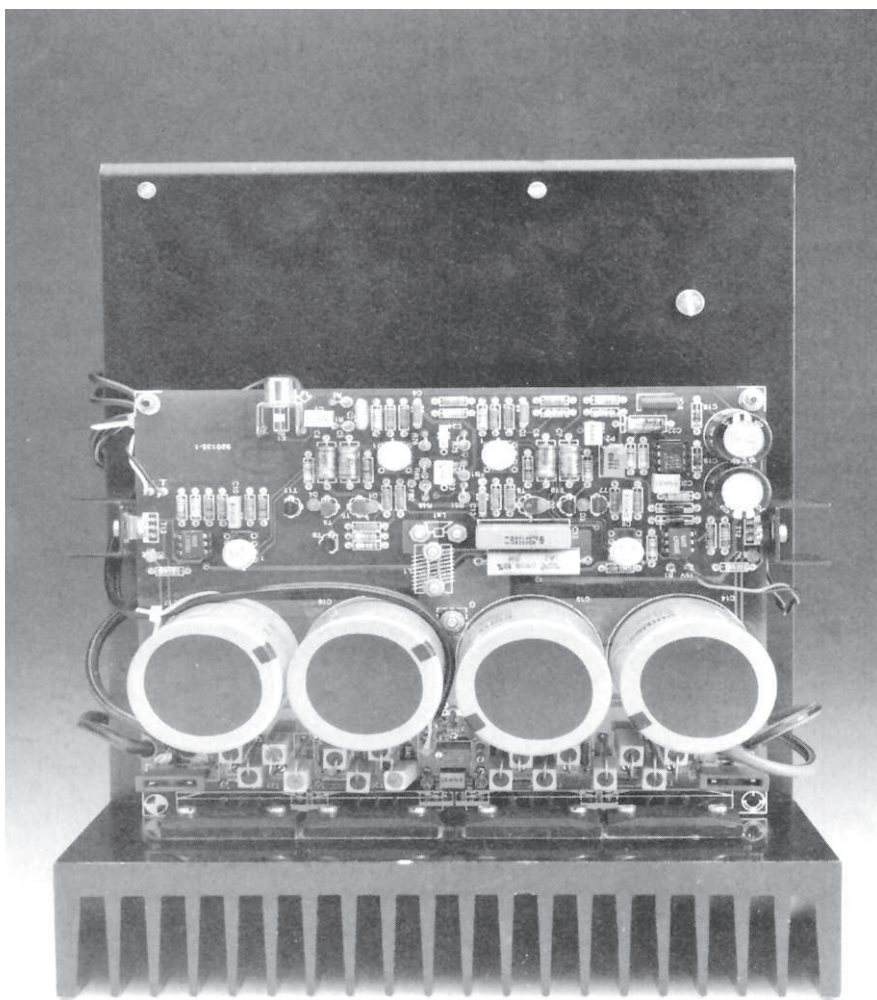


S n a ž n o

STRUJNO POJAČALO



Za ljubitelje audia predstavljen je specijalni izlazni stepen za nisko-omske trakaste zvučnike. Ovo neuobičajeno pojačalo može bez problema da daje 20A (35A vršno) na 0,4 oma. Podrazumeva se High-End kvalitet. Kod projektovanja mislilo se i na verziju za 4/8 omske zvučnike.

Za ovaj projekat može se reći: jedno izuzetno pojačalo za sasvim specijalne slučajeve. Čak i ako se ne planira korišćenje sa trakastim zvučnicima, izuzetnog zvuka, koncept pojačala je veoma interesantan, a možda čak predstavlja i početak novog doba...

TRAKASTI ZVUČNICI

Najslabija karika audio lanca su još uvek zvučnici. I pored moderne audio tehnike sa bitovima i bajtovima, mikrokontrolerima, laserima, digitalnim zvukom, zvučne kutije još uvek daju sliku audio-kamenog doba iako su proizvođači zvučnika osavremenjavali svoje proizvode. Magneto-dinamički (konusni) zvučnici su još uvek najzastupljeniji. Vazduh se može pokretati i bez

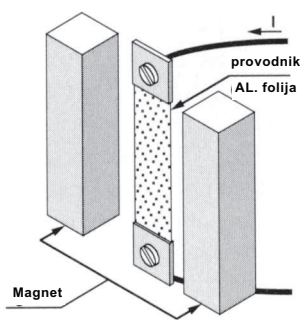
TEHNIČKI PODACI:

Ulazna osetljivost: 0,72 V_{eff}
Ulazna impedansa: 45 k
Brzina uspona: 14 V/ μ S
Odnos signal/šum: >95dBA
Izlazna snaga:
1kHz. 0,1% THD, 0,4 Ω : 110W
1kHz. 0,1% THD, 1 Ω : 70W
Vršna izlazna snaga: 130W
Opseg pojačala pri 50 W/ 0,4 Ω :
9 Hz...250 kHz
Harmoničko izobličenje:
(100 W/0,4 Ω): < 0,05 %
Faktor prigušenja:
(0,4 Ω , 20 kHz) > 600

konusa, namotaja i promenljivog magnetnog polja. Jedna od varijanti koja nas ovde interesuje, je provodna folija u magnetnom polju koja direktno izaziva kretanje vazduha (slika 1). Ovaj pretvarač električnih signala u mehaničke (zvučne) naziva se trakasti zvučnik. Skoro svi trakastii zvučnici rade pomoću jedne aluminijumske folije koja ima veoma nisku impedansu od svega 0,2 do 0,5 oma. Korišćenjem modernih proizvodnih metoda moguće je proizvesti trakaša sa impedansom istom kao i kod običnih elektro-dinamičkih zvučnika, (na pr. *Technics* trakasti twetter sa dugačkom i tankom veštačkom folijom) ali oni se ne kotiraju visoko na lestvici kvaliteta reprodukcije. Audiofili se i dalje kunu u debele nisko-omske folije, poznate po visokoj vernostii reprodukcije visokih tonova. Jedan klasičan primer trakastog zvučnika je visoko-tonac *Decca Ribbon* kod koga je upotrebljena neznatna količina aluminijumske folije sa faltama kao kod harmonike i kompenzovana sa hornom. Noviji primer je nadogradnja *Decca* zvučnika pod nazivom *Jordanov* - trakasti twetter proizveden u istočnoj Evropi. Bez obzira na teškoće u proizvodnji, reakcija na njega je bila dobra. Na zapadu se takođe pojavio trakaš firme *Furorore*, za frekvencije počev od 500 Hz i sa folijom dužine oko 50 cm. U SAD-u može se za potrebe samogradnje nabaviti trakasti zvučnik sa više metara visine koje proizvode *Gold Ribbon* i *Speakerlab*. Takođe i *Apogee* ima *Full-Ranged* trakaste zvučne kutije sa velikom aluminijumskom membranom.

NISKA IMPEDANSA

Skoro svi trakasti zvučnici imaju tako nisku impedansu da je neophodno da na izlazni stepeni pojačala budu povezani preko prilagođavajućeg transformatora. Pri tome, dolazi se u situaciju da se skup trakasti zvučnik visokog re-



Slika 1. Principijelni izgled trakastog zvučnika

produktivnog kvaliteta vezuje na pretvarač koji taj kvalitet umanjuje. Zbog toga se došlo na ideju da se razvije poseban izlazni stepen koji daje dovoljno jak strujni izlaz sposoban da pobuđuje trakaše sa alu-folijom koji imaju ekstremno niske impedanse. To je na prvi pogled izgledalo jednostavnio, ali u stvari nije bilo. Ipak, na kraju su pronađena rešenja za sve probleme: Izlazni stepen daje 160 W na 0,4 oma i kompenzuje gubitke prenosa na i priključku, koji kod tako niskih impedansi nisu za podcenjivanje. Pojačalo je projektovano po meri za *Strathearn* trakašte zvučnike, ali je odgovarajuće i za bilo koje druge nisko-omske trakaste zvučnike. Pored njih i uobičajene magneto-dinamičke zvučne kutije niske impedanse (kao što su *Infinity*) mogu biti upotrebljene. Pri upotrebi pojedinih trakastih zvučnika potrebno je pre priključenja odstraniti pretvarač, kao što je to slučaj sa *Jordanov* trakašem. Bez obzira na sve, pojačalo je predviđeno za rad sa svim zvučnicima čija je impedansa između 0,2 i 1 om. Moguće je priključivanje i zvučnika više impedanse, ali zbog malog napona napajanja snaga koja se dobija je neznatna.

KONCEPT

Pre predstavljanja principijelne šeme pogledaćemo blok šemu sa slike 2. Pri razvoju uređaja bilo je neophodno da se odredi izlazna struja. 20 A je dovoljno za *Strathearn* trakaš čija je impedansa

0,35 do 0,4 oma (što je odgovarajuće iza većinu drugih). To bi odgovaralo snazi od 140 W. Za izlazne tranzistore odabrani su brzi tranzistori proizvođača *Sanken*, koji nude idealnu kombinaciju visokog strujnog pojačanja širokog opsega i jake maksimalne kolektorske struje. Na početku razvoja pojačala postojala jedna ideja da se stvori strujno / naponski pretvarač koji bi zamenio sve pretvaračke otpore između izlaza pojačala i trakaša. Takav strujni izlaz kompenzuje i sva induktivna opterećenja i "gura" struju kroz zvučnik onoliko koliko je potrebno. Sa koncepta strujnog pojačala ponovo se vraćamo na teren naponskog pojačanja sa niskim unutrašnjim otporom. Da bi izbegli otpore veze i priključnog kabla koristi se povratna sprega koja se direktno priključuje na trakaše. Dakle, potrebno je imati priključke. Još jedan dodatni problem su izlazni releji koji prekidaju vezu između izlaza i zvučnika pri uključenju, odnosno isključenju i smetnji (na pr. pri gubitku jednog radnog napona) radi zaštite zvučnika. Radi se o tome da postoje releji koji imaju kontakte predviđene za 20A i više i pri velikim strujama se dobro ponašaju. Međutim, njihovo ponašanje pri malim strujama nije zadovoljavajuće. S druge strane, releji predviđeni za male struje nisu odgovarajući za velike. Pošto ne postoje releji čiji se kontakti podjednako dobro ponašaju i sa velikim i sa malim strujama, na takav vid zaštite se u ovom slučaju ne može osloniti. U laboratorijskim uslovima postoji više različitih rešenja za ovaj problem i ona su testirana, međutim većina njih je imala uticaja i na audio signal. Pomeranje vremena uključenja i isključenja izlaznog stepena pojačala nije radilo zadovoljavajuće. Ipak je pronađeno rešenje koje nije imalo uticaja na zvuk a radilo je perfektno. Upotrebljena su dva optokaplera i jaki trijaci. O tome će biti reči kasnije. Ovo su samo

dva primera problema koje treba rešiti pri projektovanju.

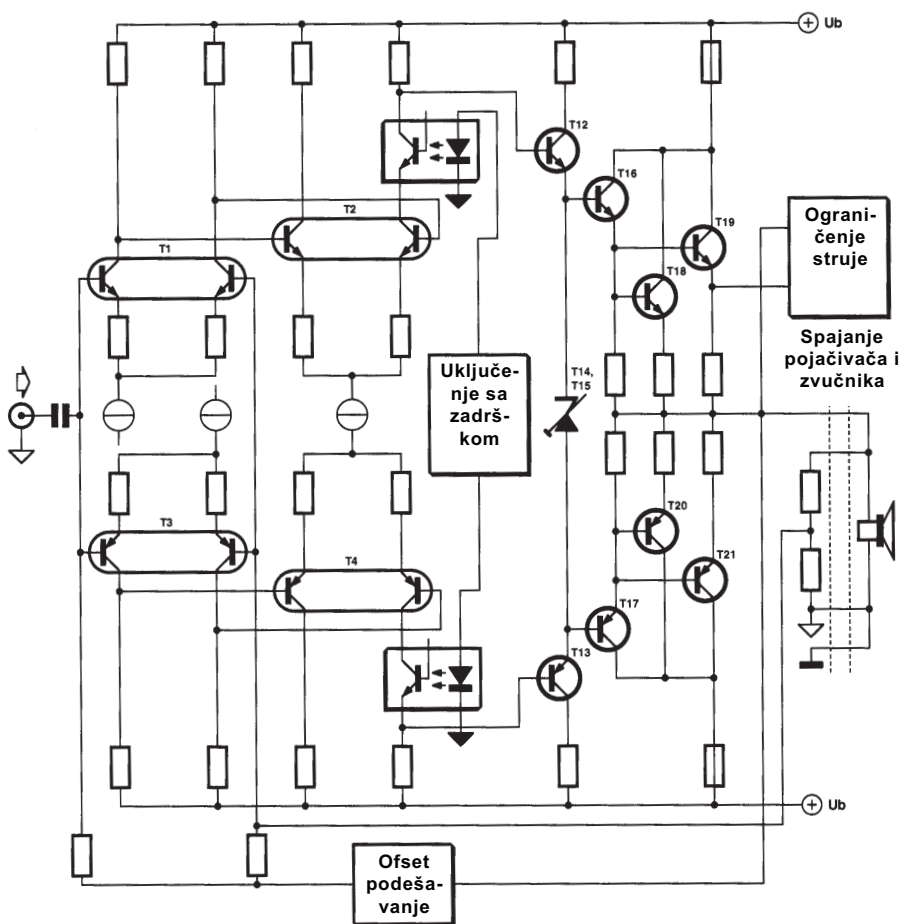
Na blok šemi vidi se da je kompletno pojačalo izvedeno simetrično. Dva diferencijalna pojačala, T1 i T3, formiraju ulaznu sekciju. Svaka strana ima faktor pojačanja 100. Zatim sledi dalji diferencijalni stepen, T2 i T4, sa faktorom 20. Vezu između ulaznog i izlaznog stepena formiraju dva pretvarača impedanse, T12 i T13. Između njih može se videti podešavajuća Z-dioda, koja određuje struju mirovanja izlaznog stepena. Svaka strana izlaznog dela sadrži pogonske tranzistore (T16, odnosno T17) koji upravljaju paralelno vezanim tranzistorima snage (T18/T19 i T20/T21). Optokapleri su vezani na kolektorske izvode diferencijalnih pojačivača, T3 i T4, i njihov zadatak je da potiskuju udarni signal pri uključenju, odnosno isključenju. Taj efekat se

postiže tako što se LE diode polako pale pa je tranzistor neprovođan za struju ka izlaznim tranzistorima. Tek kada se radni napon na izlaznim tranzistorima stabilizuje, tranzistori optokaplera počinju da provode. Postavljanjem strujnog upravljanja između diferencijalnog pojačivača i predupravljačkih tranzistora T12/T13 izbegnuto je da nelinearnost opto-tranzistora utiče na kvalitet zvuka. Druga specifičnost je strujno ograničenje. Pad napona na emitterskim otpornicima koristi se kao mera emitterske struje. U slučaju porasta struje nešto preko 30A, (vršna vrednost uveliko zavisi od napona između baze i emitera tranzistora T22) zaštitno kolo prepoznaje kao grešku. U slučaju da primarna mrežna zaštita ne reaguje, kolo strujnog ograničenja isključuje optokaplere. Osim toga, dva snažna triaka prave kratak spoj radnog napona i time spaljuju to-

pljive osigurače na kolektorskim vodovima izlaznih tranzistora. Isto se događa u slučaju nestanka jednog od dva radna napona, ili ako iz bilo kog razloga nedostaje jedna od komponenti jednosmernog napona. Ova metoda možda delovati radikalno, ali je to jedan od malobrojnih načina da se zvučnici i pojačalo zaštite bez upotrebe releja na izlazu. Slična rešenja mogu se naći i kod mnogih fabrički proizvedenih Hi-Fi uređaja. Neuobičajen je i način povezivanja između zvučnika i pojačala. Pored normalnih, debljih, kablova za povezivanje zvučnika imamo i tanke *Sense* kablove. Njihov zadatak je da pakupe povratni signal sa klema zvučnika i vrte ga na povratno spregnuti mrežni deo. Na ovaj način izbegnuto su svi pretvarački otpornici LS veze.

UREĐAJ

Slika 3 prikazuje šemu pojačala. Ulazni signal sa pred pojačala ili aktivne skretnice preko C1 dolazi(e) na pojačalo. Ovaj kondenzator zajedno sa R2 gradi prolaz za frekvencije iznad 9 Hz. Za propuštanje nižih frekvencija može se povećati vrednost za C1. Odmah iza toga dolazi još jedan filter, formiran pomoću R1/C2, koji slabi signale čija frekvencija prelazi 280 kHz i na taj način potiskuje tranzistorsku intermodulaciju. Odgovarajući opseg audio signala dolazi na diferencijalna pojačala T1 i T3, za koja su upotrebljeni poznati dupli tranzistori MAT02 i MAT03. Zbog izbora ovih nisko šumnih i dobro uparenih tranzistora mora se reći da termička stabilnost celog pojačala najviše zavisi od diferencijalnog stepena. Zahvaljujući ovim tranzistorima u istom kućištu veza je idealna. Za frekventnu kompenzaciju prvog diferencijalnog stepena zadužena su RC kola R5/C3, odnosno R10/C4. Vrednosti kolektorskih i emitterskih otpornika tako su postavljene da daju faktor pojačanja

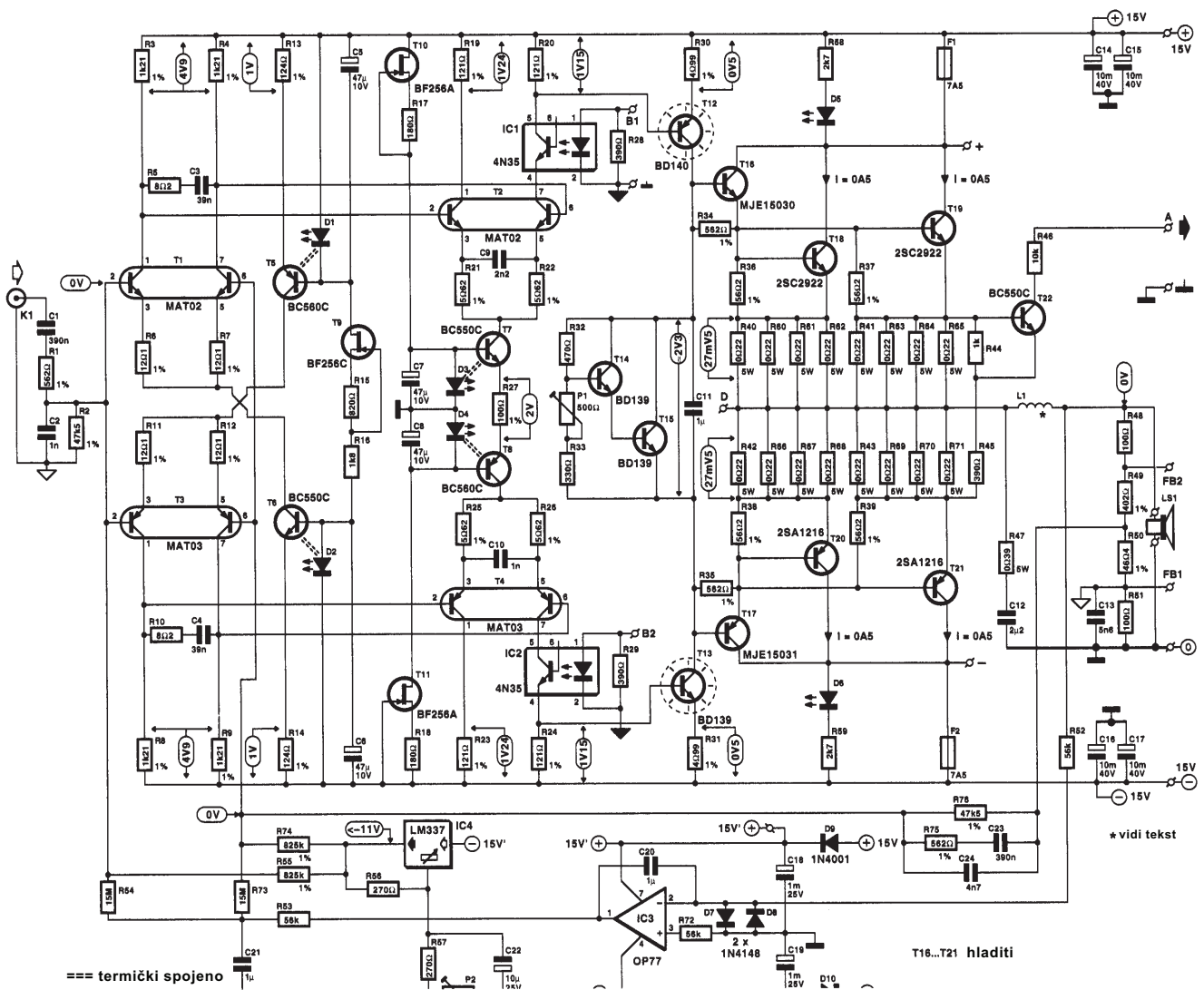


slika 2. Blok šema simetrično izvedenog strujnog pojačala

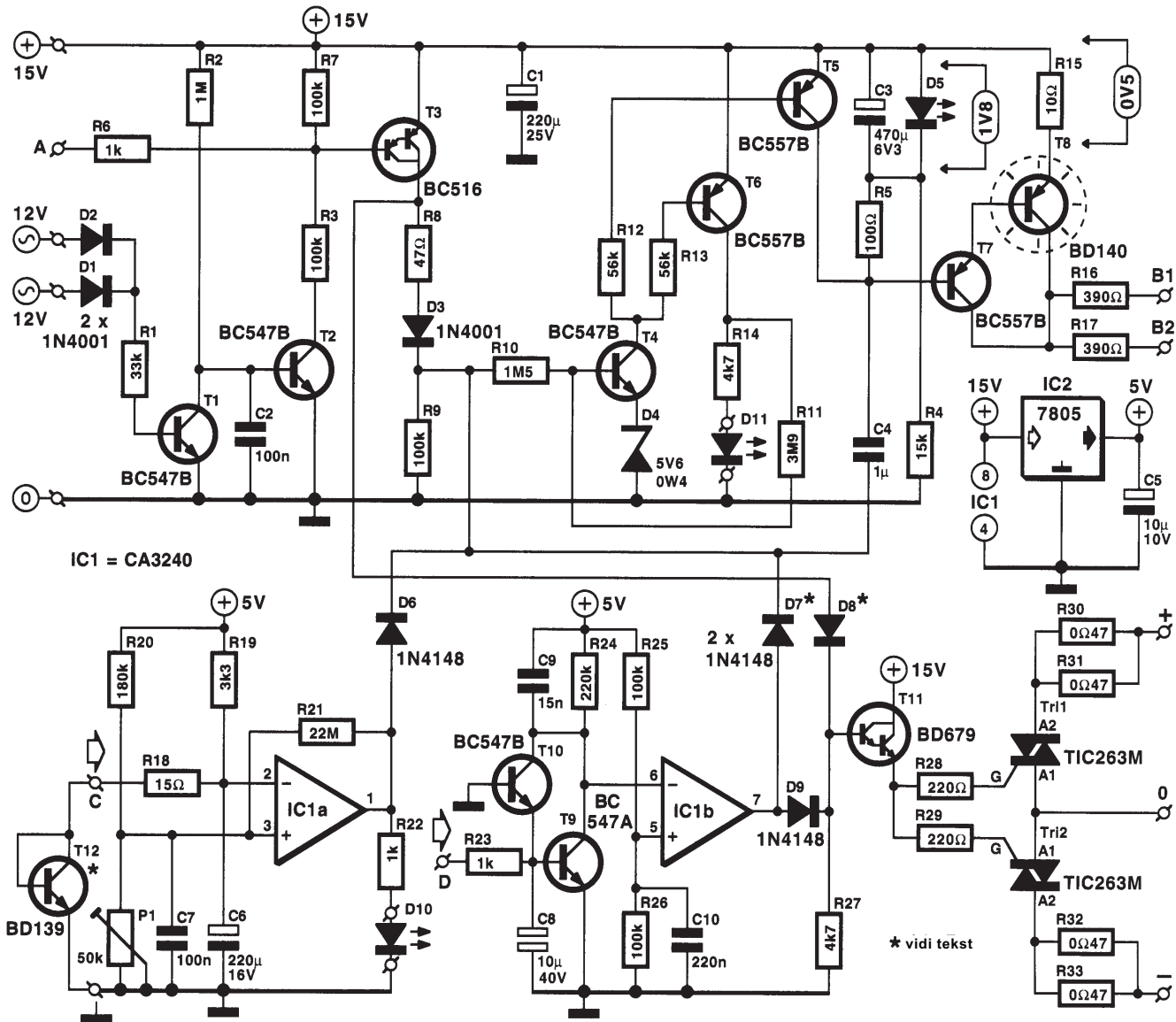
100. Tranzistori T5 i T6 predstavljaju konstantni strujni izvor za ulaznu sekciju pojačala. Korišćenjem LE dioda oni nisu posebno stabilan izvor, pa je potreban još jedan izvor konstantne struje (T9 i R15) čiji je zadatak da daje stabilnu LE struju. Drugi stepen diferencijalnog pojačanja T2 i T4 izveden upotrebom MAT02 i MAT03, daje faktor pojačanja 20. Ovdje su za frekventnu kompenzaciju upotrebljeni C9 i C10. I ovdje su posebno izvedeni konstantni strujni izvori. Tranzistorska/LED kombinacija T7/D3 i T8/D4 odgovorna je za konstantno napajanje duplih tranzistora. I u ovom slučaju dva FET-a (T10 sa R17 i T11 sa R18) obezbeđuju kon-

stantnu struju za LE diode. Obavezno treba obratiti pažnju na to da LED-ovi imaju propusni napon od 1,55 do 1,65 V inače će podešavnost jednosmerne struje izlaznog stepena biti ne odgovarajuća. Na kolektorskim vodovima T2b i T4b vezani su optokapleri za kašnjenje uključjenja. Njima upravlja zaštitno kolo preko tačaka B1 i B2. Na kolektore opto-tranzistora vezani su pred-upravljački tranzistori T12 i T13. Između njih nalazi se dvodelno tranzistorsko-zenker kolo (T14/T15) kojim se podešava struja mirovanja izlaznih tranzistora. Podešavanjem P1 moguće je regulisati napon među kolektorima T12 i T13 i na taj način odrediti jačinu jednosmerne struje

kroz izlazne tranzistore. Izlazni stepen izveden je upotrebom super emitorskog spoja koji se sastoji iz jednog upravljačkog i dva paralelna izlazna tranzistora za svaku polovinu pojačavača T16, T18/T19 za pozitivnu i T17, T20/T21 za negativnu). Emitterski otpori izlaznih tranzistora sastoje se iz četiri paralelno vezana otpornika čiji je otpor 0,22 oma/5 W. To je izvedeno na ovakav način da bi se jaka struja rasporedila na veći broj lemnih spojeva. Osim toga i indukcija otpornika kod ovako nisko-omskih opterećenja nije za podcunjivanje. Između T19 i T21 postoji grananje napona na koje je vezan T22. On provodi u slučaju da kroz emitterske otpornike pro-



Slika 3. Detaljna šema bez zaštitne elektronike. Elektroliti se nalaze odmah pored izlaznih tranzistora zbog velike struje.



Slika 4. Zaštitno kolo. Dva trijaka u slučaju greške kratko spajaju napajanje i time izazivaju pregorevanje osigurača. Skupi zvučnici i izlazni tranzistori ostaju neoštećeni.

tiče više od 30 A. Izlaz A vodi na zaštitni sklop. Isto tako, zaštitnom spoju pripadaju i oba osigurača od 7,5 A. S obzirom da svaki osigurač obezbeđuje samo polovinu izlaznog signala, primerci od 7,5 A mogu se lako izboriti sa strujnim špicovima od 30 A. Osigurači se nalaze između radnog napona označenim + ili -, izvodima koji vode na zaštitno kolo. Ovi priključci od strane zaštitnog kola puštaju se na masu.

Paralelno sa osiguračima postavljene su LE diode koje se pale u slučaju pregorevanja pripadajućeg osigurača. Na kraju izlaznog ste-

pena nalazi se kolo sastavljeno od R47/C12 i izlaznog kalema predviđeno za korišćenje normalnih zvučnika. Kod upotrebe trakastih zvučnika kalem je nepotreban. Oba Sense priključka nalaze se paralelno u odnosu na naponsko grananje, sastavljeno od R48 do R51, R49 i R50, ispred zvučnika. Faktor povratne sprege, čemu služe R48 i R51, brine o tome da uređaj funkcioniše i u slučaju kada se ne koristi spoljni deo povratne sprege. Preko čvorišta R49/R50 signal povratne sprege dopire nazad do baznih izvoda tranzistora T1b i T3b. Kompleksni deo napajanja, sastavljen od

R75, R76, C23 i C24, brine o tome da je impedansa baznih priključaka T1b i T3b potpuno ista kao i kod T1a i T3a. Time je postignuto dodatno poboljšanje diferencijalnog pojačivača. Zbog primetne razlike u faktoru pojačanja duplih tranzistora MAT02 i MAT03 preduzete su dodatne mere da bi se ofset napon pojačivača zadržao na što je moguće nižem nivou. Baš kod nisko-omskih opterećenja dolazi do izražaja da već i mali ofset naponi imaju za posledicu visoke izlazne jednosmerne napone koji prolaze kroz zvučnik. Preko dva visoko-omska otpornika (R55 i R74) dovodi se negativni

napon, koji se pomoću P2 može podešavati na baze diferencijalnih pojačivača. Ovaj napon je tako odmeren da na izlazu ofset napon bude jednak nuli. Da bi se izbegle oscilacije ofset napona, na primer izazvane temperaturnim promenama, predviđen je dodatni stepen izveden pomoću IC3. Time se, preko R53, C21, R54 i R73, bazni napon T1 i T3 dodatno prilagođava. Pražnjenjem C18 i C19 automatski ofset podešavanje ostaje aktivno i neko vreme posle isključenja. Poslednja specifičnost su elektrolitski kondenzatori C14 i C17 koji se nalaze na štampanoj ploči veoma blizu izlaznih tranzistora, da bi se izbegle poteškoće sa dugim provodnicima pri velikim strujama. Odmah pored ploče nalaze se transformator, ispravljač i eventualno kondenzator za peglanje napona.

ZAŠTITNO KOLO

Zaštitno kolo (slika 4) sadrži dosta elemenata zbog toga što osim zaštitne funkcije ono zamenjuje i izlazne releje. Nakon uključenja, radni napon preko R4 polako puni C3. Tek nakon nekoliko sekundi iniciraju se Darlington tranzistori T7/T8 i postepeno se uključuju LED-ove optokaplera priključene na izvode B1 i B2. LED-ovi maksimalno svetle kada napon na C3 dostigne od 1,7 do 1,8 V. Tada Darlingtoni rade kao izvor konstantne struje, čime LED D5 preko R15 održava stalan napon između baze i emitera T7/T8. T1 je preko dve diode vezan na sekundar mrežnog transformatora. Dok je pojačalo uključeno T1 provodi pozitivne poluperiode. Za to vreme blokirani su T2 i Darlington T3. Ako iz bilo kog razloga nestane napon sa transformatora, T2 provodi. Zbog toga i T3 provodi, tako da Šmit-okidačko kolo, formirano pomoću T4 do T6 i D4, okida. T5 prelazi u provodno stanje i na bazne izvode Darlingtona T7/T8 dovodi pozitivni na-

pon. Darlingtoni blokiraju i isključuju optokaplere. Sve to odigrava se veoma brzo, tako da opto-tranzistori blokiraju pre nego što se zaostaci glavnog radnog napona izgube. Kada T4 ponovo provede kolektorski napon T6 brzo poraste i ponovo, preko R11, okida Šmit kolo (čvorište R9/C4) a D11 pokazuje da se zaštitno kolo aktiviralo. Tranzistor za merenje struje priključen je na tački A. Ako je emitera struja prevelika T22 provodi i postavlja bazu Darlingtona T3 na masu, Tada i on provodi a optokapler se isključuje. Darlington T11 preko D8 inicira triake (Tri1 i Tri2) i oni prelaze u provodno stanje. Ako se D8 izostavi, tada prekoračenje maksimalne struje ne izaziva pregorevanje osigurača, već samo isključenje izlaznog stepena na nekoliko sekundi. Deo uređaja od T12 do IC1a radi kao temperaturno osiguranje. T12 se vezuje kao dioda i sa izolacijom se postavlja na hladnjake blizu izlaznih tranzistora. Preko R19 i R18 teče jednosmerna struja kroz T12. Napon na njemu je obrnuto srazmeran temperaturi i dovodi se na invertujući ulaz, kao komparator sa histerezisom upotrebljenog, operacionog pojačala IC1a. Referentni napon neinvertujućeg ulaza, koji ima mogućnost podešavanja, dolazi sa naponskog grananja R20/P1. U slučaju pada temperaturnog napona u odnosu na referentni izlaz, IC1a postavlja se na *High* i preko šmit okidača isključuje optokapler. Kada temperatura opadne pojačalo se automatski uključuje. I na kraju ofset osiguranje. U slučaju da se na izlazu pojačala pojavi jednosmeran napon veći od -0,6 V, odnosno ispod -0,6 V, sklop izvršava pregorevanje osigurača. Ovaj deo uređaja sastoji se od R23/C8, dva tranzistora T9 i T10, koji u slučaju greške provode i komparatora IC1b čiji izlaz tada daje +5V. Trijaci se aktiviraju preko D9 i T11. Istovremeno IC1b preko D7 isključuje optokaplere. I ovde se može iz-

ostavljanjem D9 sprečiti pregorevanje osigurača.

PRAKTIČNI DEO

Kod realizacije visoko-strujnih pojačala javljaju se problemi kojih nema kod izrade uobičajenih pojačala. To ima veze sa malim naponom a velikom strujom (10 do 20 A) napajanja, što ima za posledicu poteškoće sa uticajem magnetnih polja na ulaz i upravljački deo izlaznog stepena. Zbog toga je potrebno preduzeti mere kojima se postiže da taj uticaj bude što manji. Najvažnije je da izvodi izlaznih tranzistora budu što kraćom vezom povezani na elektrolite. Time se izbegava otpor vodova i modulacija napajanja sa audio-signalom. Izlazni signal se kratkim i debelim kablom vodi na trakaš.

MERNE VREDNOSTI

U odeljku sa tehničkim podacima date su osnovne merne vrednosti. Tome još treba dodati i sledeće: maksimalna snaga je izmerena pod opterećenjem od 0,4 oma (1,0 om respektivno) i upotrebom standardnog transformatora 2x12 V/12,5 A. Upotrebom većeg transformatora (2x12V/20,8A) i dodavanjem kondenzatora za peglanje napona dobija se veća snaga (140W na 0,4 oma). Pošto "trakaši" reprodukuju frekvencije iznad nekoliko stotina herca dovoljna je snaga od 100 W. Donja granična frekvencija pojačala, određena ulaznim kondenzatorom je 9 Hz. Ako se pojačalo koristi u celom opsegu (bez predhodno priključene elektronske skretnice) C1 i C23 mogu da imaju veću vrednost (1 μ F). Izlazni napon je u odnosu na obična pojačala za opterećenje pomoću zenera snižen na 4 do 8 oma a kod strujnog pojačanja od 1 oma na 0,4 oma napon izlaznog signala je 632 mV. Faktor prigušenja na 20 kHz je dosta veliki. Prigušenje zavisi od dužine i kvaliteta Sense provodnika. Ako se