

Výkonový zesilovač 2x 350 W

Karel Bartoň

VYBRALI JSME NA
OBÁLKU



Na dalších řádcích je popsán modul koncového stupně výkonového zesilovače 2x 350 W. Popis se týká pro zjednodušení pouze jednoho kanálu, druhý kanál je naprosto identický. Rovněž nejsou popsány další pomocné obvody jako je indikátor vybuzení, indikátor špiček, obvody ochrany a napájecí zdroj – ten je řešen jako spínaný a může být v případě zájmu spolu s těmito obvody uveřejněn dodatečně.

Zesilovač byl navržen s cílem dosáhnout co nejlepších kvalitativních parametrů třídy High-End při současném zachování požadavku na co největší provozní spolehlivost. Tento cíl se podařilo beze zbytku splnit, o čemž svědčí již delší dobu několik precizně a naprosto bez závad fungujících prototypů popsaného koncového stupně.

Mezi hlavní přednosti popisovaného výkonového zesilovače patří:

- parametry splňují nároky na zesilovače třídy HIGH-END,
- spolehlivost,
- konstrukce z běžně dostupných součástek,
- poměrně nízká pořizovací cena,
- ověřená snadná reprodukovatelnost,
- jednoduchá, nenáročná mechanická konstrukce.

Technické údaje

Výstupní výkon: 350 W/4 Ω (RMS).

Kmitočtový rozsah: 2 Hz až 350 kHz/± 1 dB.

Harmonické zkreslení (THD): <0,05 %/20 Hz až 20 kHz.

Odstup signál / šum: >110 dB/20 Hz až 20 kHz.

Činitel tlumení: >400/1 kHz.

Rychlost přeběhu (SR): 200 V/μs.

Náběžná hrana: <500 ns.

Max. výstupní proud: >150 A.

Blokové schéma

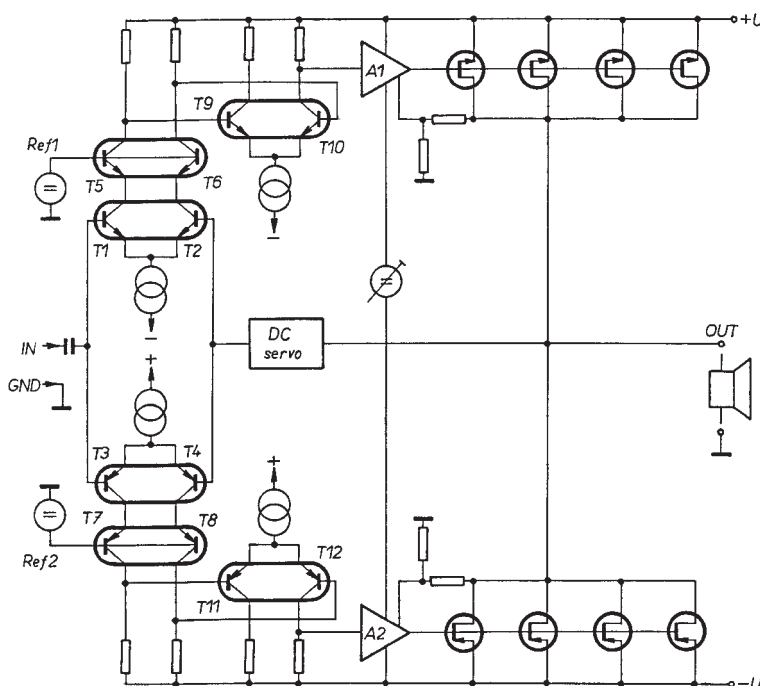
Z blokového schématu na obr. 1 je dobře patrna celková koncepce přístroje: plně symetrické zapojení se vstupním zesilovačem v kombinovaném diferenčním zapojení s tranzistory T1 až T4, rozšířeném kaskádovým stupněm s tranzistory T5, T6 a T7, T8. Dále následuje oddělovací diferenční zesilovač T9 až T12 a rozkmitový stupeň A1, A2, do kterého je zavedena místní zpětná vazba z výstupu. Vlastní výkonová část je řešena komplementárními tranzistory typu HEXFET v paralelním zapojení se čtyřmi tranzistory v každé větvi, což umožňuje dodat do zátěže proud větší než 150 A. Takto poněkud předimenzovaný stupeň zaručuje spolehlivost v náročných provozních podmínkách. DC servo s operačním zesilovačem

zajišťuje za všech okolností nulovou úroveň stejnosměrného napětí na výstupu.

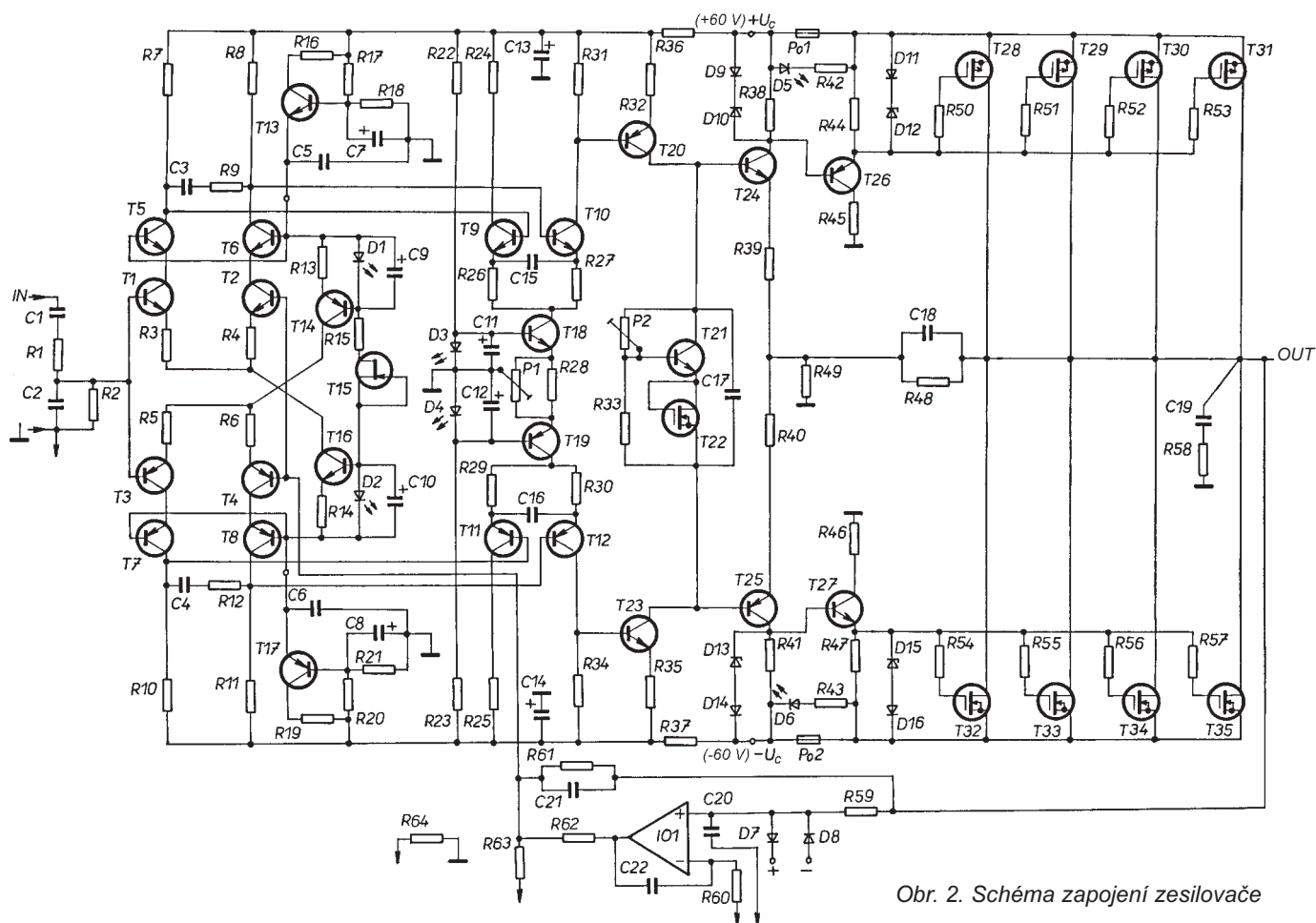
Popis zapojení

Schéma zapojení zesilovače je na obr. 2. Na vstupu je zapojen filtr R1C2, který zabraňuje vniku nežádoucích vysokofrekvenčních signálů (naindukovaných do přívodních vodičů – zvláště při větších délkách – vlivem nedokonalého stínění) do dalších obvodů zesilovače, v nichž by mohly být na polovodičových přechodech detekovány. Velikost odporu R1 a kapacity kondenzátoru C2 je tedy určen horní mezní kmitočet zesilovače. Kondenzátor C1 odděluje od vstupního užitečného signálu případnou stejnosměrnou složku, která se může objevit spolu se signálem na výstupu předchozího zařízení – nf předzesilovače, ekvalizéru, mixážního pultu. Tato stejnosměrná složka musí být oddělena, neboť zesilovač je stejnosměrně vázaný a na výstupu koncového stupně by způsobila chy-

bové stejnosměrné napětí. Dále následuje vstupní zesilovač v kombinovaném diferenčním dvojčinném zapojení, tvořený tranzistory T1 až T4. Výhodou tohoto způsobu zapojení je vynikající linearita v širokém rozsahu dynamiky zpracovávaného signálu. Emitory tranzistorů v diferenčním zesilovači jsou napájeny ze zdrojů konstantního proudu s tranzistory T14 a T16. Jako zdroj referenčního napětí slouží na rozdíl od obvykle používaných Zenerových diod, které se vyznačují poměrně velkým šumem, červené diody LED. Ty tyto nečnosti nemají a jejich použití přináší navíc teplotní kompenzaci obvodu, protože teplotní součinitel napětí přechodu je u nich opačný než u přechodu b-e křemíkového tranzistoru. Proud diodami při případných změnách napětí zdroje stabilizuje FET T15. Sériové články RC C3, R9 a C4, R12 zajišťují kmitočtovou kompenzaci. Z kolektorových rezistorů R7, R8 a R10, R11 tranzistorů T5 až T8 jsou snímána signálová napětí s opačnou fází pro řízení dalších diferenčních stupňů tvořených dvojicemi tranzistorů T9, T10 a T11, T12. Ty jsou rovněž napájeny, tak jako v předchozím případě, ze stejné zapojených zdrojů konstantního proudu s tranzistory T18, T19. Přínosem napájení ze zdroje konstantního proudu je díky jeho velké impedanci to, že velice podstatně omezuje možnost uplatnění šumu a brumu napájecího napětí ve zpracovávaném signálu.



Obr. 1. Blokové schéma zesilovače



Obr. 2. Schéma zapojení zesilovače

Odporový trimr P1 slouží k vyrovnání základní napěťové nesymetrie zesilovače, aby nebyl zbytečně zatěžován operační zesilovač v obvodu stejnosměrné servosmyčky. Dále je signál veden do rozkmitového stupně a budiče výkonových tranzistorů s tranzistory T20 až T27. Součástí rozkmitového stupně je obvod pro stabilizaci klidového proudu koncových tranzistorů. Jako teplotní snímač slouží tranzistor T22, který je přišroubován na chladiči společně s výkonovými tranzistory a je také typu MOSFET, tudíž se stejnou teplotní charakteristikou. K nastavení vhodné velikosti klidového proudu koncových tranzistorů slouží odporový trimr P2.

Do rozkmitového stupně je z výstupu přes R48 zavedena místní zpětná vazba, která určuje napěťové zesílení výkonového stupně a přispívá k celkovému zmenšení zkreslení. Kondenzátor C18 připojený paralelně k R48 je určen ke kmitočtové kompenzaci. Výkonová část je jistěna rychlými tavnými pojistkami, ke kterým jsou paralelně přes omezovací rezistory připojeny diody LED. Při přerušení pojistky se LED umístěná pod pojistkou rozsvítí, případně začne blikat. Zapojení bylo blíže popsáno v PE 10/96 na straně 19. Zenerovy diody zapojené v řídicích elektrodách koncových tranzistorů jsou ochranné. S nimi v sérii zapojená křemíková dioda zmenšuje kapacitu Zenerových diod, která by při vyšších kmitočtech zbytečně zatěžovala budičí tranzistory.

Komplementární výkonové tranzistory jsou typu HEXFET v pouzdru TO220 pro snadnou montáž. V každé větvi jsou zapojeny čtyři kusy paralelně. To zaručuje proud do zátěže větší než 150 A. Nejlépe jsou tranzistory využity při co největší shodě parametrů mezi jednotlivými kusy. Proto, máme-li možnost, vybereme je měřením z většího počtu kusů, není to však nezbytně nutné. Výkonové tranzistory je možno měřit buď staticky, tj. bod po bodu, na jednoduchém přípravku, což s sebou nese určité nepřesnosti zvláště při větších proudech I_{DS} , kdy se již tranzistor zahřívá. Druhou, elegantnější, avšak i nákladnější možností, která se vyplatí jen při častějším využití, je dynamické měření na charakteroskopu tovární nebo vlastní výroby. Vynikající konstrukce tohoto přístroje byla

uvedena v časopise Elektor v č. 11/93 pod názvem „Power – MOSFET – Tester“ a bude uveřejněna v některém z příštích čísel časopisu Konstrakční elektronika A Radio. Přístrojem je možno současně měřit 4 tranzistory, dva vodivosti n a dva vodivosti p při proudu I_{DS} až 16 A.

Na tomto místě upozorňuji, že tranzistory HEXFET není dovoleno pájet transformátorovou (pistolovou) páječnou.

Každý tranzistor je na desce s plošnými spoji samostatně blokovan dvěma kondenzátory, umístěnými co nejbližší pouzdra, a to jedním svitkovým, označeným na desce plošných spojů jako C_F , a jedním elektrolytickým s označením C_B .

Zesilovač je možno modifikovat pro menší výstupní výkony bez změny za-

Tab. 1. Přehled tranzistorů HEXFET, použitelných v popisovaném zesilovači

Typ	Vodivost	U_{DSmax} [V]	I_D [A]	I_{Dmax} [A]	P_{tot} [W]	R_{DSmax} [Ω]	U_{GS} [V]	t_{ON}/t_{OFF} [ns]	C_i [pF]
IRF530	kanál n	100	14	56	75	0,16	20	15/35	600
IRF540	kanál n	100	28	110	150	0,077	20	23/60	1450
IRF630	kanál n	200	9	36	75	0,4	20	30/50	600
IRF640	kanál n	200	18	72	125	0,18	20	21/68	1275
IRF9530	kanál p	100	12	48	75	0,3	20	60/140	500
IRF9540	kanál p	100	19	76	125	0,2	20	20/70	1100
IRF9630	kanál p	200	6,5	26	75	0,25	20	50/100	550
IRF9640	kanál p	200	11	44	125	0,5	20	22/90	1100

pojení zmenšením napájecího napětí a použitím odpovídajících (a také levnějších) tranzistorů s menším závěrným napětím, popř. i s menším ztrátovým výkonem. Také je možno zmenšit počet paralelně řazených tranzistorů. V zapojení byly použity tranzistory HEXFET typu IRF640 a IRF 9640 od firmy International Rectifier. Přehled některých dalších v úvahu připadajících typů pro použití v tomto zesilovači včetně jejich základních parametrů je pro porovnání uveden v tab. 1.

Na výstupu je zapojen obvyklý Boucherotův článek C19, R58 pro zamezení případným oscilacím. Nulovou stejnosměrnou složku na výstupu zesilovače v celém pracovním rozsahu zajišťuje DC servo s operačním zesilovačem IO1. Diody D7, D8 zaručují, že napětí na jeho neinvertujícím vstupu nepřekročí velikost napájecího napětí a chrání jej tak před napěťovým přetížením. Na pozici IO1 byl použit operační zesilovač typu LF411, což je operační zesilovač se vstupem J-FET a tudíž s velmi malými vstupními klidovými proudy. Je možno samozřejmě použít jakýkoli lepší operační zesilovač podobného typu. Při použití operačního zesilovače s bipolárními vstupy je nutno z důvodu větších vstupních klidových proudů zmenšit odpor rezistorů R59 a R60 a úměrně tomu zvětšit kapacitu kondenzátorů C20 a C22 tak, aby časová konstanta uvedených článků zůstala stejná. IO1 je napájen symetrickým napětím odebíraným z emitoru tranzistoru T13 (kladná větev) a z emitoru T17 (záporná větev).

Signálová a výkonová zem je kvůli zamezení vzniku zemních smyček propojena přes rezistor R64.

Celkové napěťové zesílení zesilovače je určeno poměrem odporu rezistorů R61 a R62, paralelní kondenzátor C21 zajišťuje kmitočtovou kompenzaci zesilovače.

Ve schématu není zakresleno šest filtračních elektrolytických kondenzátorů, označených na desce plošných spojů C_E . Jejich potřebná celková kapacita závisí na použitém způsobu napájení. Při napájení nestabilizovaným zdrojem, kdy tyto kondenzátory slouží jako zásobník energie, je třeba do každé větve napájení umístit tři kusy, každý s kapacitou alespoň 4700 μF nebo raději 10 000 μF . Při použití spínaného zdroje stačí kapacita řádově menší, ale je nutné použít kvalitní typy s nízkým ESR (ekvivalentním sériovým odporem). Též není zakreslen článek s rezistorem a paralelně k němu připojenou cívku, obvykle zapojený v sérii mezi výstupem zesilovače a zátěží. Rezistor s odporem 2,2 Ω je na zatížení 5 W a tlumivka na něm navinutá má 12 závitů lakovaného měděného drátu o průměru 1,6 mm. Článek není na desce s plošnými spoji, ale je připájen přímo k výstupní zdičce pro připojení reproduktorových soustav na zadním panelu skříně zesilovače.

Oživení a nastavení

Oživení a nastavení výkonového zesilovače by při důkladné kontrole desky plošných spojů, použití kvalitních součástek, jejich pečlivé montáži a průměrných zkušenostech konstruktéra nemělo být žádným problémem. Před připojením napájecího napětí nastavíme běžec odporového trimru P1 do střední polohy a odporový trimr P2 na minimální odpor. K oživení použijeme nejlépe stabilizovaný napájecí zdroj s proudovou pojistkou a s možností měřit velikost odebíraného proudu. Napájecí napětí plynule zvětšujeme a kontrolujeme velikost odebíraného proudu. Pokud je vše v pořádku a to i po připojení zátěže, můžeme zesilovač signálem z nf generátoru vybudit na plný výkon a osciloskopem zkontrolovat průběh napětí na výstupu zesilovače. Po zahřátí koncových tranzistorů nastavíme trimrem P2 klidový proud na 50 až 100 mA na každý tranzistor. Na závěr připojíme na výstup stejnosměrný milivoltmetr a odporový trimrem P1 vynulujeme stejnosměrné napětí na výstupu koncového zesilovače. Tím je ožívování i nastavení ukončeno a zesilovač může sloužit v provozu.

Rozpis součástek

R1	1 k Ω
R2, R17, R20	22 k Ω
R3, R4, R5, R6	47 Ω
R7, R8	4,7 k Ω
R9, R12, R57	22 Ω
R10, R11, R15,	
R16, R19	4,7 k Ω
R13, R14	470 Ω
R18, R21	10 k Ω
R22, R23	33 k Ω
R24, R25	220 Ω
R26, R27, R29, R30, R64	10 Ω
R28	270 Ω
R31, R34	220 Ω
R32, R35, R63	100 Ω
R33	2,2 k Ω
R36, R37	47 Ω
R38, R39, R40, R41	560 Ω
R42, R43	3,3 k Ω
R44, R47	330 Ω
R45, R46, R49	100 Ω
R48	1,5 k Ω / 5 W
R50, R51, R52, R53, R54, R55, R56,	
R58	10 Ω / 2 W
R59, R60	1 M Ω
R61	2,4 k Ω
R62	1,2 k Ω

P1	odporový trimr nalezato, 1 k Ω
P2	odporový trimr nalezato, 5 k Ω

(RM = rozteč vývodů v mm)

C1	2,2 μF (2 $\times$ 1 μF /50 V), RM=5
C2, C3, C4	1 nF, RM=5, fóliový
C5, C6	220 nF, RM=5, fóliový
C7, C8	100 μF /25 V, RM=5
C9, C10, C11, C12	100 μF /6,3 V, RM=2,5
C13, C14	470 μF /63 V, RM=5
C15, C16	1 nF, RM=5, fóliový
C17	1 μF , RM=15, fóliový

C18	150 pF, RM=10, fóliový
C19	47 nF, RM=15, fóliový
C20, C22	220 nF, RM=5, fóliový
C21	100 pF, RM=5, fóliový
CE	6 $\times$ 4700 μF /63 V, RM=10
CF	8 $\times$ 100 nF/63 V, RM=5
CB	8 $\times$ 47 μF /63 V, RM=5

T1, T2	BC550C
T9, T10, T13	BF422
T23, T24	BF469
T3, T4	BC560C
T11, T13, T17	BF423
T26	BD139
T5, T6, T16,	
T18, T21	BC546B
T15	BF245A
T27	BD140
T7, T8,	
T14, T19	BC556B
T20, T25	BF470
T28 až T31	IRF9640
T22	IRF510
T32 až T35	IRF640

D1, D2,	
D3, D4	LED červená, 3 mm, s malou spotřebou (2 mA)
D10, D13	13 V, BZX55
D5, D6	LED červená, 3 mm, 20 mA, nebo blikací
D11, D16	1N4007
D7, D8,	
D9, D14	1N4148
D12, D15	12 V, BZX85

IO1	LF411
-----	-------

Po1, Po2 pojistka 10 A/F + pojistkové pouzdro pro montáž do plošných spojů

Literatura

- [1] Simpson, L.; Clarke, J.: High-Power FET Stereo amp. Radio-electronics č. 6, 7, 8/1986.
- [2] Metz, R.; Boyce, M.: High-Power HiFi Audio Amplifier. Electronics Now č. 10/1995.
- [3] Car Booster. Elektor č. 10/1994.
- [4] IGBT Leistungsverstärker. Elektor č. 9/1995.
- [5] Hood, J. L. L.: 80-100 W MOSFET Audio Amplifier. Wireless World č. 8/1982.
- [6] International Rectifier: Hexfet Power Mosfet Designer's Manual.
- [7] Siliconic: MOSPOWER Applications Handbook.
- [8] National Semiconductor: National Operational Amplifiers Databook 1995.
- [9] Linnenberg, I.: Alles auf eine Karte setzen. Funkschau č. 2/1986.
- [10] Medium Power Amp. Elektor č. 10/1990.
- [11] Ulti - Amp. Elektor č. 5/1994.
- [12] Hacklinger, W.; Füllman, R.: High-End-Hörgenuß. ELO 11/1986.
- [13] Diskreter Ulti Preamp. Elektor č. 7-8/1994.
- [14] Mosfet PA. Elrad č. 7/1990.
- [15] Hanzlík, J.: Jakostní výkonový zesilovač 55 W. Radiový konstruktér č. 1/1975.