

# Tehnika in konstruktorstvo

Ureja: **Matjaž Vidmar, S53MV**, Sergeja Mašere 21, 5000 Nova Gorica, e-mail: S53MV@uni-mb.si

## TRANZISTORSKI OJAČEVALNIKI ZA VHF

Dragoslav Dobričić, YU1AW (prevod Matjaž Vidmar, S53MV)

### 1. Uvod

Namen tega članka je, da zainteresiranim graditeljem opiše gradnjo nekaj močnostnih ojačevalnikov za VHF področje, bolj točno za področji 50MHz in 144MHz. V osnovi bosta obdelani dve vrsti ojačevalnikov: z enim tranzistorjem in z dvema tranzistorjema. Razen opisa konkretne gradnje bojo podana tudi splošna načela gradnje tranzistorjskih ojačevalnikov za VHF področje.

### 2. Kakovosten ojačevalnik

Gradnjo ojačevalnika začnemo z izborom močnostnih tranzistorjev, kar hkrati določa meje zmogljivosti izdelanega ojačevalnika. Kakovost nekega ojačevalnika določa nekoliko parametrov. Kakovosten ojačevalnik bi moral imeti naslednje lastnosti:

- (1) Visok izkoristek moči vira napajanja.
- (2) Veliko močnostno ojačenje.
- (3) Dobro dušenje harmonikov in intermodulacijskih produktov.
- (4) Dobro električno in toplotno stabilnost.
- (5) Enostavnost izdelave in uglaševanja.

Nekatere od gornjih zahtev so protislovne in moramo izbrati smiselen kompromis. Nekatere druge zahteve so soglasne in z izpolnitvijo ene hkrati zadostimo tudi drugim.

Visok izkoristek moči je vsekakor najvažnejša zahteva. Z maksimizacijo izkoristka hkrati ustrezemo večini ostalih zahtev. Razen izbire delovne točke tranzistorja, na izkoristek vpliva izhodna prilagoditev tranzistorja in izgube v vezju za prilagoditev impedance. Visok izkoristek pogojuje:

- (1) Da se strogo upoštevajo enosmerne napetosti in tokovi, ki jih proizvajalec tranzistorja navaja za izbrano delovno točko delovanja ojačevalnika.
- (2) Da je izhod tranzistorja prilagojen tako, da tranzistor "vidi" točno, od proizvajalca določeno impedanco, pri kateri daje največjo moč z najmanjšim popačenjem in najboljšim izkoristkom. Pri tem morajo biti izgube v vezju za prilagoditev impedance minimalne.
- (3) Da je temperatura tranzistorja pod maksimalno dovoljeno temperaturo, kar se doseže s primernim hlajenjem.

Z izpolnitvijo teh zahtev se doseže visok izkoristek, največja izhodna moč, razmeroma nizka delovna temperatura in zelo majhna harmonska in intermodulacijska popačenja.

Drugo zahtevo, visoko močnostno ojačenje, dosežemo s pravilno prilagoditvijo impedance tranzistorja na vohodu. Vhodno prilagodilno vezje ima tudi največji vpliv na stabilnost delovanja ojačevalnika. Izgube v vezjih za prilagoditev impedance neposredno znižujejo ojačenje.

Še en pogoj za visoko ojačenje je zelo dobra ozemljitev skupne elektrode, običajno emitorja bipolarnih tranzistorjev oziroma izvora poljskih tranzistorjev. Povezava emitorja ali izvora na maso mora biti izjemno kratka, to se pravi zelo nizke impedance!

Stabilnost ojačevalnika zavisi od samega tranzistorja, v veliki meri pa tudi od vseh ostalih dejavnikov, kot so: prilagoditev, mehanska izvedba ter razdvajanje električnih poti vhodnih in izhodnih vezij. Bolj enostavno, pravilna rešitev problema skupne mase v visokofrekvenčnih ojačevalnikih izloči neželjeno povratno vezavo med vohodom in izhodom.

Najpomembnejši pogoj za stabilnost vsakega ojačevalnika je zagotoviti pravilno zaključitev impedance na zelo nizkih frekven-

cah, daleč pod delovno frekvenco, kjer imajo tranzistorji ogromno ojačenje. Na zelo nizkih frekvencah moramo bazo in kolektor zaključiti v delovno upornost nekaj deset ohmov. V primeru, da baza, a še posebno kolektor, na zelo nizkih frekvencah vidita kratek stik preko neke velike kapacitivnosti ali odprte sponke preko neke velike induktivnosti, zelo pogosto pride do samoosciliranja ojačevalnika.

Tretji pogoj, dobro dušenje višjih harmonikov in nizki nivo intermodulacijskih produktov, je odvisen od mnogih dejavnikov. Naštetimo le nekatere: izbira optimalne kvalitete (Q) izhodnega prilagodilnega vezja, linearost izbrane delovne točke tranzistorja, majhna izhodna upornost vezja za polarizacijo baze, jakost vzbujevalnika itd. S pravilno konstrukcijo ojačevalnika se dajo neželjeni signali, ki jih proizvaja ojačevalnik, dovesti na najmanjšo vrednost. Nekatere od neželjenih signalov lahko še dodatno oslabimo oziroma izsejemo s pravilno načrtovanim izhodnim vezjem.

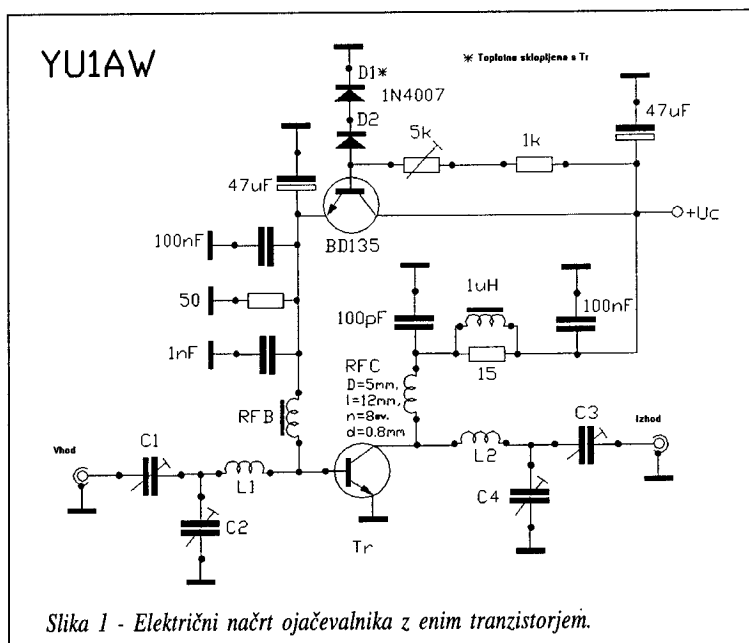
Žal se nekateri neželjeni signali (intermodulacijski produkti lihih redov) ne dajo izsejati, ker se pojavijo zelo blizu delovne frekvence. Nanje lahko vplivamo edino s pravilnim načrtovanjem ojačevalnika, ki s svojo linearnostjo sam po sebi proizvaja malo neželjenih signalov.

Sode harmonike in intermodulacijske produkte sodih redov lahko učinkovito zmanjšamo z uporabo protitaktne vezave ojačevalnika. To je tudi najpomembnejša prednost protitaktne vezave glede na preprosto vzporedno vezavo dveh tranzistorjev.

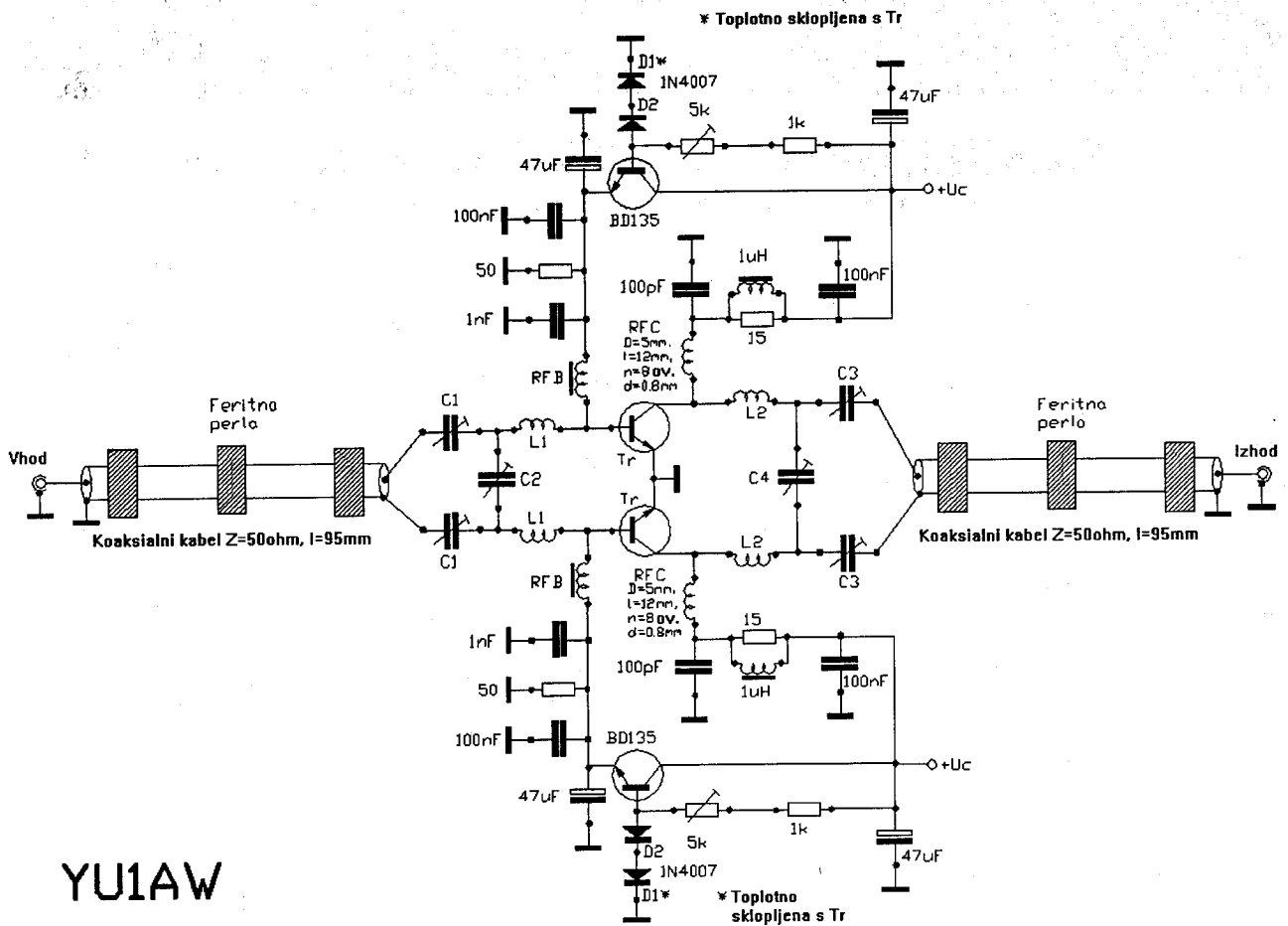
Pri ojačevalnikih v linearnih razredih delovanja (A in AB) je pomembna tudi pravilna izbira vezja za polarizacijo baze, da zagotavlja dobro linearost vhodnega signala, kar je predpogoj za linearno delovanje ojačevalnika. Seveda je pomembna tudi stabilnost kolektorske napetosti, ki mora biti stabilizirana za ojačevalnike do okoli 20V, za višje napajalne napetosti pa zadošča, da je izvor napajanja zadosti "trd" (majhna notranja upornost).

Za linearno delovanje ojačevalnika je usodno pomembna pravilna jakost vzbujanja, ki ne sme biti previsoka, saj je močnostni tranzistor zelo enostavno prekriliti v nelinearno področje delovanja.

Toplotno stabilnost zagotavlja pravilen izbor hladilnega rebra in še pomembneje, pravilna vgradnja močnostnega tranzistorja na hladilno rebro. Za kompenzacijo toplotnega drsenja delovne točke je potrebna toplot-



Slika 1 - Električni načrt ojačevalnika z enim tranzistorjem.



YU1AW

Slika 2 - Električni načrt ojačevalnika z dvema tranzistorjema v protitaktni vezavi.

na povratna vezava, ki glede na temperaturo močnostnega VF tranzistorja popravlja prednapetost na bazi tako, da ostaneta mirovni tok in z njim enosmerna delovna točka Čimbolj stabilna.

Tu so samo na kratko zapisani vsi pogoji, ki morajo biti izpolnjeni, da ojačevalnik lahko nosi naziv kakovosten. Ista tema je bolj obširno obdelana v literaturi (1), kjer so opisane podrobnosti. Kopija tega članka je na razpolago tudi na internetu na objavljenih naslovih (2).

### 3. Ojačevalniki z enim tranzistorjem

Na sliki 1 je prikazan električni načrt močnostnega ojačevalnika z enim tranzistorjem. Prilagoditev vhodne impedance je izvedena z vezjem sestavnimi deli C1, C2 in L1. Delovni Q-faktor vezja znaša okoli 10-15, kar je v tem slučaju optimalna vrednost. Bazna prednapetost se privede preko VF dušilke RFB, ki je običajna feritna dušilka VK200, znana tudi kot dušilka "s šest luknjicami".

TRANZISTOR	Frekvenca [MHz]	Uc [V]	Ic0 [mA]	Icmax [A]	Pdrive [W]	Pout [W]	Izkoristek [%]
BLX15	50	50	50	6.5	15	150	65
BLW76	50	28	50	8	6	90	60
MRF317	50/145	28	10	6.5	12	100	60
MRF238	145	13.8	20	4	3	30	55
2xMRF245	145	13.5	2x30	2x18	35	200	50
2xBLW84	145	28	2x30	2x2	6	60	55
2xMRF247	145	13.5	2x30	2x18	35	200	50

Tabela 2 - Podatki za močnostne tranzistorje.

Izhodno vezje, ki prilagaja tranzistor na 50-ohmski izhod, je izvedeno s sestavnimi deli L2, C4 in C3. Delovni Q-faktor vezja je okoli 10. Vsi kondenzatorji v vezjih za prilagoditev impedance so ARCO keramično-sljudni trimerji ustrezne kapacitivnosti. Izgled teh trimerjev je prikazan na sliki 9.

Vrednosti sestavnih delov za prilaganje impedance na tabeli 1 so računске. Glede na njih izberemo trimer kondenzatorje z ustreznim območjem ugaševanja. Območje kapacitivnosti posameznih trimerjev je označeno s številom, ki je odtiskano na keramičnem telesu trimerja. V tabeli 3 so navedene inačice trimerjev in pripadajoča območja nastavljanja kapacitivnosti. Če je kapacitivnost vaših trimerjev nezadostna, lahko vezete dva vzporedno.

Kolektorska napetost se dovede preko dušilke RFC, ki ni feritna, pač pa je samonoseča zračna tuljava. Dušilko navijemo na notranji premer D=5mm,

TRANZISTOR	FR. [MHz]	C1 [pF]	C2 [pF]	C3 [pF]	C4 [pF]	L1					L2				
						Ind. [nH]	D [mm]	l [mm]	n	d [mm]	Ind. [nH]	D [mm]	l [mm]	n	d [mm]
BLW76	50	36	200	21	46	44	6.5	6	3	1.2	157	12	10	4	1.5
BLX15	50	56	363	20	37	23	6	4	2	1.2	195	15	12	4	1.5
MRF317	50	40	210	24	57	47	10	10	2.6	2	140	15	15	3.7	2
2xBLW84	145	12	33	5	3.3	15	6	3	1.5	1.2	113	10	10	4	1.5
2xMRF245	145	21	50	21	33	7.5	7	3	1	1.5	14	10	4	1	2
2xMRF247	145	21	50	21	33	7.5	7	3	1	1.5	14	10	4	1	2
MRF317	145	6.7	18	13	46	48	10	10	2.7	2	22	15	5	1	2
MRF247	145	18	110	18	80	8	7	3	1	1.5	13	10	4	1	2
MRF238	145	13	67	10	31	14	8	4	1.3	1.5	29	12	5	1.5	2

Tabela 1 - Podatki za tuljave in kondenzatorje za različne izvedbe ojačevalnikov.

TIP ARCO trimerja	Področje kapacitivnosti
404	7 pF - 60 pF
423	7 pF - 156 pF
426	37 pF - 250 pF
462	5 pF - 80 pF

Tabela 3 - Označe in vrednosti trimerjev ARCO.

dolžina dušilke je  $l=12\text{mm}$ , dušilka ima  $n=8$  ovojev in debelina žice je  $d=0.8\text{mm}$ .

Dušilki RFC sledi kondenzator razmeroma majhne kapacitivnosti  $100\text{pF}$ , ki blokira na maso VHF frekvence. Za blokiranje nizkih frekvenc poskrbi kondenzator  $100\text{nF}$ , ki jih vodi na maso preko upora  $150\Omega$ . Dušilka vzporedno z uporom  $150\Omega$  je feritna VK200 ali podobna, ki lahko zdrži velik tok, ki teče skozi tranzistor.

Bazna prednapetost je izvedena s pomočjo tranzistorja BD135, vezanega kot emitorski sledilnik, ki ima izjemno nizko izhodno upornost, kar je predpogoj za stabilno delovno točko. Toplotni nadzor in kompenzacija toplotnega drsenja delovne točke sta izvedena preko diode D1, ki je mehansko tako postavljena, da ima fizični in toplotni spoj z močnostnim VF tranzistorjem (toda ne s hladilnikom!), kar omogoča stabilno delovanje v širokem temperaturnem območju. Druga dioda D2 nadzira temperaturo okolice. Obe diodi sta tipa 1N4007 ali podobni. Tranzistor BD135 je pritrjen na isti hladilnik kot močnostni VF tranzistor.

Nastavljanje delovne točke oziroma mirovnega toka tranzistorja je izvedeno s pomočjo trimer potenciometra  $5\text{k}\Omega$ . V tabeli 2 so navedeni napetosti, tokovi, moči in izkoristki za različne vrste tranzistorjev. Razen elektrolitskih (ali tantalovih) kondenzatorjev so vsi ostali kondenzatorji keramični diski ali podobni za VHF.

#### 4. Ojačevalniki z dvema tranzistorjema

Kot je razvidno iz načrta na sliki 2, tu gre za dva enaka ojačevalnika, ki sta spojena preko vodov za simetriranje in delujeta v simetričnem protifaznem režimu, se pravi v protitaktni vezavi. Vezja za napajanje baze in kolektorja posameznih tranzistorjev so izvedena povsem enako kot v ojačevalniku z enim tranzistorjem.

Edina novost sta dva koščka koaksialnega kabla dolžine  $l=95\text{mm}$  in karakteristične impedanice  $Z=50\Omega$ , ki transformirata asimetrični vhod in izhod ojačevalnika na simetrični spoj dveh tranzistorjev. V simetričnih členih uporabimo tanek teflonski kabel debeline 2-3mm tipa RG-141, RG-142, RG-178, RG-178A, RG-196, RG196A ali podoben.

Koaksialni kabel navijemo v tuljavo ali še bolje na mali feritni toroid ali večjo feritno perlo. V ta namen lahko uporabimo tudi ferit z dvema luknjicama, skozi kateri navijemo en ovaj. Z uporabo dveh takšnih feritov se da naviti tri ovoje. Če nimate toroida, navlečite na kabel male feritne feritne perle z eno luknjico tako, da je na vsakem koncu po ena, še bolje pa več perlic razporejenih po celotni dolžini kabla. Dodatne perlice popravijo simetrijo transformatorja še posebno na nizkih frekvencah, kar je lahko pomembno za stabilnost ojačevalnika.

Kar je zelo pomembno in ne smemo nikakor prezreti, je to, da mora biti cel ojačevalnik karseda simetričen tako v pogledu mehanske razmestitve sestavnih delov kot v električnih parametrih (vrednosti sestavnih delov, tokov in napetosti v posameznih točkah itd.) Samo z dobro simetrijo lahko dosežemo največjo izhodno moč, ojačenje, izkoristek in dušenje sodih harmonikov.

Pri uglaševanju je zelo pomembno obdržati kapacitivnosti C1 in C3 v vezju enega tranzistorja čim bližje vrednostim za drugi tranzistor. To je tudi edina kritična

nastavitev za takšno vrsto ojačevalnika in če jo upoštevamo, vse ostalo ne bi smelo delati težav.

#### 5. Mehanska izvedba

Cel ojačevalnik moramo zgraditi na razmeroma majhnem kosu enostranskega vitroplasta FR4. Ploščico uporabimo z bakreno folijo obrnjeno navzgor, v kateri naredimo majhne otoke za spajkanje sestavnih delov. Priključke emitorja VF tranzistorja zaspajkamo po čim krajši poti na maso ploščice.

Tranzistor moramo vgraditi na dovolj veliko hladilno rebro z obvezno uporabo toplotno-prevodne paste, kot je to prikazano na sliki 3. Površina tiskanega vezja mora biti majhna, da so rebra hladilnika čim bližje tranzistorju. Luknja za vgradnjo tranzistorja ne sme biti prevelika, pač pa se mora točno prilegati vijaku tranzistorja, da bi se tranzistor čim bolj hladil.

Tranzistorji s prirobnico morajo nalegati na hladilnik s celo površino prirobnice. Površina hladilnika, kamor naleže tranzistor ali prirobnica, mora biti povsem gladka. Vhodni in izhodni konektor morata biti pritrjena na ploščico. Če konektorja vgradimo na hladilno rebro ali na škatlo, potem ju spojimo s ploščico preko koaksialnih kablov, kjer prispajkamo maso na obeh koncih kabla. V protitaktnem ojačevalniku ta kabla hkrati služita za simetriranje.

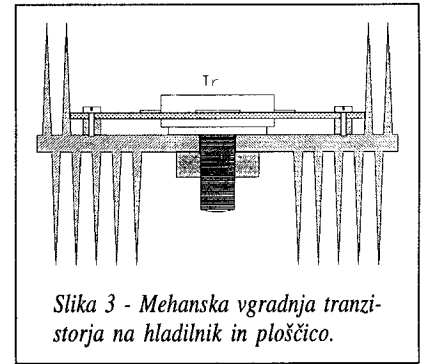
Tuljavi L1 in L2 v prilagodilnih vezjih vgradimo tako, da sta njuni osi pod pravim kotom, da zmanjšamo medsebojni sklop.

#### 6. Oživiljanje in uglaševanje

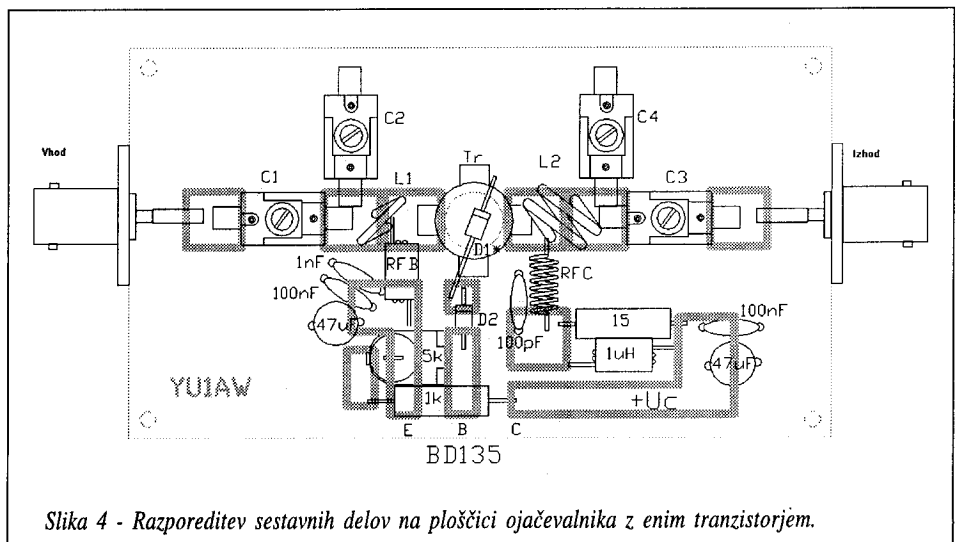
Ko je vse spojeno kot na sliki 4 ali sliki 5, še enkrat preverimo, da ni napak, da ni kratkih stikov na maso in nato nastavimo potenciometre za prednapetost na najvišjo upornost. Potem priključimo napajanje za en tranzistor in nastavimo mirovni tok  $I_{c0}$  na vrednost iz tabele 2 in to čim bolj točno. Nato storimo isto z drugim tranzistorjem. Še bolj pomembno od točnih vrednosti mirovnih tokov je to, da sta mirovna tokova za oba tranzistorja enaka!

Nato priključimo oba tranzistorja na napajanje, izhod pa priključimo na umetno anteno preko pretočnega wattmetra ali reflektometra. Če nimamo umetnega bremena, lahko uporabimo tudi dobro prilagojeno anteno. Na vhod pripeljemo šibek krmilni signal in uglašimo vhodne trimerje za največji kolektorski tok. Nato izmenično uglašujemo izhodne trimerje za največjo izhodno moč.

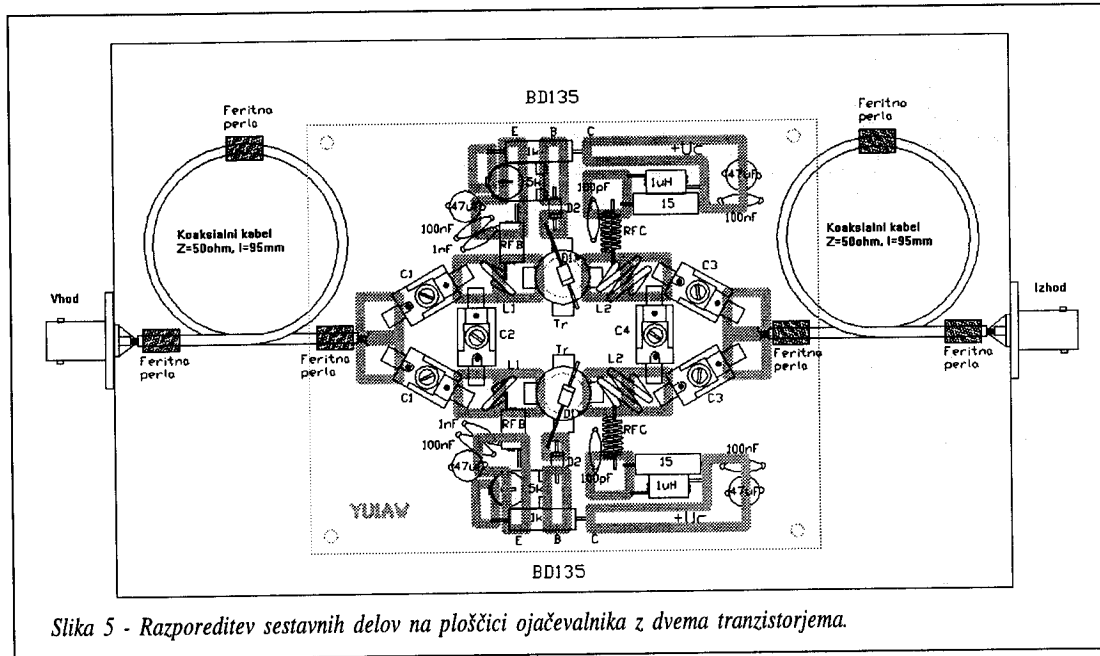
Postopek ponovimo nekajkrat in postopoma povečujemo moč vhodnega krmilnega signala. Na koncu s polnim krmiljenjem uglašimo vse trimerje



Slika 3 - Mehanska vgradnja tranzistorja na hladilnik in ploščico.



Slika 4 - Razporeditev sestavnih delov na ploščici ojačevalnika z enim tranzistorjem.



Slika 5 - Razporeditev sestavnih delov na ploščici ojačevalnika z dvema tranzistorjema.

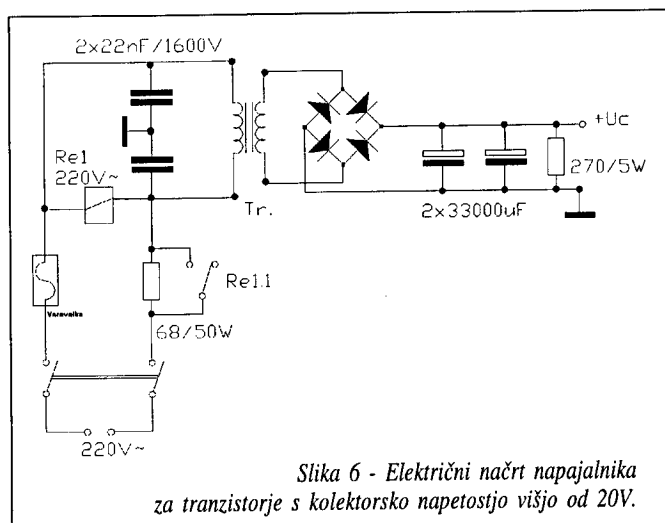
je za največjo izhodno moč in pri tem pazimo, da ne prekoračimo največjega dovoljenega kolektorskega toka  $I_{cmax}$ . Kolektorski tok je med uglaševanjem sploh smiselno stalno nadzirati, da ne prekoračimo največje dovoljene vrednosti.

V slučaju, da se eden ali oba vhodna trimerja C1 in C2 uglašujeta na največjo ali najmanjšo vrednost, poskusimo spremeniti dolžino kabla med vzbujevalnikom in močnostnim ojačevalnikom. S poskusi poiščemo takšno dolžino kabla, da se C1 in C2 uglašujeta na vrednosti iz tabele 1. Pri praktični uporabi ojačevalnika potem seveda vedno uporabljamo isti koaksialni kabel za povezavo do vzbujevalnika (osnovne radijske postaje). Zamenjava radijske postaje lahko zahteva tudi menjavo in ponovno iskanje najustreznejše dolžine povezovalnega kabla. S tem je uglaševanje zaključeno.

Pri protitaktnih ojačevalnikih je zelo pomembno, da vzporedno uglašujemo trimerje v obeh vejah ojačevalnika. Po končanem uglaševanju naj imajo trimerji v obeh vejah približno iste vrednosti, da ne pride do večjih nesimetrij in celo do samoosciliranja ojačevalnika.

## 7. Napajalnik

Za tranzistorje z napajalno napetostjo višjo od 20V lahko uporabimo tudi enostaven nestabiliziran napajalnik, ki je tako načrtovan, da je izhodna napetost dovolj "trdna", kot je to prikazano na sliki 6. Trdnost izhodne napetosti dosežemo s predimenzioniranjem omrežnega transformatorja in elektrolitskih kondenzatorjev.



Slika 6 - Električni načrt napajalnika za tranzistorje s kolektorsko napetostjo višjo od 20V.

Da bi preprečili pregorevanje varovalke ob vklopnem tokovnem sunku polnjenja elektrolitskih kondenzatorjev, je napajalniku dodano vezje za zakasnen vklop. To je enostavno izvedeno z relejem za 220V, kot je prikazano na načrtu. V trenutku vklopa je transformator povezan na omrežje preko upora, ki omejuje tokovni sunek. Ko se elektroliti napolnijo in se umiri prehodni pojav v jedru transformatorja, se tok skozi dodatni upor 68ohm 50W zmanjša in napetost na primarju naraste. Rele se tedaj vključi in kratkosklena upor.

Mnogi na tem mestu uporabljajo releje, ki se

preko elektronskega kasnilnega vezja vključujejo čez nekaj deset sekund. Čeprav izgleda ta rešitev lepša, je neprimerno slabša iz dveh razlogov. Prvič, v slučaju kratkotrajnega izpada omrežne napetosti pride do vklopa brez zakasnitve, ker se elektroliti v elektroniki ne izpraznijo. Drugič, v slučaju okvare, ki zelo poveča porabo napajalnika, se 220V rele sploh ne vključi in tako zaščiti napajalnik, rele z elektronskim kasnilnim vezjem pa seveda ne ščiti ničesar.

Tranzistorje s kolektorsko napetostjo 12-18V moramo napajati s stabilizirano napetostjo. V takšne usmernike obvezno vgradimo tiristorsko "crowbar" zaščito pred prenapetostjo. To vezje mora kratkoskleniti izhod napajalnika in povzročiti pregorevanje varovalke v slučaju, ko izhodna napetost preseže varno mejo, naprimer v slučaju preboja zaporednega stabilizacijskega tranzistorja v napajalniku.

Na ta način z namernim pregorevanjem varovalke preprečimo uničenje dragih visokofrekvenčnih tranzistorjev zaradi previsoke napetosti napajanja. Relejna zaščita se ne priporoča, ker je v tem slučaju prepočasna in preden rele izključi napajanje, je visokofrekvenčni tranzistor že uničen.

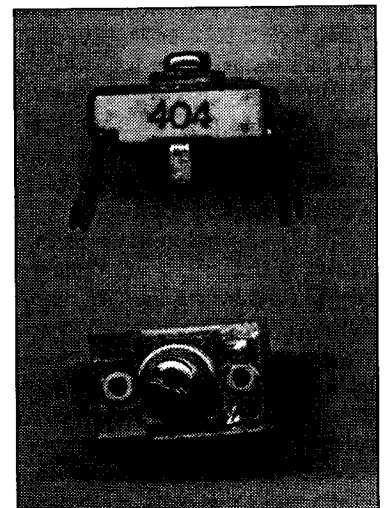
## 8. Zaključek

V članku so prikazani nujni pogoji za izdelavo tranzistorjskih VHF močnostnih ojačevalnikov. Predstavljeni ojačevalniki so načrtovani tako, da se dosežejo najboljši rezultati z enostavno gradnjo in uglaševanjem. Izdelani ojačevalniki so v praksi pokazali rezultate podobne pričakovanjem, kar kaže na upravičenost predlaganih rešitev.

Izgleda tiskanih vezij sta prikazana na sliki 7 in sliki 8. Za tranzistorje v drugačnih ohišjih (s prirobnico) je treba seveda popraviti tiskano vezje in pri tem paziti, da so izvodi emitorjev spojeni na maso po najkrajši poti.

## 9. Zahvala

Zahvaljujem se mojim kolegom, ki so mi pomagali pri praktični izdelavi številnih ojačevalnikov, ki sem jih tekom let načrtoval. Nekateri od njih

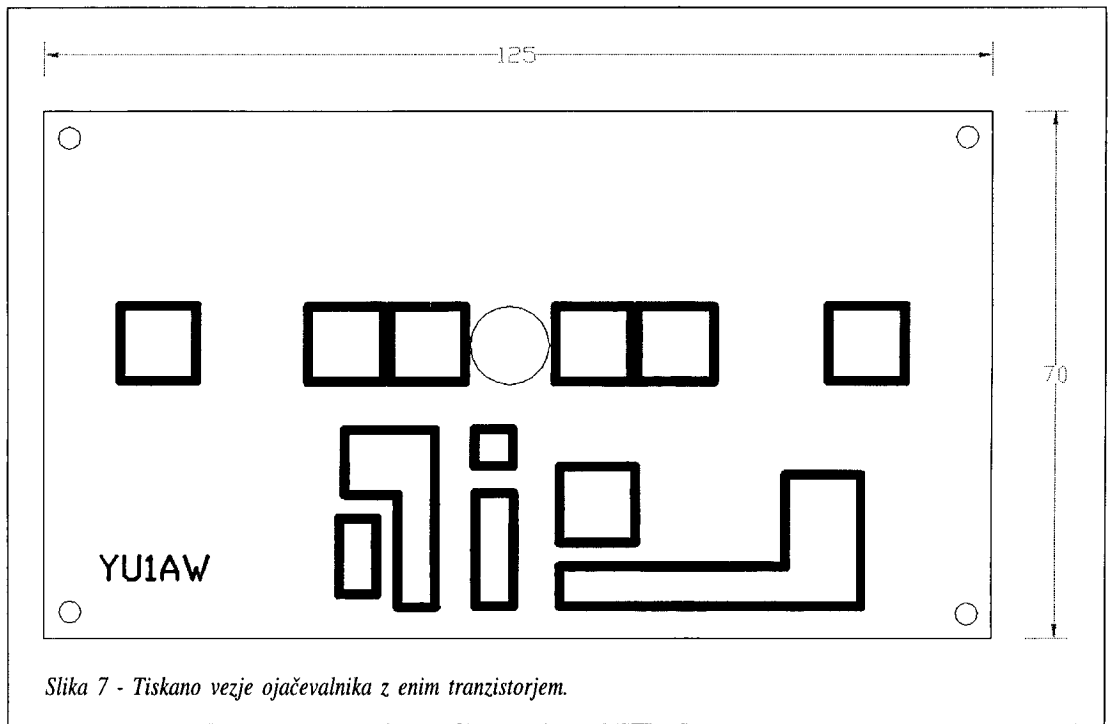


Slika 9 - Izgled keramičnih-sljudnih trimerjev ARCO, ki se uporabljajo v močnostnih ojačevalnikih.

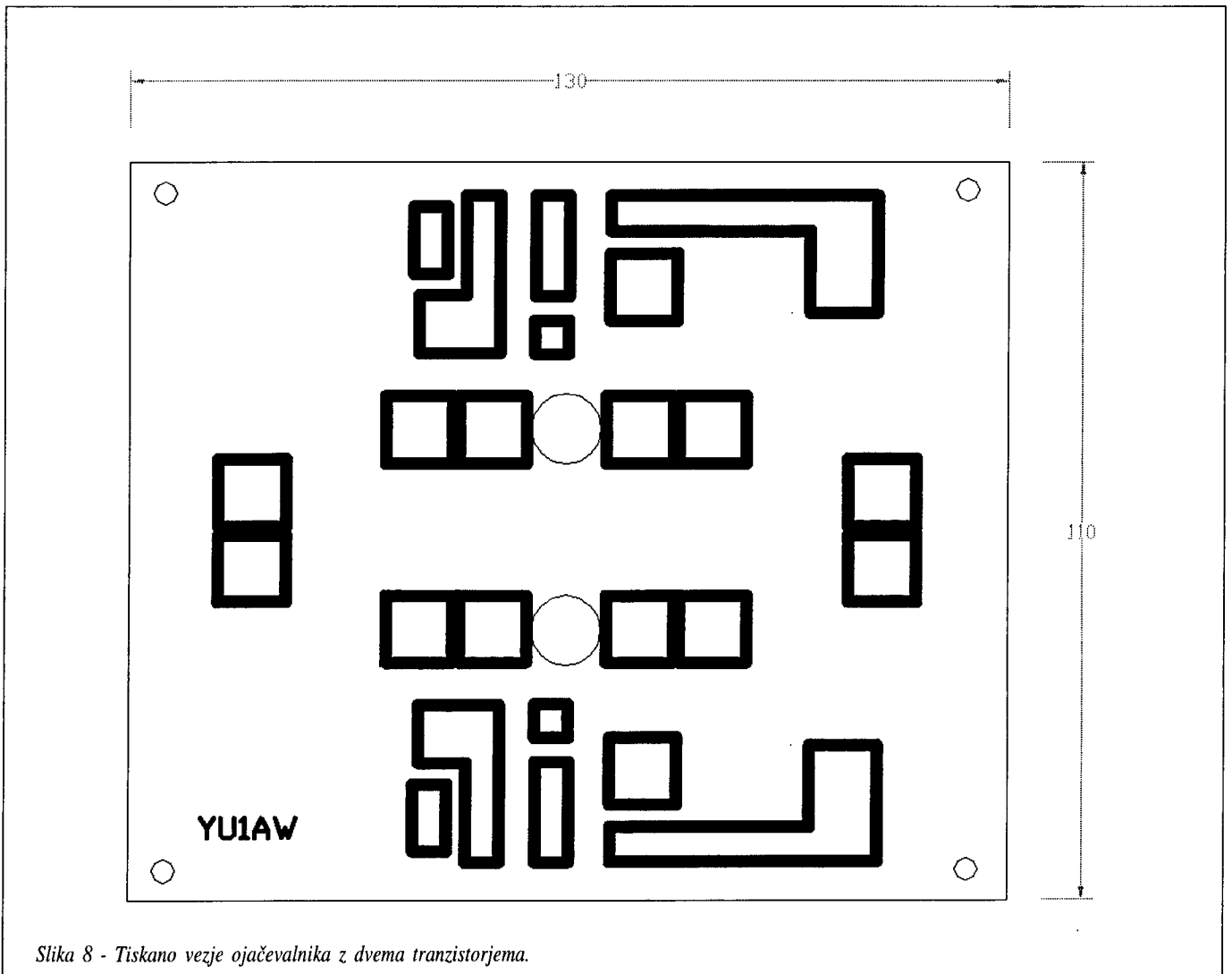
niso tu objavljeni, ker so uporabljali precej redke in težko dostopne tipe tranzistorjev. Toda vsi ostali, za katere sem smatral, da se dajo razmeroma enostavno izdelati in v vseh ostalih lastnostih odgovarjajo večini graditeljev, so zbrani in objavljeni v tem članku.

Literatura:

- (1) Dragoslav Dobričić, YU1AW:  
 "Tranzistorski pojačavači snage za 144 MHz",  
 (I del) "Radioamater" 2/1988 strani 34-37,  
 (II del) "Radioamater" 3/1988 strani 66-68.
- (2) Internet naslovi:  
[www.yu1aw.homestead.com](http://www.yu1aw.homestead.com)  
 in:  
[www.qsl.net/yu1aw/](http://www.qsl.net/yu1aw/)



Slika 7 - Tiskano vezje ojačevalnika z enim tranzistorjem.



Slika 8 - Tiskano vezje ojačevalnika z dvema tranzistorjema.