kΩ
R9, R11, R12	47 kΩ/2 W
R10, R19 až R24	220 kΩ
R14, R25 až R30	33 kΩ
R15, R16	10 kΩ/2 W
R17, R18	11 kΩ
R31 až R36	10 kΩ
R37 až R42	10 Ω/2 W
R43 až 48	150 Ω/2 W
R49, R50	47 Ω
P1 až P6	25 kΩ, trimr

naležato 5x10 mm zapouzdřený

Kondenzátory

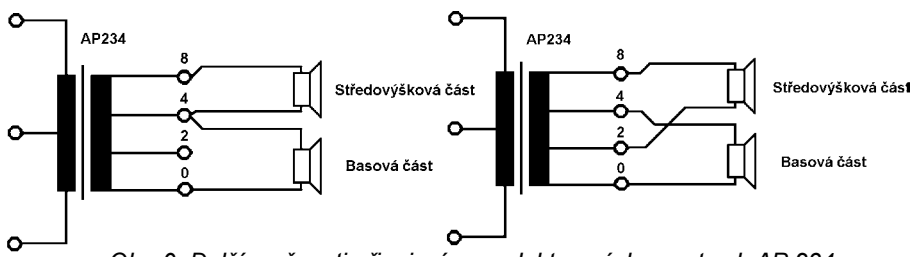
C1	2,2 μF/100 V, MKP(MKT) radiální 10 až 15 mm
C2	10 pF, ker., 500 V
C3	100 pF, ker., 500 V
C4, C5	5x 10 μF/450 V
C6	3,3 pF, ker., 500 V
C8, C9,	
C11 až C14	220 nF/630 V MKP (MKS) axiální 27,5 mm

C10 22 μF/100 V

C15 až 18 47 μF/100 V

Ostatní součástky

D1	1,3 W/56 V, Zener.
D2 až D4	1,3 W/100 V, Zener.
D5, D6	1N4007
E1	ECC83
E2	ECC81
E3 až E8	E34L
objímka Noval	do pl. spoje 2x
objímka Oktal	do pl. spoje 6x



Obr. 9. Další možnosti připojení reproduktorových soustav k AP 234

výstupní převodník AP 634/2
vstupní potenciometr 2x 22 k Ω /lin.

Seznam součástek PPP 120 - polovina zdroje (jeden kanál)

R1, R4	15 Ω /5 W, drátový/metalizovaný
R2, R5	470 Ω /5 W, drátový/metalizovaný
R3, R6	150 k Ω /2 W metalizovaný
C1, C2	100 nF/1000 V, MKP
C3 až C6	470 μ F/450 V
D1, D2	B500C1500
pojisky trubičkové pomalé 400 mA 2x držáky pojistek 4x síťový transformátor NTR-P/1A - pro oba kanály	

Seznam součástek PPP 35 výkonový stupeň jeden kanál

Rezistory (metalizované 0,5 W/1 %)

R1, R2	68 k Ω
R3, R6	2,2 k Ω
R4	150 k Ω /2 W
R5, R13	2,7 k Ω /2 W
R7	1 M Ω
R8	2,7 k Ω
R9, R11, R12	47 k Ω /2 W
R10, R19, R20	220 k Ω
R14, R21, R22	33 k Ω
R15, R16	10 k Ω /2 W
R17, R18	22 k Ω
R23, R24	10 k Ω
R25, R26	10 Ω /2 W
R27, R28	150 Ω /2 W
R29, R30	47 Ω
P1, P2	25 k Ω , trimr

nalezato 5x10 mm zapouzdřený

Kondenzátory

C1	2,2 μ F/100 V MKP (MKT) radiální 10 až 15 mm
C2	10 pF, ker., 500 V
C3	100 pF, ker., 500 V
C4, C5	5x 10 μ F/450 V
C6	3,3 pF, ker., 500 V
C7 až C9	220 nF/630 V MKP (MKS) axiální 27,5 mm
C10	22 μ F/100 V
C11 až C14	47 μ F/100 V

Ostatní součástky

D1	1,3 W/56 V, Zener.
D2 až D4	1,3 W/100 V, Zener.
D5, D6	1N4007
E1	ECC83
E2	ECC81
E3, E4	E34L

objímka Noval do pl. spoje 2x
objímka Oktal do pl. spoje 2x
výstupní převodník AP 234
vstupní potenciometr 22 k Ω /lin.

Seznam součástek pro zdroj PPP 35, jeden kanál (polovina)

R1, R4	22 Ω /5 W drátový/metalizovaný
R2, R5	1 k Ω /5 W drátový/metalizovaný
R3, R6	150 k Ω /2 W
C1, C2	100 nF/1000 V, MKP
C3, C4	220 μ F/450 V
C5, C6	47 μ F/450 V
D1, D2	B500C1500
pojisky trubičkové pomalé 200 mA 2x držáky pojistek 4x síťový transformátor NTR-P/3A - pro oba kanály	

Seznam součástek pro pomalý rozběh - oba zesilovače stejné

R100	100 Ω
R101	7x 100 Ω /5 W drát.
C101 až C103	1000 μ F/40 V
D101, D102	1N4007
Re - 12 V/16 A 1P, např. Finder 40.61-12	

Elektrolytické kondenzátory jsou všechny navrženy radiální, kondenzátory MKP a MKT mimo C1 jsou uvažovány axiální (válečkové) od výrobce ES Ostrava. Lze pochopitelně použít i krabicové typy jiných výrobců, zde však pozor na přípojovací rozteče.

Stavba a oživení

Nejprve vyvrtáme desku s plošným spoji (obr. 10a, b, 11a, b, 12a, b, 13a, b) - většina otvorů je 1,2 mm, pro objímky 1,6 mm. Označené body v okolí objímek slouží k lepšímu chlazení elektronky a vyvrtají se vrtákem 4 mm. Otvory pro připojení filtračních kondenzátorů na desce zdroje vyvrtějte podle použitých kondenzátorů - předpokládaná rozteč je 10 mm, avšak na trhu je více typů.

Potom osadíme objímky elektronky - u velkých objímek pozor na správnou polohu vybrání. Musí být vždy mezi dvěma spojenými kontakty objímky na desce. Chybným zapájením se zničí elektronky! Při pájení objímek dbejte, aby dosedly celou plochou k desce, a byly tedy k ní ideálně kolmé. To má hlavně smysl v tom, že pokud vyrobíme zesilovač s vyčnívajícími elektronkami ven, budou stát pěkně rovně v řadě ze sebou.

Potom osadíme ostatní součástky. Dáváme pozor na správnou polaritu kondenzátorů, diod a usměrňovacích můstek. Filtrační kondenzátory C4 a C5 jsou složeny vždy z pěti kusů 10 μ F/450 V. Ty jsou navrženy z důvodu jejich výšky. Jak bude popsáno v návrhu skříně, která předpokládá připevnění desky k hornímu krycímu plechu, ze kterého vyčnívají elektronky, deska bude připevněna na distanční sloupky 25 mm. Kondenzátory tedy musí mít výšku maximálně 20 mm. Radiální kondenzátory 22 μ F a 47 μ F/450 V jsou k dostání pouze s výškou 26 mm - potřebná kapacita se tedy musí složit z více kusů 10 μ F/450 V s výškou 20 mm. Pokud budete stavět jiný typ skříně, kde nebude výška kondenzátorů na závadu, můžete použít pochopitelně kondenzátory 47 μ F/450 V. Použít delší distanční sloupky by způsobilo velké zapuštění malých elektronky a zesilovač by nevypadal pěkně a i elektronky by se obtížně zasouvaly a vyndávaly z objímek.

Trimry pro nastavení klidových proudů výkonových elektronky osadte ze strany plošných spojů, aby k nim byl lepší přístup zespodu zesilovače. Nezapomeňte na propojky na desce s plošným spoji. Ty by měly mít vzhledem k tomu, že se jedná o propoje žhavicího napětí, dostatečný průřez (1 mm), protože jimi teče proud až 5,5 A.

Do měřicích bodů doporučuji připájet připojovací „piny“ (opět ze strany

spojů). Na ty potom můžete při nastavení klidových proudů pohodlně připevnit krokodýlkové svorky a máte obě ruce volné. Deska zdroje je pro oba zesilovače stejná. Předpokládá osazení filtračními kondenzátory v radiálním provedení. Protože se kapacity kondenzátorů liší především délkou pouzdra, není problém osadit různé typy od různých výrobců. Jejich délka by však neměla překročit 50 mm, pokud chceme dosáhnout pěkně ploché konstrukce zesilovače.

Po osazení všech desek je možné všechny přišroubovat na distanční sloupky a začít s vnitřním propojováním. Protože desku zdroje je třeba připevnit stranou spojů k nosné desce zesilovače, je třeba na ni nejprve napájet všechny přívodní kabely. Použijte kvalitní lanka odolná vyšším teplotám s dostatečným průřezem.

Pro PPP 120 je nutný průřez vedení žhavicího napětí 1,5 mm², pro ostatní vedení 0,75 mm². Pro PPP 35 je nutný průřez vedení žhavicího napětí 1 mm², pro ostatní vedení 0,5 mm². Je výhodné použít více druhů barev vodičů, aby byl snadný přehled, odkud kam vedou. Příslušné páry nebo trojice kabelů vždy dobře zkroutíme k sobě, protože se tímto omezuje možnost naindukování nežádoucích rušivých napětí.

Nejprve připojíme přívody od síťového transformátoru, potom vývody napájecích napětí k deskám zesilovačů. Pozor, aby byla vždy správně propojena jedna polovina desky zdroje s jednou deskou zesilovače. Záměnou vodičů se mohou zničit součástky nebo nebude zesilovač fungovat! Jednotlivé propojovací body jsou vyznačeny na pájecích plochách desky s plošným spoji. Po propojení zdroje s deskami zesilovačů nejprve pečlivě propojíme zemnicí body. Propojujeme zelenožlutým nepřerušovaným lankem o průřezu min. 1 mm². Ochranu před nebezpečným dotykem je třeba provést v 1. bezpečnostní třídě - tzn., že všechny kovové části zesilovače je třeba propojit s ochrannou zemnicí svorkou. Přívodní kabel a vstupní konektor síťového napětí musí být třížilový. Zelenožlutý kabel propojíme s ochrannou svorkou skříně v blízkosti vstupu síťového napětí a vedeme ho dále na ochrannou svorku síťového transformátoru, odkud vyvedeme i další propoje, pokud bude mít konstrukce skříně více vodivě oddělených částí (je třeba všechny spojit s ochrannou svorkou). Toto vedení musí být provedeno velmi pečlivě, protože má zásadní vliv na bezpečnost provozu zesilovače. Z vývodů M na obou deskách výkonových zesilovačů (střed primárního vinutí převodníku) se také vyvedou zelenožluté vodiče a propojí se s ochrannou svorkou. Tím se propojí pracovní země zesilovače s ochranným vodičem síťové části napájení. Tak se nemůže dostat nebezpečné síťové napětí na kterýkoliv vývod a na žádnou kovovou část zesilovače ani při poruše síťového transformátoru (průraz primárního do sekundárního vinutí).

(Pokračování příště)

ELEKTRONKOVÉ ZESILOVAČE

Karel Rochelt

(Pokračování)

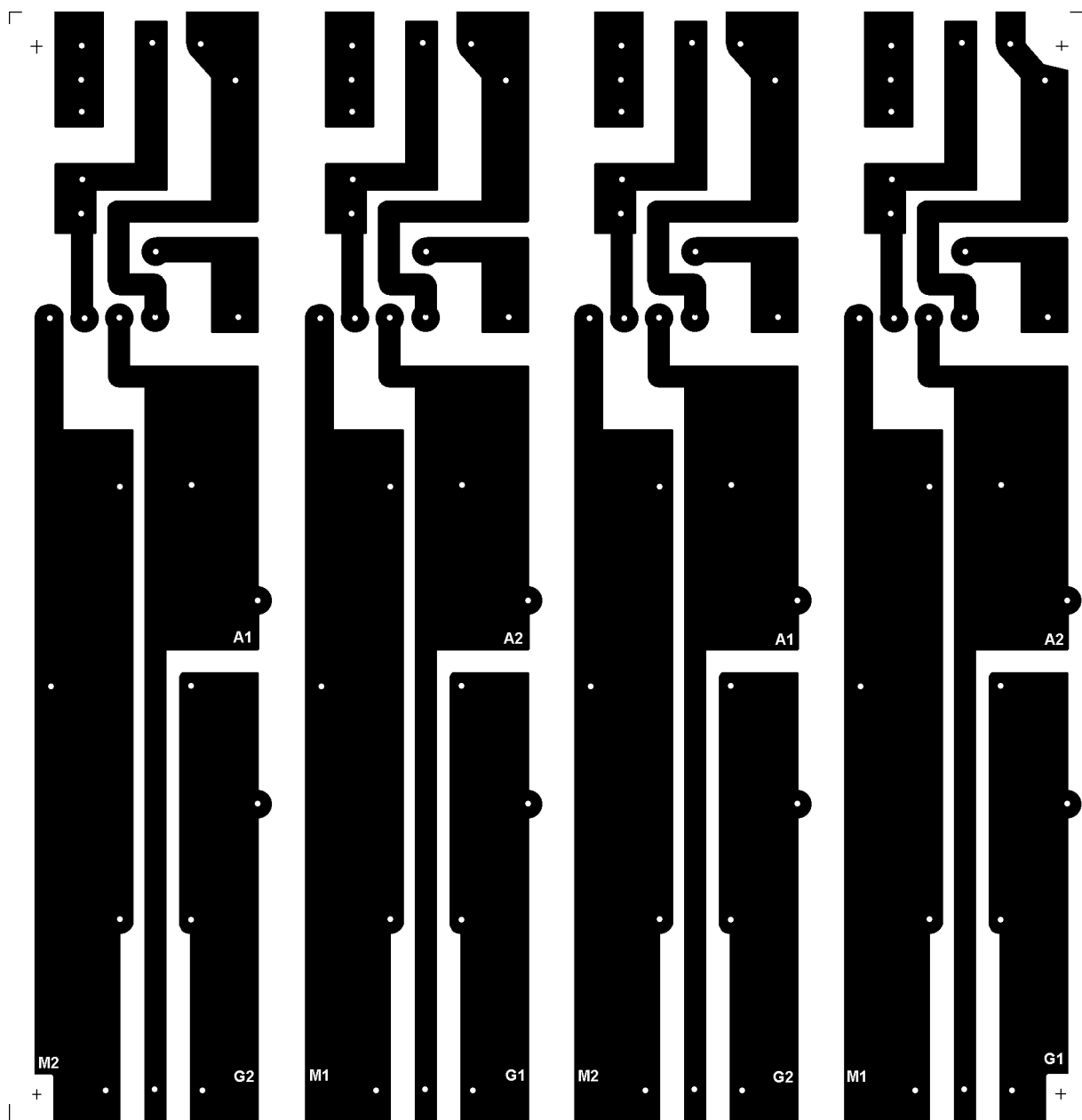
Jako vstupní konektor napájecího napětí je vhodné použít známý typ EURO s pojistkovým pouzdem. Pro jistěti síťové části PPP 120 se použije pomalá pojistka 5 A, pro PPP 35 pomalá pojistka 1,25 A. Z konektoru vedeme napájecí napětí dvojžilově opět zkroucenými vodiči k dvojpólovému spínači (co nejdál od desky zesilovače a převodníků) a potom přes desku pomalého rozběhu k síťovému transformátoru. Spínače musí být pro zatížení 6 A/250 V u PPP 120 a 3 A/250 V pro PPP 35. Uvedené síťové transformátory jsou opět z produkce firmy

EXPERIENCE a jsou vyrobeny speciálně pro tyto zesilovače. Mají tenké plechy, předimenzované jádro a ochranné stínící fólie mezi vrstvami vinutí. Tím je zaručena maximální bezpečnost a minimální rozptylové magnetické pole. Díky použití tenkých plechů s velkou permeabilitou jsou podstatně menší, než by byly z běžných plechů, avšak i tak mají hmotnost 9, případně 3,5 kg. Jejich cena je oproti běžným více jak dvojnásobná, ale investice se jistě vyplatí.

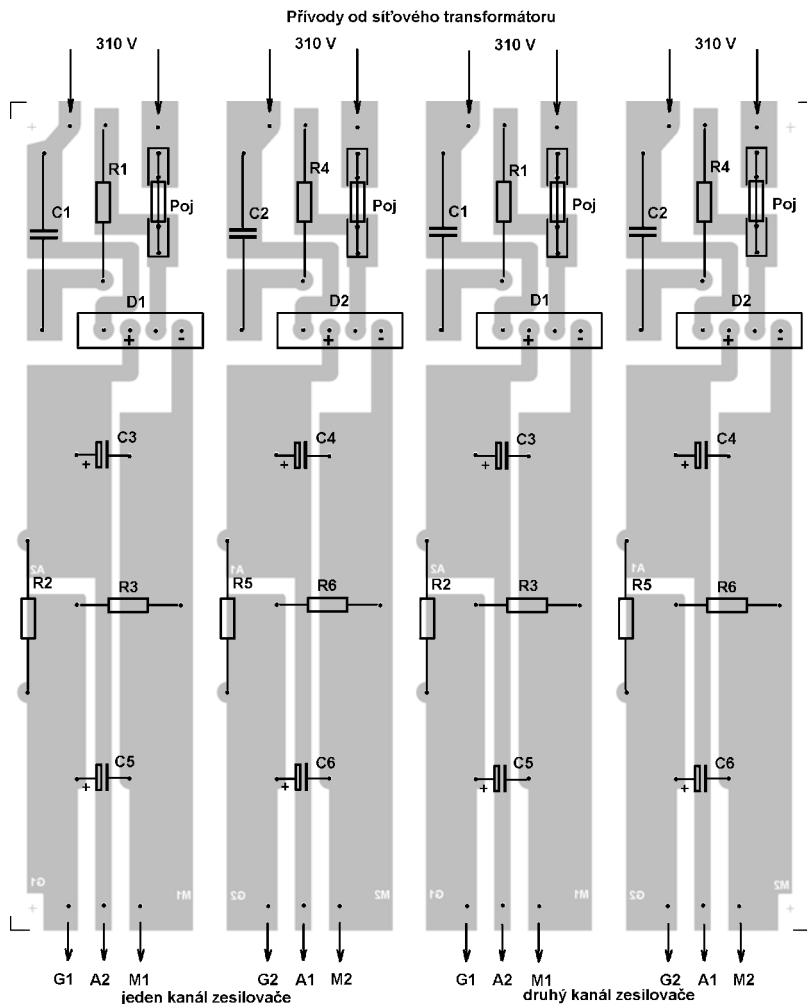
Ještě nesmíme zapomenout připojit napájecí napětí 6,3 V z jednoho vi-

nutí žhavení k desce pomalého rozběhu a podle zvoleného druhu připojení zapojit výstupní převodníky k výstupním svorkám pro reproduktory.

Poslední propoje jsou stíněné vodiče mezi vstupními konektory Cinch, potenciometrem a vstupy zesilovačů. Tady se velmi osvědčily dostupné mikrofonní a linkové kabely PROEL, které se dají běžně koupit v obchodech pro „muzikanty“. Tyto kabely vynikají velkou neutralitou - tj. neovlivňují přenášený frekvenční průběh ani při poměrně velkých délkách, na rozdíl od různých rádobý hifi kabelů za neuvěřitelné ceny. Zkoušel jsem i jiné kabely různých výrobců, včetně pletených, většina z nich „trpí“ poklesem v basové nebo středotónové oblasti. I obdobné kabely značky KLOTZ za kabely PROEL zaostávaly. Od přívodu k potenciometru je vhodné použít mikrofonní kabel - tzn. dvě „živé“ žíly uprostřed zapojené paralelně a stíněny. Tento kabel má sice větší kapacitu, pro většínu CD přehrávačů je to však přínos, protože se „zkldní“ zvuk ve



Obr. 10a. Deska zdrojů (162 x 165 mm)



Obr. 10b. Rozmístění součástek zdrojů

výškách. Výjimkou jsou asi pouze přehrávače Pioneer a Yamaha, které mají běžně velkou výstupní impedanci a tyto kabely u nich způsobí značný úbytek vysokých kmitočtů.

Za potenciometrem se musí použít linkový typ kabelu (jeden stíněný vodič uprostřed), aby jeho kapacita neovlivňovala v závislosti na otočení potenciometru frekvenční průběh. Obě délky kabelů od potenciometru mají být stejné, aby byl zaručen stejný vliv kabelu na oba kanály.

Oživení zesilovače

Ještě než začnete zesilovač oživovat, otočte všechny odporové trimry na deskách zesilovačů tak, aby běžce byly otočeny směrem k rezistorům R17 (R18).

Mějte na paměti, že v zesilovači se vyskytují nebezpečně vysoká napětí - při měření buďte velmi opatrní.

Nejprve zkusíme zapnout zesilovač bez osazených elektronek. Pokud je vše v pořádku, naměříme při vstupním napětí 230 V tato výstupní střídavá napětí na sekundárních vinutích transformátoru: žhavicí napětí 6,3 až 6,6 V, napájecí napětí zesilovačů 300 až 315 V, napětí pro předpětí mřížek - 47 až 51 V.

Dále můžeme naměřit usměrněná napětí ve zdroji: filtrační kondenzátory C3 až C6 - 430 až 440 V, napětí na C17 a C18 (nebo C13 a C14 u PPP 35) 44 až 55 V a napětí na diodách D1 až D4 356 V s tolerancí 5 %.

Zesilovač vypneme a necháme dostatečně dlouho vybit filtrační kondenzátory přes vybíjecí rezistory (překontrolujeme měřením). Potom můžeme osadit elektrony a opět zapnout. Pokud je vše v pořádku a všechny elektrony žhavi, můžete ještě jednou překontrolovat napětí, která se nepatrně zmenší vlivem připojené zátěže. Po asi dvouminutovém zahřátí nastavíme klidový proud výstupních elektronek.

U PPP 120 napětí 0,35 V mezi body: bod M1 postupně proti MP1, MP3 a MP5, bod M2 postupně proti MP2, MP4 a MP6.

U PPP 35 napětí 0,55 V mezi body: bod M1 proti MP1 a bod M2 proti MP2.

Po nastavení všech elektronek to ještě jednou zopakujeme, protože se vlivem vzrůstající zátěže zdroje nastavení změní.

Takto nastavený zesilovač je připraven k provozu. Pokud máme nové elektrony, je třeba po asi 20 hodinách provozu opět nastavit klidové proudy, protože postupným vypalováním elektrod elektronek se změni jejich emisní schopnost. Po 20 hodinách se již elektrody dostatečně vyhřejí a klidový proud se dále nemění. Potom stačí překontrolovat nastavení jednou za rok nebo dva. Nově nastavit zesilovač je však potřeba vždy po výměně jakékoliv výkonové elektrony - buď vadné, nebo po skončení její životnosti. Při nastavování klidového proudu můžete mít na pár minut zesilovač po-

ložen na bok tak, že elektrony leží vodorovně. Tuto polohu však výrobci elektronek nedoporučují jako pracovní z toho důvodu, že vlivem vysokých teplot se mohou provést mřížky elektrony, následně se zkratovat a tím zničit. Běžná životnost elektronek je minimálně 5000 hodin, některé vydrží bezchybně pracovat i dvakrát déle.

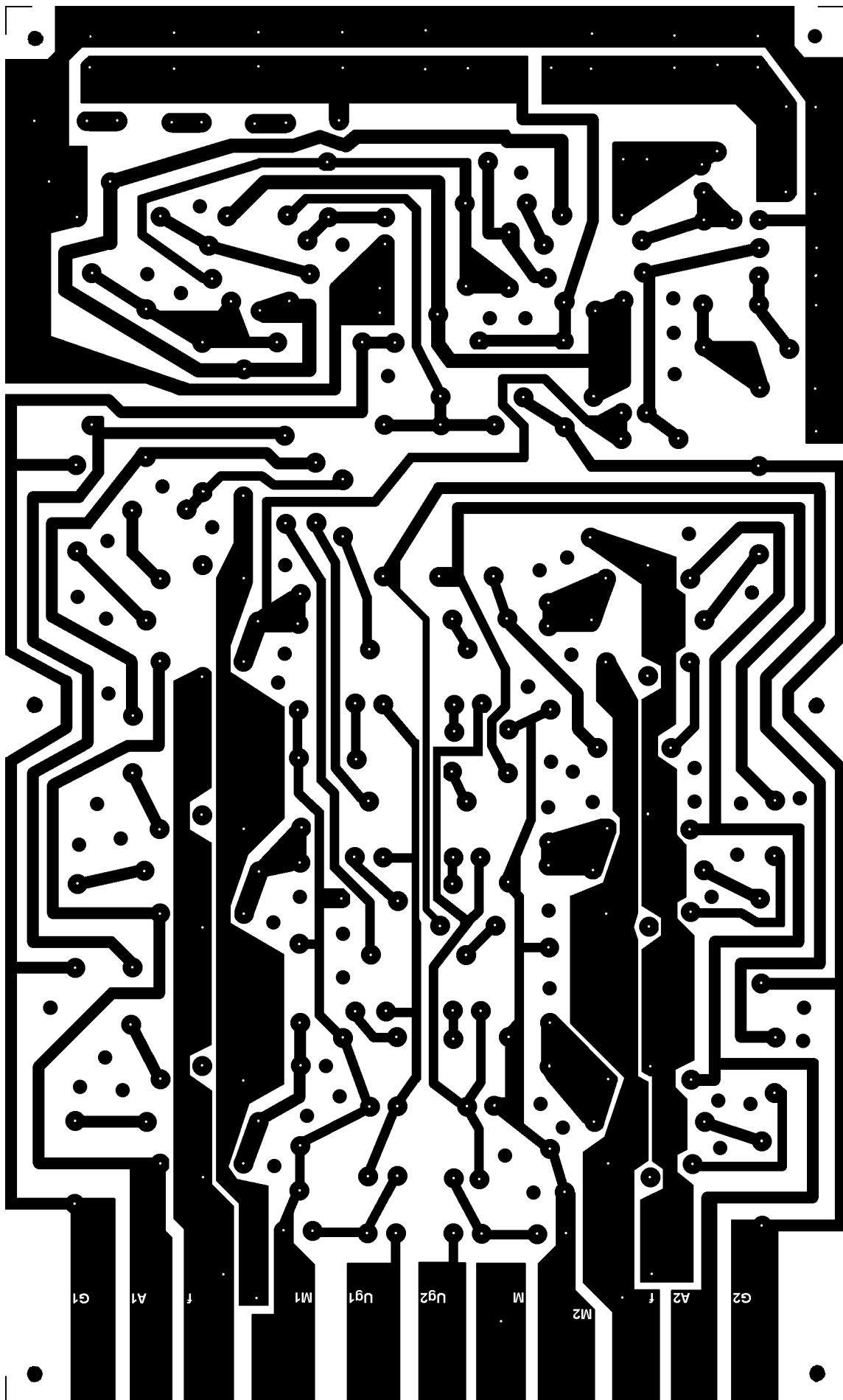
Připojte soustavy. Po zapnutí zesilovače se v reproduktorech objeví na 5 až 10 sekund slyšitelný brum a jeho harmonické, než se zcela nabijí kondenzátory. Poté brum ustoupí a je slyšet pouze z minimální vzdálenosti reproduktorů. Zesilovač je připraven k provozu.

Konstrukce skříně

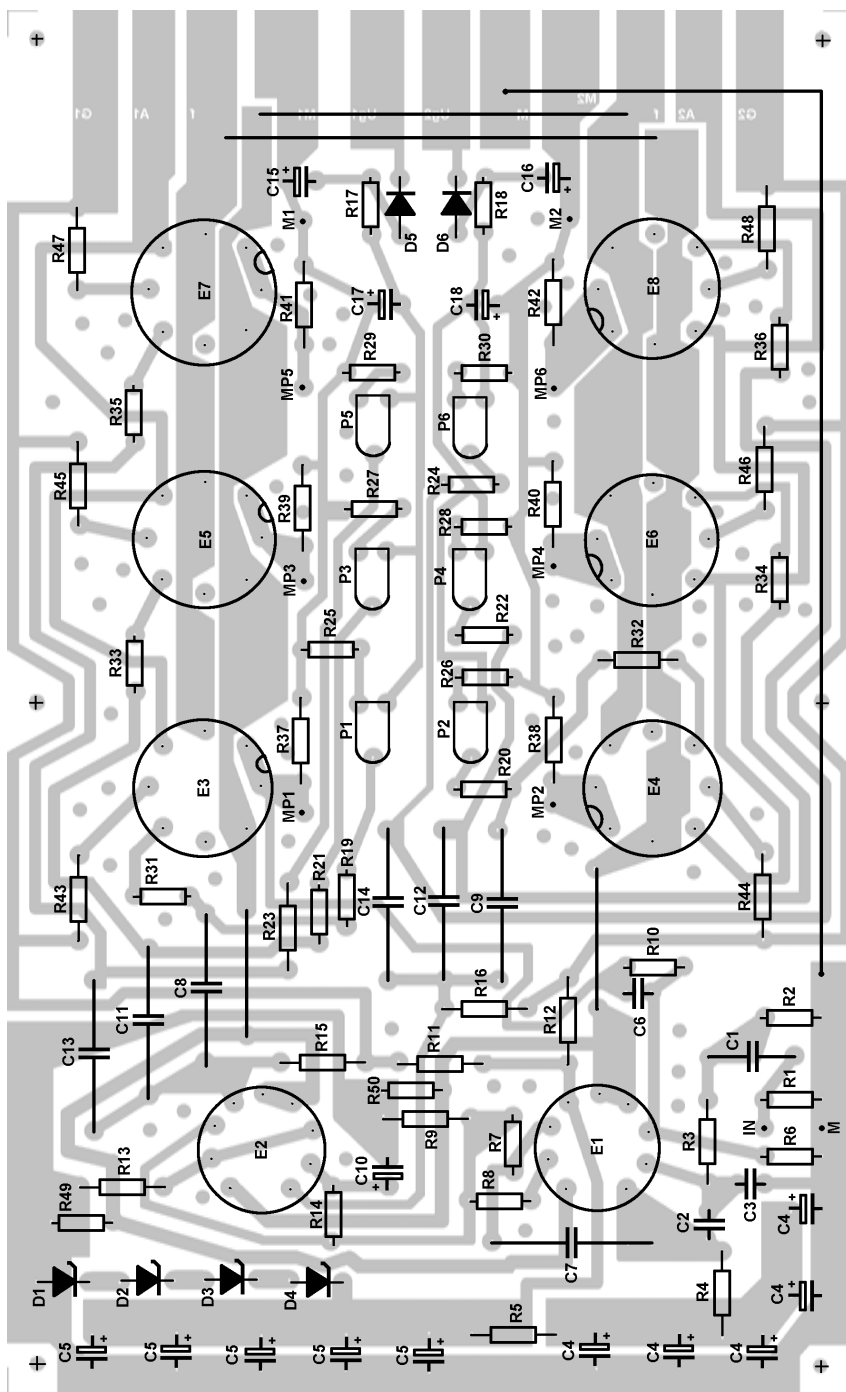
Jako poslední uvádím některé rady ke konstrukci skříně zesilovače. Skříň zesilovače lze jistě řešit mnoha způsoby. Na fotografiích jsou vidět některé možnosti, jak skříň vyrobit. Osobně se mi nejvíce líbí konstrukce, kdy obvod skříně tvoří masivní dřevěný rám, který má nahoře přišroubován nosný plech, na kterém jsou připevněny výstupní převodníky, síťový transformátor a na distančních sloupcích všechny desky s plošnými spoji.

Nosný rám musí být velmi dobře spojen v rozích, protože váha zesilovače může přesáhnout 20 kg u malého typu a 27 kg u velkého typu zesilovače. Distanční sloupky musí být z plastické hmoty, aby nevzniklo vodivé spojení s plošným spojem. Pokud chcete vyrobit skříň tak, aby elektrony pěkně „koukaly“ z nosného plechu, musí být sloupky držící desky zesilovačů dlouhé 25 mm. Sloupky držící desky zdroje a pomalého rozběhu musí mít délku 10 mm, aby bylo možné dosáhnout co nejnižší stavební výšky. Pamatujte, že mezi nejvyšším kondenzátorem ve zdroji a spodním krycím plechem musí být minimální vzduchová mezera 7 mm, protože na obalech kondenzátorů může být plně napájecí napětí. Potřebná stavební výška rámu je tedy závislá na výšce použitých filtračních kondenzátorů!

Jako inspiraci uvádím potřebné rozměry nosného plechu a rámu pro menší verzi zesilovače v symetrickém provedení - větší typ si jistě každý odvodí sám. Dva otvory za síťovým transformátorem slouží k připevnění dvou distančních sloupků pomalého rozběhu, čtyři není nutné používat. Filtrační kondenzátory 220 µF/450 V mohou mít v tomto případě maximální délku 40 mm. Pokud seženete delší typy kondenzátorů, musí se zvětšit patřičně i výška rámu. Výstupní převodníky lze přišroubovat přímo na nosný plech, avšak síťový transformátor je vhodné oddělit od nosného plechu gumovými distančními nožičkami, aby se chvění transformátoru zbytečně nepřenášelo na plech a ten se potom rozezníval. To je velmi aktuální hlavně u velkého typu zesilovače, protože trvalý přenesený výkon okolo 500 W již nenechá transformátor v klidu. Z tohoto důvodu doporučuji také postavit ještě přes převodníky a síťový transformátor kryt s dřevěnými bočnicemi (jako má např.



Obr. 11a. Deska s plošnými spoji zesilovače PPP 120 (150 x 250 mm)



Obr. 11b. Rozmístění součástek zesilovače PPP 120

zesilovač EDGAR), aby se zamezilo vyzařování brumu. Menší typ zesilovače je potom prakticky zcela „zticha“, u většího typu zesilovače je přeci jenom „trochu“ slyšet brum napájecího transformátoru. Tento brum však u dobré konstrukce skříně není tak velký, aby byl na závadu i při tichém poslechu. Kryt přes transformátor nás zbaví také problému, jak vzhledově pěkně vyřešit zakrytí vinutí. Sice se dají sehnat speciální ozdobné kryty, jsou však vzhledem ke složitosti a náročnosti výroby poměrně drahé (výlisek z jednoho kusu plechu - běžné osm výrobních operací).

Ve spodním krycím plechu je třeba vyvrtat větší množství větracích otvorů pod deskami s plošnými spoji zesilovačů, aby mohl vzniknout „průvan“ okolo elektronek. Aby vzduch dobře cirkuloval, musí být na spodní plech také

přípevněny „nohy“ o výšce 2,5 až 3 centimetry. Na zadní stěnu rámu je nutné vyrobit také nosný plech pro všechny konektory přívodů a vývodů.

Všechny kovové části šasi je nutné pospojovat nejen z bezpečnostních důvodů, ale také proto, že tyto části slouží zároveň jako stínění před nežádoucími rušivými napětími. Je třeba uzemnit i kostru potenciometru (kovovou), přepínače vstupů a i kovové páčky vypínače, pokud jsou připevněny pouze na dřevěném rámu, protože by jinak každý dotyk ruky způsoboval silný brum v reprodukci. Vnitřní kabely stáhneme plastovými svazovacími pásky, aby držely pěknou formu, stíněné kablíky od vstupů k potenciometru a na druhé straně kabely k síťovému vypínači připevníme samolepicími držáky na stěnu rámu. Pokud vyžadujete větší počet vstupů, je dobrou volbou

použít otočný přepínač např. P-DS4 (4x 3 polohy), který díky své stavbě umožňuje dosáhnout malé přeslechly mezi kanály. Pokud by se objevovaly „lupance“ při přepínání vstupů, lze je s úspěchem odstranit připájením rezistorů 220 kΩ na vstupní konektory mezi živý a zemnicí vodič. Odpor svede stejnosměrný náboj zdroje signálu a „lupance“ se již neobjeví. Tímto opatřením se také zamezí kapacitním vazbám mezi jednotlivými zdroji signálu, které se projevují tak, že v jedné poloze přepínače je stále slyšet slabě přeslech z druhého zdroje signálu.

Pokud zvolíte jinou stavbu skříně, mějte na paměti zejména minimální vzdálenosti mezi napájecím transformátorem a výstupními převodníky. Je třeba dodržet minimální vzdálenost 7 cm u PPP 35 a 9 cm u PPP 120 s tím, že orientace jader transformátorů musí být k sobě kolmá, aby se co nejvíce omezilo ovlivňování magnetickým polem. Tyto vzdálenosti platí pro originální trafo EXPERIENCE; pokud použijete síťové transformátory vyrobené z běžných plechů, dá se předpokládat, že tyto vzdálenosti budou muset být větší.

Provoz zesilovače a vhodné připojení reproduktorové soustavy

Zvukové kvality těchto zesilovačů jsou velmi dobré. Zejména v zapojení ve stylu „Bi-Amping“ kladou zvýšené nároky na všechny připojené komponenty a u soustav to platí ve zvláštní míře. Zvukové kvality jsou tak dobré, že můžeme vždy jednoznačně říci, co je kde špatně, protože v téměř dokonalé reprodukci každý nedostatek vynikne. Zde nás už nezajímá podíl sykavek nebo chraplavosti zvuku jako u běžných zesilovačů, protože ty se při kvalitním zdroji signálu a vhodném připojení soustav prakticky nevyskytují. Zajímá nás především přesné nastavení frekvenčního průběhu soustav, jejich dynamický rozsah a v určitých mezích impedanční průběh.

Jistě po určitých zkušenostech vyloučíte malé dvoupásmové soustavy s průměrem basového reproduktoru 13 cm. U nich je totiž již zřetelně slyšet Dopplerův jev, kdy jsou slabé středotónové signály modulovány velkou výchylkou membrány basových tónů. Vzniká tak pocit, že středotónové signály nemají potřebnou razanci ani při použití zesilovače PPP 120, u kterého jistě nelze předpokládat nedostatek výkonu. Při připojení běžného tranzistorového zesilovače tento pocit mít nebudete ani se zesilovačem s výkonem 20 W, protože přehrášle zkreslení způsobí, že se vám bude zdát množství středních kmitočtů dostatečné. Ve skutečnosti však slyšíte místo středotónových signálů větší podíl zkreslení zesilovače. Středobasový reproduktor by tedy měl mít minimální průměr 17 cm při kvalitní konstrukci s lehkou membránou a minimálními mechanickými ztrátami.

(Dokončení příště)

ELEKTRONKOVÉ ZESILOVAČE

Karel Rochelt

(Dokončení)

Pokud však chcete dosáhnout opravdu kvalitní reprodukce, musíte vždy sáhnout k větším tří nebo vícepásmovým soustavám, protože teprve ty dokáží přenést celé akustické pásmo bez větších kompromisů. To platí i pro menší poslechové místnosti. Třípásmová konstrukce soustav je pro tyto zesilovače výhodná také z toho důvodu, že se v případě zapojení výstupních převodníků ve stylu „Bi-Amping“ dostaneme k optimálnímu dělicímu kmitočtu okolo 400 Hz mezi basovou a středovýškovou větví. Tam nastává zpravidla přechod mezi indukčním a kapacitním charakterem zátěže soustav a oddělené vinutí převodníku tyto zátěže optimálně rozdělí. Navíc také třípásmové konstrukce mají v mno-

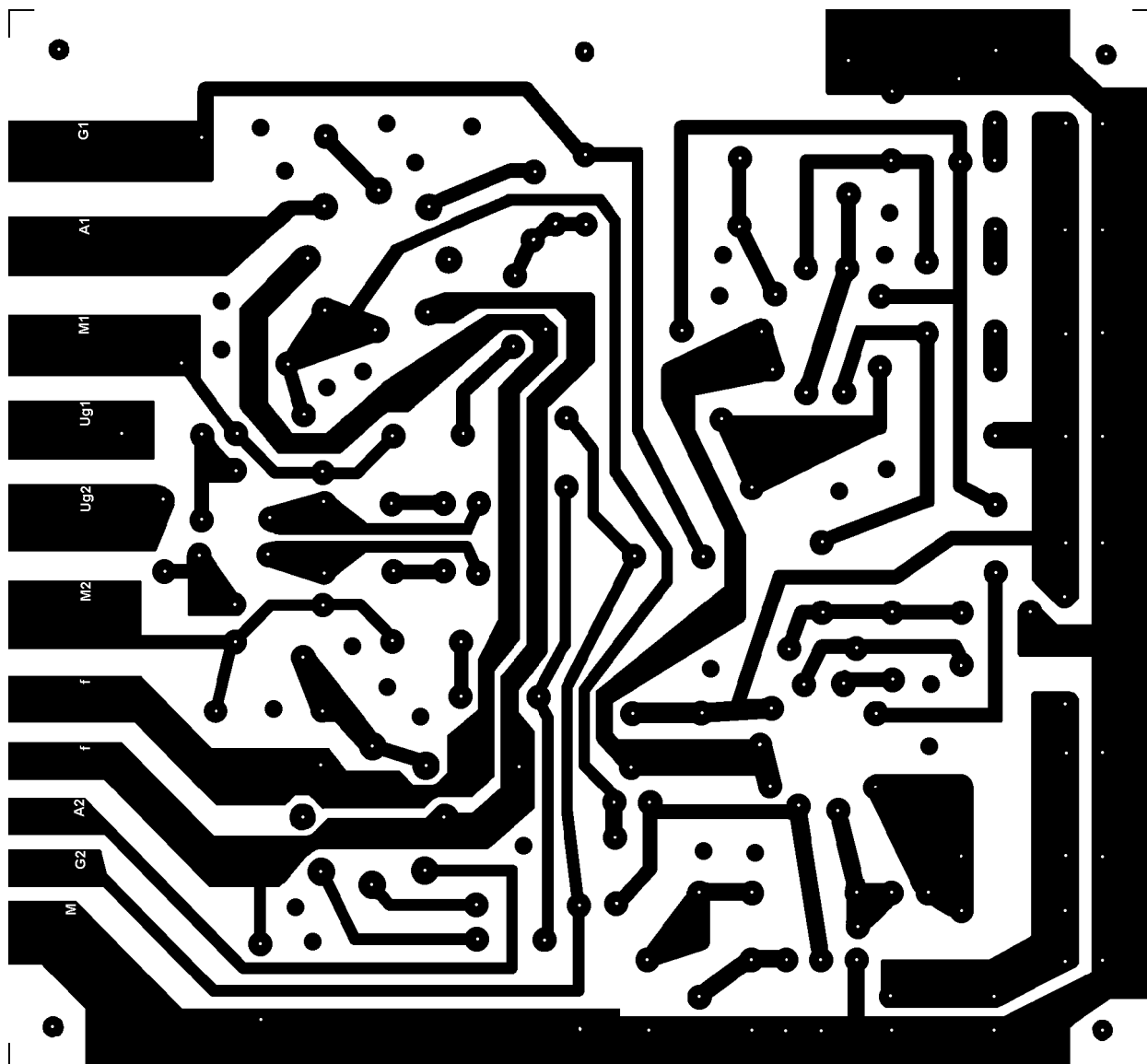
ha případech lineárnější impedanční průběh, pohybující se okolo 4 Ω , který způsobuje vliv frekvenční výhybky i při použití reproduktorů 8 Ω .

Dalším problémem je určitá snaha k „dunění“ v reprodukci. Zde je opět tento jev velmi dobře slyšet a investice do kvalitního basového reproduktoru se plně vyplatí. U většiny zesilovačů je tento jev značně maskován zkreslením zesilovače (maskování zvuku vyššími kmitočty), při takto čisté reprodukci je však vždy velmi zřejmý. Podle mých zkušeností basové soustavy s cenou pod 5000 Kč nemají v tomto ohledu příliš mnoho šancí na úspěch i při větších průměrech membrány (nad 25 cm). Např. z nabídky VISATON splňují požadavky beze zbytku v tom-

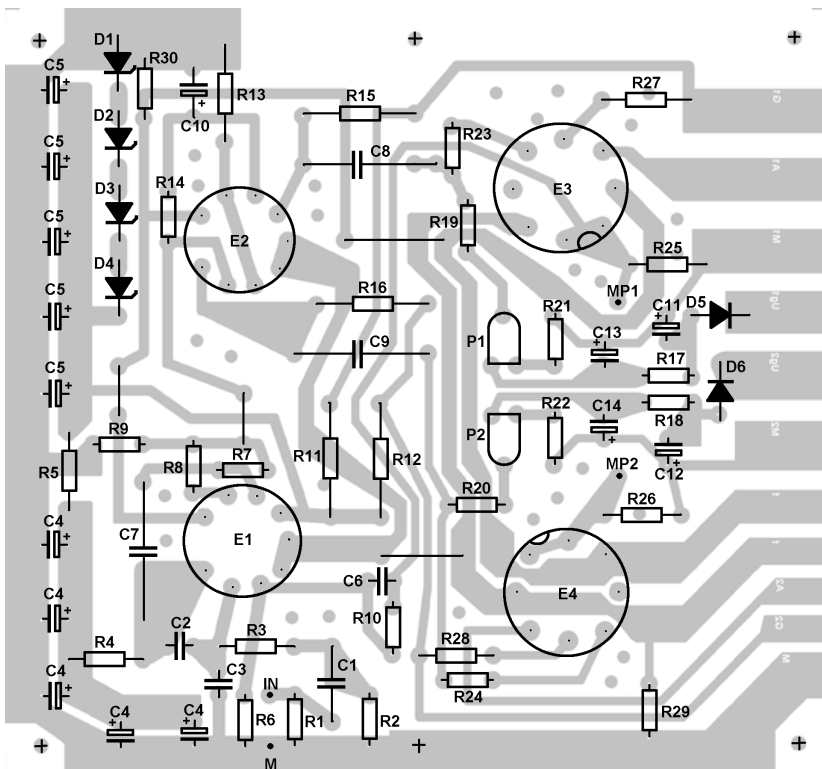
to ohledu pouze typy řady TIW (250, 360, 400), z jiných firem je to 20 cm „šasi“ AUDAX a na jiné jsem nenarazil.

Z předchozích odstavců by se mohlo zdát, že reprodukce těchto elektronkových zesilovačů je spíše utlumená ve vyšších kmitočtech, avšak není to pravda. Reprodukce je naopak velmi vyrovnaná a spíše velmi „zřetelná a razantní“ ve střední a výškové oblasti, vlivem čistoty zvuku však není únavná ani při větších poslechových hlasitostech. Proto je v tomto případě také značně výhodný velmi vyrovnaný frekvenční průběh soustav bez jemného potlačení střední oblasti a lehkého zvýraznění výškové oblasti, které má téměř veškerá masová produkce. To je spíše vhodné pro polovodičové zesilovače střední kategorie.

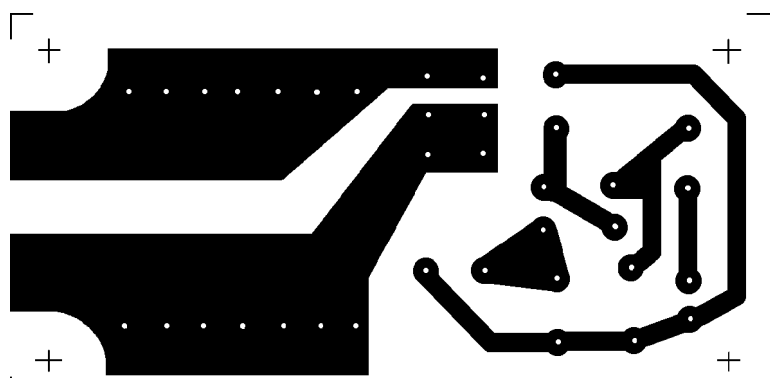
Dále bych ještě upozornil na problém při výběru vhodného přehrávače CD. Pokud chcete alespoň částečně využívat plné kvality těchto zesilovačů, nemá cenu je napájet přehrávači CD kategorie do 15 000 Kč. Ty prostě jednoznačně pokulhávají v mnoha ohledech. Ve vyšší kategorii se již najde více typů relativně dobrých přehrávačů, těžko se však hledají. V testech



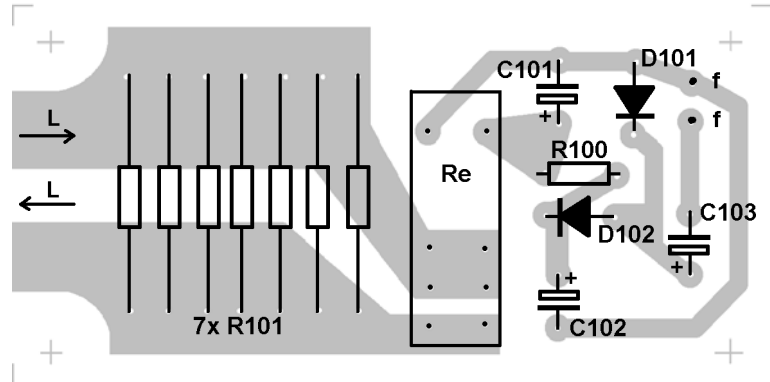
Obr. 12a. Deska s plošnými spoji zesilovače PPP 35 (163 x 152 mm)



Obr. 12b. Rozmístění součástek zesilovače PPP 35



Obr. 13a. Deska s plošnými spoji - pomalý rozběh (100 x 50 mm)



Obr. 13b. Rozmístění součástek - pomalý rozběh



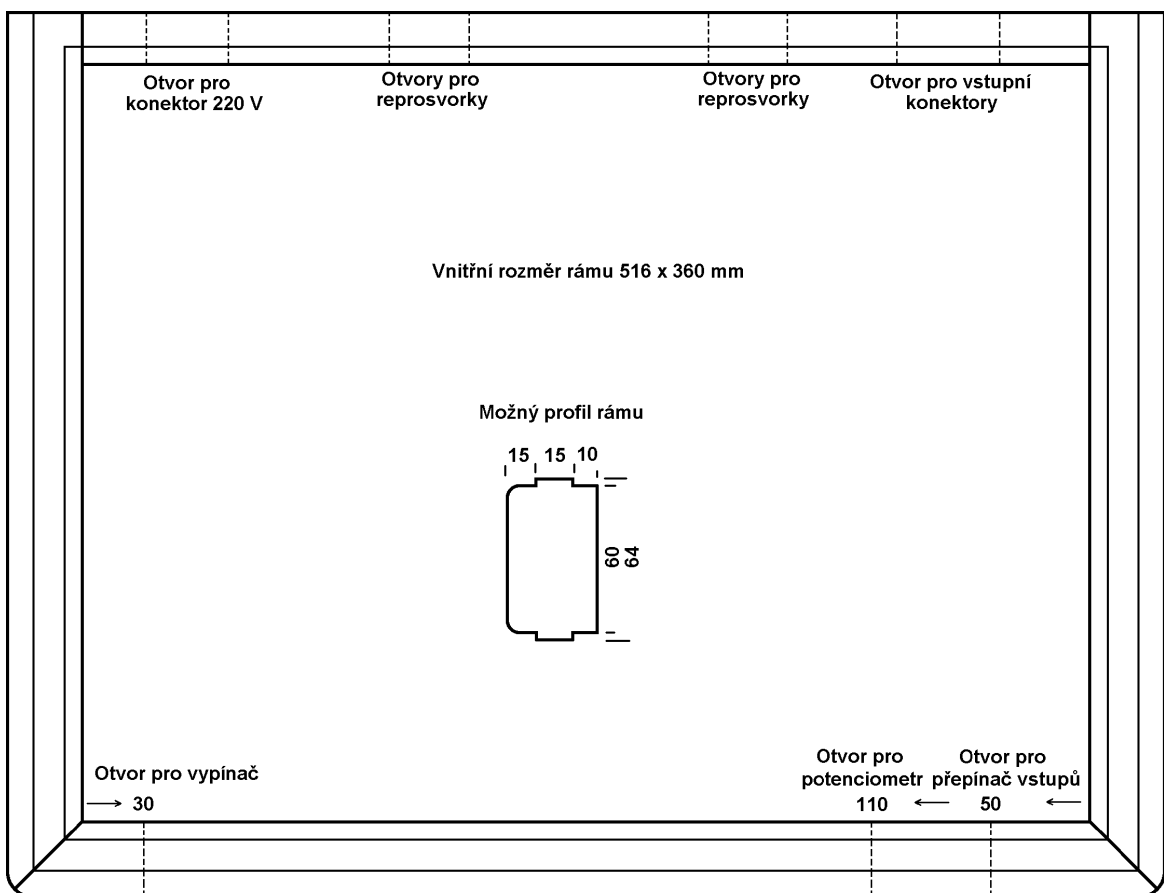
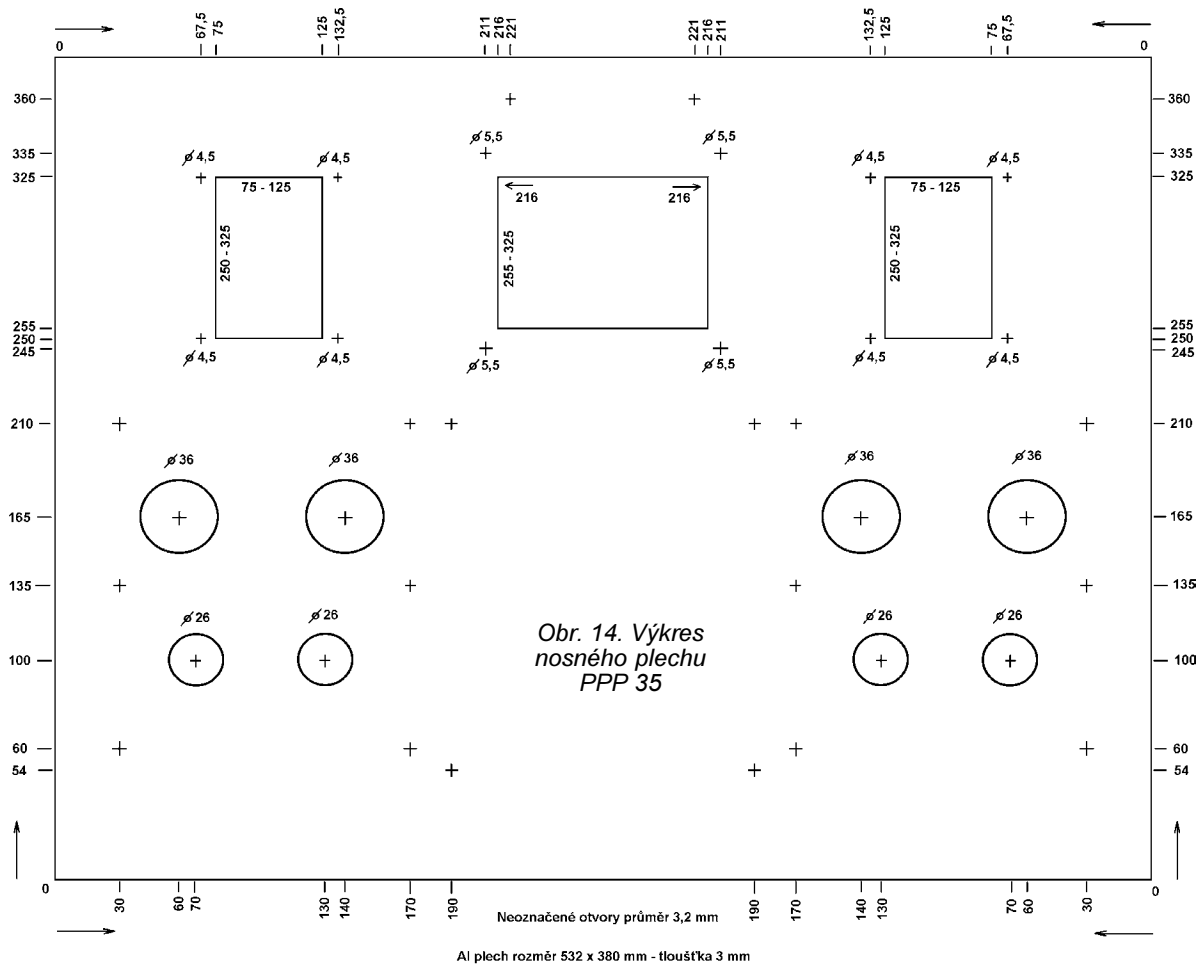
našich časopisů zabývajících se posuzováním audiokomponentů často testující preferují přehrávače CD s „jasnějším“ zvukem ve vyšších oblastech spektra. To se může někomu líbit na běžné aparatuře a považovat to i za přednost. Bohužel při připojení k takto kvalitním zesilovačům vyjde v mnoha případech pouze najevo, že tento jasnější zvuk je způsoben hlavně zkreslením přehrávače.

Při výběru bych se tedy spíše zaměřil na CD, které jsou hodnoceny v tomto směru jako s méně „jasným“ zvukem. To je příklad přehrávačů CD ROTEL 990, 991 a 970. Ty byly přijaty kritiky poměrně vlažně, má osobní zkušenost s nimi je v daných kategoriích naopak velmi příznivá ve srovnání s podobnou konkurencí. Vhodným partnerem těchto zesilovačů jsou však spíše přehrávače jako SONY ESPRIT řady 5 a 7, ACCUPHASE nebo MARRANTZ CD-14 a celá řada jiných z kategorie nad 40 000 Kč.

V neposlední řadě bych i upozornil na vhodné akustické podmínky poslouchového prostoru, protože z vlastní zkušenosti vím, že se stále řada zájemců o tuto techniku domnívá, že pokud umístí aparaturu za milion korun do místnosti s dlažbou nebo parketami na podlaze, tak to bude hrát vždycky. Naopak, v tomto směru vhodně ztlumená místnost např. i koberec nebo gobelíny na stěnách dokáže udělat pro zvuk více, než přehnaná investice do aparatury.

Použitá literatura

- [1] Haas, G: High-End mit Röhren.
- [2] Rainer zur Linde: Verstärker in Röhrentechnik.
- [3] Klang+Ton 4-5/92: Röhren-Endstufe Dream.
- [4] Klang+Ton 3/91: EXPERIENCE PPP 100.
- [5] Klang+Ton 1/94: CD-Röhren-Filter.
- [6] Klang+Ton 4/94: Einstiegsdroge.
- [7] Klang+Ton 6/94: Die kleine PPP-Endstufe.
- [8] Klang+Ton 2/96: Triode pur: Röhrenendstufe Live Sound Chopin.
- [9] Klang+Ton 6/95: Eintakt-A-Endstufe mit KT 88 EXPERIENCE.
- [10] Klang+Ton 1-3/97: Modularer Vorverstärker.
- [11] Klang+Ton 2/93: Röhren-Endstufe von Claus Knipschild.
- [12] Technická dokumentace zesilovače EDGAR.



Obr. 15. Výkres rámu zesilovače PPP 35

Informace a prodej převodníků EXPERIENCE:
Karel Rochelt, ROCHELT s. r. o., Příčná 647,
353 01 Mariánské Lázně. Tel: 0165/622 688