

# Modul koncového nf zesilovače 200 W

Ing. Jiří Štefan

V článku je popsána konstrukce jednoduchého univerzálního modulu výkonového zesilovače, vhodného pro domácí zvukové aparatury a zesilovače zvuku, určené pro hudebníky.

## Základní vlastnosti

Výstupní výkon (do zátěže 4  $\Omega$ ):

200 W.

Kmitočtový rozsah (výst. výkon –10 dB, měřeno bez vstupního filtru):

0 Hz až 100 kHz.

Odstup rušivých napětí (měřeno lineárně v pásmu 10 Hz až 3 MHz, vstup nakrátko):

>80 dB.

Vstupní citlivost ( $U_{ef}$ ;  $f = 1$  kHz):

0,7 V.

Rozměry:

116 × 132 × 42 mm.

Hmotnost:

275 g.

## Úvod

Na stránkách nejen tohoto časopisu již bylo popsáno obrovské množství nejrůznějších konstrukcí nf zesilovačů, takže by se mohlo zdát, že každý další příspěvek na toto téma, pokud nepřijde s nějakou revoluční myšlenkou, je jen dalším nošením dříví do velkého lesa. Protože se problematikou nízkofrekvenčních zesilovačů výkonu zabývám již řadu let, pokusil jsem se o pohled z trochu jiného úhlu. Jde o konstrukci, která neobsahuje žádné záludnosti a přitom vychází ze snadno dosažitelné součástkové základny.

Popis konstrukce je poněkud širší, aby umožnil pokročilejšímu amatéru samostatně určit případnou náhradu použitých součástek a aby při ožívání byla možnost zničení nějaké součástky omezena na co nejmenší míru.

Konstrukce vychází ze zkušeností, získaných při ozvučování velkého množství nejrůznějších akcí, zejména veřejných vystoupení kapel, hrajících hudbu, uhlazeně řečeno, „založenou na elektrickém zesilování veškerých zvuků“. Kdo se touto činností někdy vážněji zabýval, tak jistě připustí, že existují rozdíly v kvalitě přenosu nízkých kmitočtů v závislosti na typech používaných koncových zesilovačů. Sám jsem byl zarputilým odpůrcem tohoto subjektivního hodnocení a horlivě prosazoval názor „měřit znamená vědět“ – tedy, nebude-li rozdílů v kmitočtových charakteristikách zesilovačů, změřených v laboratorních podmínkách, potom je každé tvrzení typu „tento zesilovač hraje basy a tento ne“ značně pochybené a možná slouží i k tomu, aby si skupina hodnotitelů – v drtivé většině hudebníků – mohla kompenzovat své nedostatky v technické odbornosti; lidově řečeno „mluvit zvukařům do řemesla“. (O příčinách a důsledcích zkreslení signálu nazývaných SID a TIM byla před několika lety napsána řada podrobných článků a mnozí si na jejich základě opravili

třeba svůj názor na to, jaký je TEXAN skvělý zesilovač. V případě přenosu kmitočtů v pásmu zhruba 40 až 250 Hz se však zjevně jedná o jinou problematiku.) Postupem času a pod vlivem řady nabytých zkušeností s množstvím různých koncových zesilovačů jsem byl nucen sám sobě připustit, že „něco“ na tvrzení druhé skupiny skutečně je. Ovšem při hledání odpovědi na otázku „co“ nedávalo měření kmitočtové charakteristiky zesilovače sinusovým signálem nebo hodnocení s použitím obdélníkových signálů [1] žádné rozhodující poznatky. Postupně byl vyloučen např. i vliv vazebních či filtračních kapacit.

Proto jsem si rozdělil zesilovače (amatérské i profesionální, ale osazené výhradně bipolárními tranzistory) do dvou skupin. Z první, jakostnější skupiny, uvádím např. zesilovače firmy AC-ES 2 × 300 W a amatérský výrobek zn. EXALL; ze druhé, poněkud horší ve zmíněné oblasti zvukového spektra, typ DYNACORD BS 412 a domácí konstrukci PHINSON. Při porovnávání schémat zapojení obvodových řešení jsem hledal společné znaky. Jeden z nich se zdál být typický – skoro na 100 % rozlišoval tyto dvě skupiny: přístroje první – kvalitnější skupiny měly výstupní obvody navrženy a spočítány s velmi značnou proudovou rezervou. V klasickém blokovém schématu koncového zesilovače, skládajícího se z budiče a výkonového stupně, byl jako by přidán jeden pár emitorových sledovačů, komplementárních či stejné vodivosti, ve výkonovém stupni. Zesilovače druhé skupiny počítaly s daleko menší proudovou rezervou, řádově asi desetinásobnou. Toto obvodové řešení bylo zkušebně uplatněno u dále popisovaného zesilovače a výsledky poslechových testů při různých aplikacích potvrdily správnost tohoto poznatku. Na základě subjektivních poslechových testů byl zařazen do první skupiny, reprodukcující „měkké“ či „sametové“ basy. Upozorňuji, že charakter tohoto přenosu lze jen zčásti simulovat např. nastavením vícepásmových korektorů, což by se na první pohled mohlo zdát jako jednoduché a dostatečné řešení. A pro pochybující nabízím jediné – zkuste si tento jev sami ověřit. Teoretické zdůvodnění by se jistě našlo, jeho hledání však už přesahuje rámec tohoto článku.

## Návrh zapojení

Vycházel jsem z tohoto pořadí základních požadavků:

## VYBRALI JSME NA



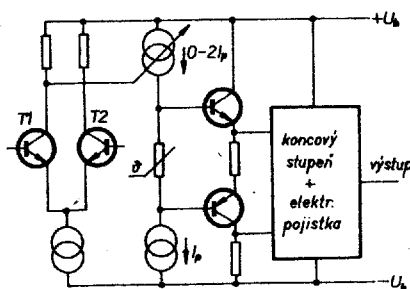
## OBÁLKU

- 1) „měkký“ přenos signálů nízkých kmitočtů;
- 2) výkon 200 W na zátěži 4  $\Omega$  a dimenzování součástek takové, aby se výkon mohl zvýšit můstkovým zapojením modulu;
- 3) použití tuzemských součástek i za cenu jejich výběru pro klíčová místa;
- 4) co možná největší rychlost přeběhu (SR) zesilovače při vybuzení na plný výkon;
- 5) jednoduchost konstrukčního provedení, minimalizace rozměrů, omezení drátových spojů na minimum;
- 6) dobře pracující zkratová pojistka.

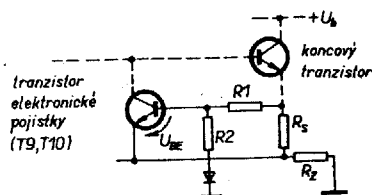
Pro požadovaný výkon 200 W na zátěži 4  $\Omega$  je maximální hodnota st napětí na zátěži 41 V. Připočítáme-li k tomu saturační napětí koncových tranzistorů, přibližné úbytky na jejich emitorových odporech a hlavně pokles napájecího napětí použitého nestabilizovaného zdroje, vychází napájecí napětí  $\pm 53$  V, měřeno při provozu naprázdno. Při použití čs. součástek jsou dvě možnosti, jak řešit koncový stupeň:

- a) kvazikomplementární zapojení s paralelním řazením koncových tranzistorů,
- b) kaskádní řazení paralelně zapojených komplementárních koncových tranzistorů.

Zvolil jsem variantu a), pro níž je větší výběr vhodných tranzistorů – např. KD3442, KD3773, KD4348. Máme-li možnost vybírat z většího množství tranzistorů a hlavně měřit jejich odolnost vůči druhému průřezu, vyhoví i některé starší typy, jako KD503. Paralelní řazení koncových tranzistorů je v zahraničí hodně využíváno zejména pro větší spolehlivost a větší linearitu, neboť při proudtech kolem osmi ampérů, tekoucích přes jeden tranzistor, se jeho stejnosměrný zesilovací činitel zmenší u uvažovaných typů zhruba na polovinu. Oproti variantě b) se také více využívá napájecí napětí. Výkon 200 W pro danou zátěž je asi hranice, do níž je s naší součástkovou základnou výhodnější konstrukční varianta a). Pro větší výkony již výhody varianty b) převažují a zájemce odkazují např. na podrobně zpracovaný starší stavební návod ve [2] nebo na Konstrukční přílohu AR [3].



Obr. 1. Blokové schéma zesilovače



Obr. 2. Principiální schéma elektronické pojistky

Dokonce i kvazikomplementární kaskáda je v ní koncovém zesilovači realizovatelná [4].

Blokové schéma zesilovače je na obr. 1. Tranzistory T1 a T2 tvoří vstupní diferenciální zesilovač, napájený ze zdroje konstantního proudu. Za ním je stupeň, tvořený řízeným zdrojem proudu, zapojeným v sérii se zdrojem konstantního proudu. Tento stupeň má vel-

ké napěťové zesílení a umožňuje proto zavést silnou zápornou zpětnou vazbu. Protože je napěťové zesílení soustředěno do malého počtu stupňů, zajistí se snáze stabilita celého zesilovače, neboť nedochází k tak velkému fázovému posuvu v závislosti na kmitočtu. Proudové zdroje také zmenšují citlivost na změny napájecího napětí. S výhodou využijeme výstupních charakteristik, typických pro proudové zdroje, při návrhu elektronické pojistky. Jak je patrné ze schématu, „spodní“ zdroj konstantního proudu je nastaven na proud  $I_p$  a horní je říditelný v rozsahu 0 až  $2 I_p$ . Tento zdroj je realizován kaskádním zapojením dvou tranzistorů, které dosahují velké rychlosti přeběhu především vyloučením Milleroва jevu (viz základní zapojení tranzistoru – zapojení SB). Při měření samotného budiče, nezátíženého koncovým stupněm, jsem změnil rychlost přeběhu  $SR=70 \text{ V}/\mu\text{s}$  při vybuzení na  $U_{mv}=\pm 40 \text{ V}$ . Vyloučení Milleroва jevu je také důležité pro zmenšení zkreslení, vyplývajícího z nelineární kapacity přechodu kolektor – báze. Tato nelinearita se uplatňuje u stupňů, pracujících s velkým rozkmitem výstupního signálu (to je právě případ napěťového budiče stupně). Zapojení tranzistoru se společnouází je výhodné při používání vyšších napájecích napětí (viz rozdíl mezi údaji  $U_{ceo}$  a  $U_{cer}$ ). Na tento obvod, určující minimální napěťový roz-

kmit zesilovače, navazuje dvojice komplementárních tranzistorů, budící koncové stupně z tranzistorů stejné vodivosti.

SNIMACI ODPOR= 0.1  
ZATEZ= 4  
R1= 100  
R2= 2200  
UYKON NA ZATEZI 100

Uyst.U 0  
UHEL OTEURENI 0  
UYSTUPNI NAPETI 0  
NAPETI Ube= 3.043478261E-02

Uyst.U 7.320508076  
UHEL OTEURENI 15  
UYSTUPNI NAPETI 7.320508076  
NAPETI Ube=-0.112792549

Uyst.U 14.14213563  
UHEL OTEURENI 30  
UYSTUPNI NAPETI 14.14213563  
NAPETI Ube=-0.24625918

Uyst.U 20  
UHEL OTEURENI 45  
UYSTUPNI NAPETI 20  
NAPETI Ube=-0.36086957

Uyst.U 24.49489743  
UHEL OTEURENI 60  
UYSTUPNI NAPETI 24.49489743  
NAPETI Ube=-0.44881321

Uyst.U 27.32050808  
UHEL OTEURENI 75  
UYSTUPNI NAPETI 27.32050808  
NAPETI Ube=-0.5040969

Uyst.U 28.28427125  
UHEL OTEURENI 90  
UYSTUPNI NAPETI 28.28427125  
NAPETI Ube=-0.52295313

SNIMACI ODPOR= 0.12  
ZATEZ= 4  
R1= 100  
R2= 2200  
UYKON NA ZATEZI 100

Uyst.U 0  
UHEL OTEURENI 0  
UYSTUPNI NAPETI 0  
NAPETI Ube= 3.043478261E-02

Uyst.U 7.320508076  
UHEL OTEURENI 15  
UYSTUPNI NAPETI 7.320508076  
NAPETI Ube=-0.077781424

Uyst.U 14.14213563  
UHEL OTEURENI 30  
UYSTUPNI NAPETI 14.14213563  
NAPETI Ube=-0.17862287

Uyst.U 20  
UHEL OTEURENI 45  
UYSTUPNI NAPETI 20  
NAPETI Ube=-0.26521739

Uyst.U 24.49489743  
UHEL OTEURENI 60  
UYSTUPNI NAPETI 24.49489743  
NAPETI Ube=-0.3316637

Uyst.U 27.32050808  
UHEL OTEURENI 75  
UYSTUPNI NAPETI 27.32050808  
NAPETI Ube=-0.3734336

Uyst.U 28.28427125  
UHEL OTEURENI 90  
UYSTUPNI NAPETI 28.28427125  
NAPETI Ube=-0.38768053

SNIMACI ODPOR= 0.35  
ZATEZ= 4  
R1= 100  
R2= 2200  
UYKON NA ZATEZI 100

Uyst.U 0  
UHEL OTEURENI 0  
UYSTUPNI NAPETI 0  
NAPETI Ube= 3.043478261E-02  
Uyst.U 7.320508076  
UHEL OTEURENI 15  
UYSTUPNI NAPETI 7.320508076  
NAPETI Ube= 0.32484652  
Uyst.U 14.14213563  
UHEL OTEURENI 30  
UYSTUPNI NAPETI 14.14213563  
NAPETI Ube= 0.59919459  
Uyst.U 20

UHEL OTEURENI 45  
UYSTUPNI NAPETI 20  
NAPETI Ube= 0.83478261  
Uyst.U 24.49489743  
UHEL OTEURENI 60  
UYSTUPNI NAPETI 24.49489743  
NAPETI Ube= 1.01555566  
Uyst.U 27.32050808  
UHEL OTEURENI 75  
UYSTUPNI NAPETI 27.32050808  
NAPETI Ube= 1.12919435  
Uyst.U 28.28427125  
UHEL OTEURENI 90  
UYSTUPNI NAPETI 28.28427125  
NAPETI Ube= 1.16795439

SNIMACI ODPOR= 0.5  
ZATEZ= 4  
R1= 100  
R2= 2200  
UYKON NA ZATEZI 100

Uyst.U 0  
UHEL OTEURENI 0  
UYSTUPNI NAPETI 0  
NAPETI Ube= 3.043478261E-02

Uyst.U 7.320508076  
UHEL OTEURENI 15  
UYSTUPNI NAPETI 7.320508076  
NAPETI Ube= 0.587429962

Uyst.U 14.14213563  
UHEL OTEURENI 30  
UYSTUPNI NAPETI 14.14213563  
NAPETI Ube= 1.10646684

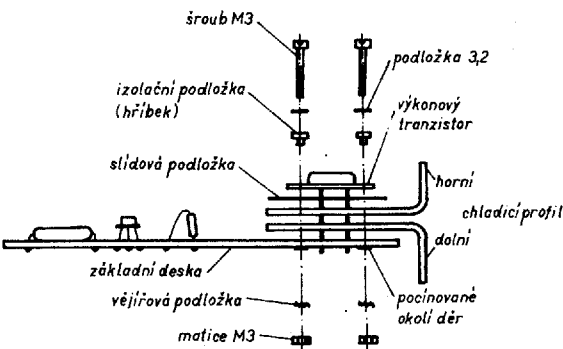
Uyst.U 20  
UHEL OTEURENI 45  
UYSTUPNI NAPETI 20  
NAPETI Ube= 1.55217391

Uyst.U 24.49489743  
UHEL OTEURENI 60  
UYSTUPNI NAPETI 24.49489743  
NAPETI Ube= 1.89417698

Uyst.U 27.32050808  
UHEL OTEURENI 75  
UYSTUPNI NAPETI 27.32050808  
NAPETI Ube= 2.10916909

Uyst.U 28.28427125  
UHEL OTEURENI 90  
UYSTUPNI NAPETI 28.28427125  
NAPETI Ube= 2.1824989

Obr. 3. Výpisy z tiskárny počítače – příklad výpočtu



Obr. 4. Montáž výkonových tranzistorů

Koncový stupeň pracuje v Darlingtonově zapojení, přičemž první tranzistor budí dvojici paralelně zapojených koncových tranzistorů. Rezistory s malým odporem, zapojené u emitorů koncových tranzistorů, zajišťují mj. rovnoměrné rozdělení signálu na oba koncové tranzistory.

Kmitočtová stabilita zesilovače je zajištěna těmito prvky:

- tlumicí Boucherotův člen na výstupu zesilovače (R26 a C10),
- kmitočtová kompenzace v obvodu vstupního diferenciálního zesilovače (R29 a C19),
- kompenzace v tzv. „malé smyčce“ (C5),
- celková kmitočtová kompenzace zesilovače (C11).

Při použití uvedených součástek přenese samotný koncový stupeň pásmo 10 Hz až 100 kHz (při vybuzení -10 dB pod jmenovitou úroveň, toleranční pole 3 dB). Na první pohled by se tak široké přenášené pásmo zdálo zbytečně široké, ale čím je horní kmitočet přenášeného pásma vyšší, tím se zlepšuje přenos přechodových jevů a tedy i omezuje možnost vzniku zkreslení TIM. Pokud by se na vstup zesilovače s takto vysokým mezním kmitočtem dostal silný dělčivý signál (např. nosný kmitočet

středovlnné rozhlasové stanice nebo signál hudebního nástroje, pracujícího na principu kmitočtové syntézy), mohly by být zničeny koncové tranzistory nebo vysokotónové reproduktory soustavy. Z tohoto důvodu je na vstupu zesilovače zapojen vf filtr (R1, R2 a C1) s mezním kmitočtem asi 40 kHz.

Zesílení zesilovače v pracovní oblasti je dáno poměrem rezistorů R24 a R25, v našem případě je 40 (32 dB).

Elektronická pojistka (obr. 2) má charakteristiku „Z“. Znamená to, že při zkratu na výstupu zesilovače je výstupní proud menší než při zátěži 4Ω. Je to tím, že na bázi tranzistoru elektronické pojistky se sečítají dvě napětí – první je vytvořeno výstupním proudem, protékajícím přes snímací odpor, a druhé

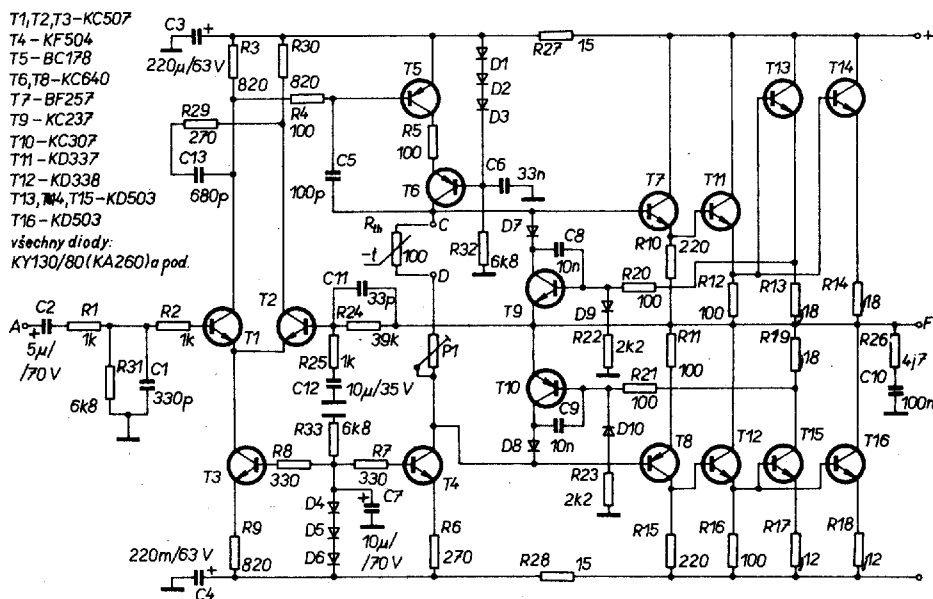
výstupním napětím, zmenšeným v odporovém děliči. Tato dvě napětí se odčítají. Průběh výsledného napětí je možno jednoduše simulovat na počítači (viz dodatek). Příklady výpočtů jsou na obr. 3.

Teplotní kompenzaci celého zesilovače zajišťuje termistor, zapojený v obvodu budiče a zašroubovaný do chladičského profilu. Uvedený typ s odporem 100 Ω (při 20 °C) vyhovuje pro rozsah provozních teplot 20 až 80 °C.

#### Elektronická pojistka

Snažil jsem se o co nejjednodušší konstrukci s minimálními rozměry celého modulu, zapojeného na jedné desce s plošnými spoji. Do ní jsou zapojeny i vývody výkonových tranzistorů, připevněných přes dvojlinný chladič hliníkový profil. Pod pouzdra výkonových tranzistorů je nutno před montáží vložit izolační slidové podložky, dobře potřebné silikonovou vazelínou. Při montáži je rovněž nutno použít izolační tvarové pertinaxové podložky (tzv. „hříbečky“), v nouzi vystačíme i s plochými podložkami, kombinovanými s izolační „bužirkou“. Montáž je znázorněna na obr. 4. Je samozřejmé, že i při zkoušení musíme zajistit dostatečný odvod tepla z celého profilu upevněním na patřičně dimenzovaný chladič. V běžném provozu, kdy zesilovač zpracovává hudební signál, vystačíme i s menšími chladiči (případně kombinovanými s nuceným chlazením), než při měření maximálního výkonu pomocí sinusového signálu. Je spočítáno, že nejpříznivější režim pro zesilovač nastává při vybuzení pod hranici jmenovitého výkonu, přesně na  $(2/\sqrt{2}) P_{\max}$ , tj. asi  $0,8 P_{\max}$ .

Rozložení součástek je dobře patrné obr. 5.



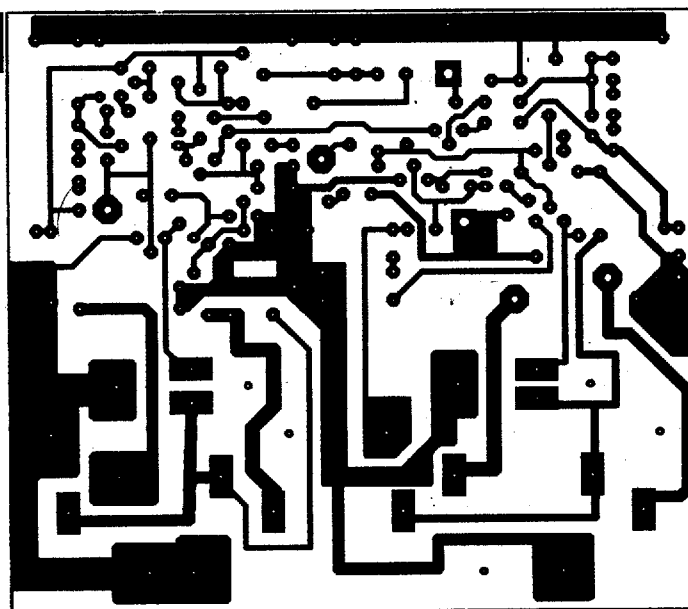
Obr. 6. Celkové schéma zesilovače

Osvědčená metoda je postupně oživovat zařízení po částech. Osadíme nejprve část desky – tranzistory T1 až T6 se všemi součástkami, zabezpečujícími jejich funkci. Na celkovém schématu (obr. 6) to vypadá tak, že obvody, ležící napravo od D7 a D8, nejsou zapojeny. Poté propojíme bod C (nebo D) s výstupem zesilovače F. Takto propojený modul připojíme na symetrický napájecí zdroj s elektronickou pojistkou, v nouzi na jakýkoliv značně „měkký“ zdroj, realizovaný např. oblíbeným rozptylovým transformátorem 24 V/2 VA. Takový zdroj nám zaručí, že případnou závadu zjistíme voltmetrem a ne zpozorováním dýmových či plamenných efektů. Není-li nikde závada, naměříme na výstupu zesilovače nulové napětí (max. 0,1 V). Pootáčením běžce trimru P1 lze nastavit napětí mezi kolektory tranzistorů T4 a T6 zhruba na 1,6 V. Je-li vše v pořádku, můžeme zapojit obvody tranzistorů T7, T8, rezistory R10, R11, R15, zrušit spoj bodů C–F a znovu opakovat měření. Výstupní napětí musí být zhruba stejné a trimrem P1 tentokrát nastavíme napěťový úbytek na rezistoru R10 (nebo R15) na 0,5 V. Až pak zapojíme zbývající součástky.

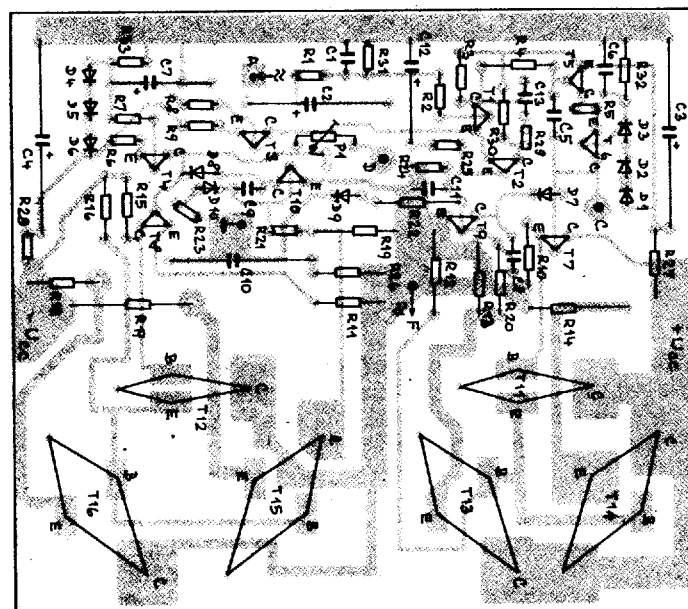
Při měření a montáži zesilovače je samozřejmě nutné dodržovat zásady zemnění – zvolit hlavní zemnicí bod celého zařízení (obvykle kontakt filtračního kondenzátoru) a k němu vést patřičně dimenzovanými vodiči samostatně všechna uzemnění; uzemnit vstup zesilovače a vyhnout se zemnicím smyčkám. Má-li zesilovač přesto sklony k nestabilitě, lze zvětšit kapacitu kondenzátoru C18 kmitočtové kompenzace.

#### Literatura

- 1] Endstufentest. Fachblatt 8/1977, s. 18 až 25.
- 2] Tigrisaurus, Radio – Electronics, prosinec 1973, s. 43 až 46.
- 3] Dudek, P.: Kvalitní reprodukce v automobilu. Příloha AR, červenec 1990, s. 14 až 20.
- 4] Čs. autorské osvědčení č. 253 503 a PV 17 973.



120 F.MRAVENC 3.20



Obr. 7. Deska s plošnými spoji a rozložení součástek

Seznam součástek						
Rezistory		R19	2,2 kΩ	C10	100 pF	
R1	1 kΩ	R24	30 kΩ	C11	33 pF	
R2	1 kΩ	R25	1 kΩ	C12	10 μF 25 V	
R3	500 Ω	R26	4,7 Ω, TR 102	C13	680 pF	
R4	100 Ω	R27	15 Ω	Třídílné součástky		
R5	100 Ω	R28	15 Ω	Tranzistory		
R6	270 Ω	R29	270 Ω	T1, T2, T3	KC502	
R7	330 Ω	R30	320 Ω	T4	KC504	
R8	330 Ω	R31	30 kΩ	T5	BC178	
R9	320 Ω	R32	0,5 kΩ, TR 102	T6, T8	KC540	
R10	220 Ω	R33	0,5 kΩ, TR 100	T7	BF257	
R11	100 Ω	Mali rezistory vždy odporovým dráham 2,3 Ω/ks				
R12	100 Ω	Kondenzátory				
R13	0,18 Ω	C1	500 pF	T8	KC207	
R14	0,18 Ω	C2	2,2 μF 5 V	T10	KC507	
R15	220 Ω	C3	220 μF 25 V, TP 011	T11	KC507	
R16	10 kΩ	C4	220 nF 25 V, TP 011	T12	FD303	
R17	0,12 Ω	C5	100 pF	T13, T14	KC502	
R18	0,18 Ω	C6	33 pF	T15, T16		
R19	0,18 Ω	C7	10 μF 25 V	Diody		
R20	150 Ω	C8	10 pF	pau. polarity univerzální typy, např. KC135B, KA205 apod.		
R21	100 Ω	C9	10 pF			
R22	2,2 kΩ					