

Ir. Menno van der Veen

Savremena High-end Cevna Pojačala zasnovana na torusnom izlaznom transformatoru

11 | Izrada Push-Pull Cevnog Pojačavača: Od 10 do 100 Wati

Ovaj članak je posebno koristan za samograditelje. U njemu se nalaze nekoliko izlaznih pojačavača u kojima se koriste standardni VDV transformatori. Za svaki model transformatora postoji pojačavačko kolo koje se pobuđuje obrtačem faze opisanog u poglavlju 10.

11.1 | Odluke, odluke, odluke

Nije praktično detaljno objašnjavati svako pojačalo snage. Mnogo deblja knjiga bi bila potrebna (i naravno mnogo više čitanja). Mi uzimamo opšti pristup, koji objašnjava osnovno kolo pojačavača i vezu sa izlaznim transformatorom. Posle toga, objašnjavamo svaki pojačavač po redu, sa izborom komponenti i posebnih karakteristika. Kada izaberemo osnovno kolo dalja razrada nije veliki problem. Izbor metode koju koristimo za podešavanje optimalne radne tačke izlazne cevi je malo teže. Postoji više varijanti, kao na primer:

- Korišćenje negativnog napona rešetke (NGV)
- Korišćenje katodnog otpornika, tako da cev automatski nalazi svoju optimalnu radnu tačku (auto-bias),
- Automatsko podešavanje, koristeći strujni izvor u katodnom vodu,
- Automatsko podešavanje negativnog napona rešetke u zavisnosti sa izmerenom katodnom strujom,
- Kombinacije gornjih metoda, i
- Poslednje ali ne najmanje: Pametna rešenja izmišljena od strane pojedinih konstruktora.

Jasno je da ima mnogo mogućih rešenja. Ja sam odabrao prvi pristup, koji koristi negativni napon rešetke za postavljanje radne tačke. Ima nekoliko prednosti: Kolo je jednostavno i potpuno isto za svaki tip pojačavača, bilo koja cev može se iskoristiti, i cevi ne moraju biti uparene. Ove činjenice bi trebalo da su dovoljne da nas ubede da je ovaj izbor najelegantnije rešenje. Moramo da napravimo sledeći izbor koji će se veoma odraziti na kvalitet zvuka. Ovaj izbor je razmatran u prethodnim poglavljima: da li da koristimo triode, ultralinear ili pentodni način? Prednost korišćenja NGV načina je ostavljena potpuno na izbor graditelja. Kako ćete videti, ovaj izbor nema uticaja na kolo, obzirom da je suština problema povezivanje rešetke na izlazni transformator. U sledećim šemama ultralinear mod je prikazan iz razloga pojednostavljenja. I sada poslednja prednost korišćenja standardnog kola. U prošlosti, cevi su bile veoma dostupne, mogle su se nabaviti iz Holandije, Engleske, Amerike, iz zemalja Istočnog bloka, sa Dalekog Istoka. To je i sada tako ali jedino što se promenilo je cena ali na žalost u suprotnom pravcu. Nedavno sam čuo da određena standardna ali teško-zanaći cev dostigla cenu od 125 USD za komad. Ova situacija će biti i gora a cene će nastaviti da rastu. To je razlog da koristimo standardne cevi koje su relativno jeftine i mogu se nabaviti. Iz ovih razloga, koristimo EL84 (6BQ5) za pojačavače manjih snaga, i EL34 (6CA7) za veće snage. Neki ljudi ih vole, neki ne, ali iz iskustva sa njima ih preporučujem. Neki ljudi mogu da primete da prava trioda (kao na primer 300B) zvuči mnogo bolje nego EL 34 konfigurisana

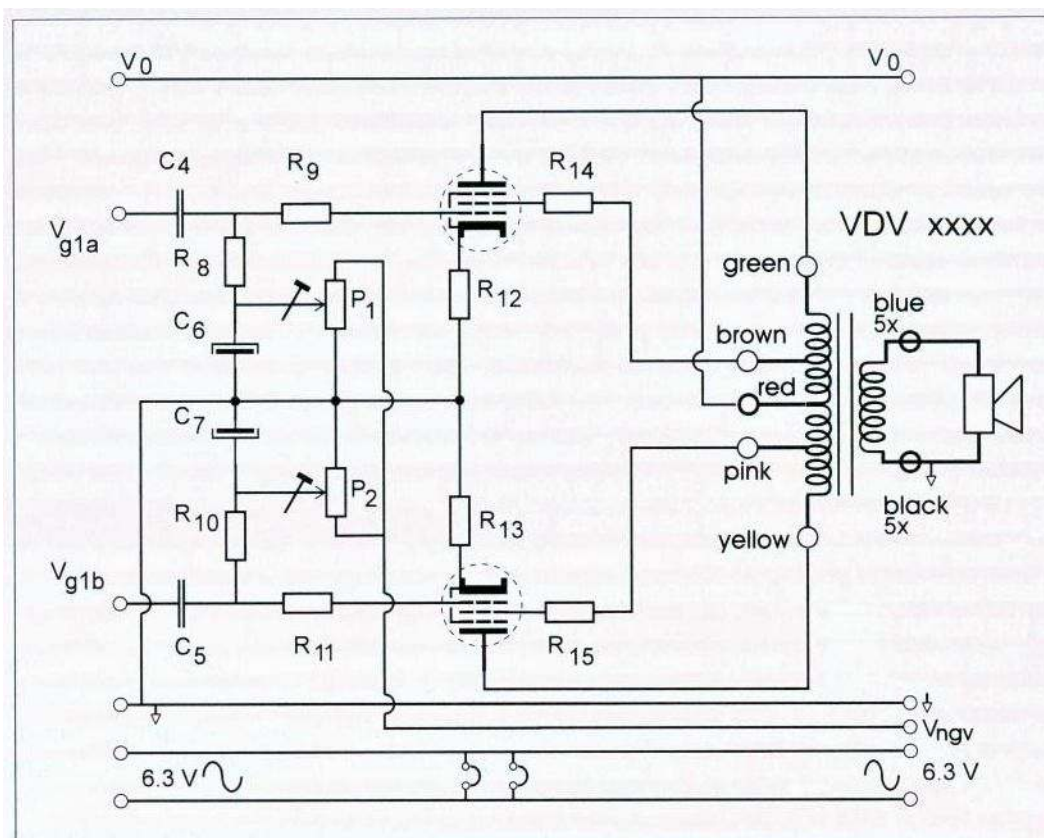
kao trioda. To je tačno, ali Vaš novčanik će presušiti ako insistirate na pravoj triodi. Druge mogućnosti su KT88, KT99 (poboljšana KT88), KT90 i 6550 WA. Moram da naglasim astronomsku cenu ovih cevi. Iskusna osoba koja zna tačno šta radi i može da napravi sve potrebne optimizacije može da koristi skupe cevi, dok standardne tipove cevi mudro koriste početnici, i ljubitelji zvuka kojima glavni razlog gradnje nije koja je cev ugrađena.

11.2 | Osnovno kolo: generalna konstrukcija

Slika 11.1 prikazuje osnovno kolo izlaznih cevi. Oznake delova i veze su prikazane na levoj strani koje su usklađene sa šemom 10.4, tako da ih možete staviti jednu pored druge. Možete uraditi isto sa vodovima napajanja opisanim u poglavlju 12. Vidi se da to kolo ima veoma malo komponenti. Ovo predstavlja apsolutni minimum koji je potreban, a šema je čista i jednostavna. Povrh svega, kolo je dokazano u praksi mnogo puta, i radi dobro.

11.3 | Osnovno kolo: ulazni zahtevi

Generalno, ulazno kolo radi kako je i opisano: Izlazni signali Vg1a i Vg1b iz obrtača faze ulaze u pojačavač preko kondenzatora C4 i C5.



Slika 11.1 Osnovno izlazno kolo sa torusnim izlaznim transformatorom.

Signali prolaze kroz "stop" otpornike R9 i R11 na rešetke izlaznih cevi. Izraz "stop" zahteva pojašnjenje. Ulazna kapacitansa Cgk (nije prikazana na slici) se pojavljuje između pobudne rešetke (G1) i katode svake cevi, jer se one fizički nalaze blizu. Otpornici R9 i R11 sa ulaznim kapacitetom formiraju niskopropusni filter. Ovo utiče jedino na vrlo velike frekvence reda 1 MHz-a. Ako je pojačavač sklon oscilovanju, ovaj niskopropusni filter prigušuje visoke frekvence i efektno zaustavlja oscilovanje. Ovo je objašnjenje za termin ovih otpornika. Vrednosti otpornika R9 i R11 su obično između 1 i 10kΩ, tako da se njihov uticaj ne primećuje ispod 100 do 200 kHz. Ovo u stvari nije tačno da izlazne cevi kada se koriste u

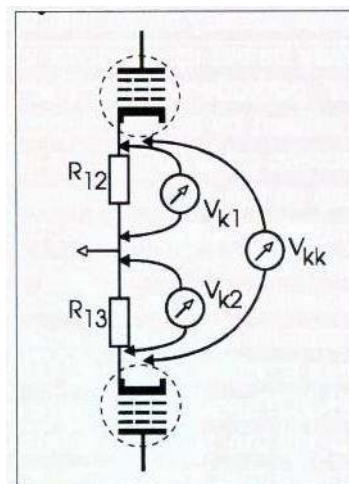
triodnom modu, pošto anoda tada ima veoma jak uticaj u obliku relativno velike Millerove kapacitance. U tom slučaju treba smanjiti otpore R9 i R11. U sredini slike su dva otpornika vezana na rešetke (R8 i R10) i dva trimer potenciometra (P1 i P2). Oni služe za podešavanje negativnog napona rešetke (NGV). R8 i R10 imaju tri različite svrhe. Prvo, osiguravaju da se napon ne može akumulirati na rešetkama. Naponi se mogu akumulirati putem temperaturnog efekta i prazne se preko baze cevi. Ne treba dozvoliti da se napon generiše na rešetkama, pa je potrebno da se uklone brzo i efikasno. To podrazumeva da otpornosti R8 i R10 ne treba da budu prevelike. Prihvatljivo je da budu između 47kΩ i 470kΩ. Drugo, kroz ove otpornike teče negativna struja rešetki izlaznih cevi. One su povezane na trimer potenciometre P1 i P2. Tačna vrednost otpora nije toliko važna. 100kΩ do 1MΩ bi trebalo da bude dovoljna. Treća i poslednja svrha može biti iznenađujuća. Ovi otpornici formiraju visoko propusni filter sa kondenzatorima C4 i C5. Prelazna frekvencija ovog filtera je približno 20Hz. To znači da će frekvence ispod 20Hz biti oslabljene i neće doći u potpunosti do izlaznih cevi. To ima vrlo pozitivan efekat ako je previše basova problem, što je pomenuto u poglavlju 2. Slučajno, niski damping faktor će povećati količinu basova. Ako ima previše basova, možemo smanjiti vrednosti R8 i R10 podjednako. Tu je takođe i četvrta, manje važna funkcija. R8 i R10 opterećuju obrtač faze, pa oni određuju maksimalnu vrednost "muzičkog" napona potrebnog za pobudu izlaznih cevi. Ovo objašnjenje je veoma korisno, pošto jasno pokazuje da ova dva otpornika imaju bar četiri svrhe u isto vreme. Ova situacija se često pojavljuje u cevnim pojačavačima. Dobri konstruktori se ne slažu često međusobno oko osnovnog kola, ali svi oni imaju sopstvene načine optimizacije vrednosti komponenata. Ja sam svesno napravio više odluka koje se odnose na ovo kolo. Nakon razmatranja svih argumenata, izabrao sam 100kΩ za R8 i R10. Ovo predstavlja optimizaciju. Vrednosti kondenzatora C4 i C5 (82 do 100 nF svaki) postavlja -3dB tačku visokopropusnog filtera na 20Hz. Drugim rečima, na 20Hz postoji slabljenje -3dB u odnosu na 1kHz. To čini dva posebna efekta: prvo, uklanja "rumble" brum gramofonske igle i jake signale sa CD-a. Većina zvučnika čak i ne može da reprodukuje ove zvuke, tako da nema svrhe pojačavati ih. Drugo, izbegava moguće zasićenje jezgra izlaznog transformatora pri punoj snazi, koje je najviše na frekvencijama ispod 20Hz. To takođe potvrđuje izbor gde postaviti -3dB tačke zvuka. Sve ovo nije čujni efekat. Ako insistirate na reprodukciji nižih frekvencija do 1 Hz, tada jedino morate povećati vrednost C4 i C5 20 puta (do približno 2μF). U nekim kolima pojedinih pojačavača koja će biti opisana kasnije u ovom poglavlju, videćete nekoliko primera izlaznih cevi povezanih paralelno. U tim slučajevima otpornici R8 i R10 su takođe duplirani i spojeni paralelno, koji povećavaju opterećenje obrtača faze. Videćete da su u tom slučaju izabrane različite vrednosti za C4, C5, R8 i R10 kako bi postigli optimalni kompromis sa obrtačem faze. U svakom slučaju ja sam radio na bazi postavljanja -3dB na 20Hz.

11.4 | Osnovno kolo: podešavanje NGV

Negativni prednapon pobudnih rešetki se podešava pomoću dva trimer potenciometara P1 i P2. Kondenzatori C6 i C7 odvođe svaki talasasti napon na zemlju. Mirna anodna struja za svaku izlaznu cev je definisana za svako pojačavačko kolo. Nema podešavajuće tačke NGV na određeni napon zato što cevi nisu identične (čak i kada su kupljene kao uparene, postoje uvek male razlike). Pravi pristup je podešavanje prednapona kako bi se postigla odgovarajuća anodna struja. To svakako znači da je tu struju potrebno izmeriti. Zbog toga dva otpornika od 10Ω R12 i R13 su postavljeni između katoda i zemlje. Lako možemo izmeriti napon na svakom od ovih otpornika običnim voltmetrom kada je pojačavač uključen. Pretpostavimo da je anodna struja 50mA. Tada je napon na katodnim otpornicima jednak:

$$V_k = R_k I_k = 10 \cdot 0.050 = 0.50 \text{ V} \quad [11-1]$$

U praksi ovaj način podešavanja mirnih anodnih struja je veoma praktično. Pretpostavimo da smo podesili trimer potenciometre tako da su naponi na dva katodna otpornika (V_{k1} i V_{k2}) približno jednaki. Tada priključimo voltmetar između dve katode (V_{kk}) umesto na svaki pojedinačni otpornik. Ako su anodne struje na obe izlazne cevi jednake, mereni napon treba da bude nula volti. Ako to nije slučaj, tada možemo izjednačiti razliku pomoću samo jednog trimer potenciometra. To znači da balans anodnih struja možemo vrlo tačno da podesimo. To se čuje na zvučniku, gde će te primetiti da mrežni brum 50 ili 60Hz može svesti na nečujni nivo.



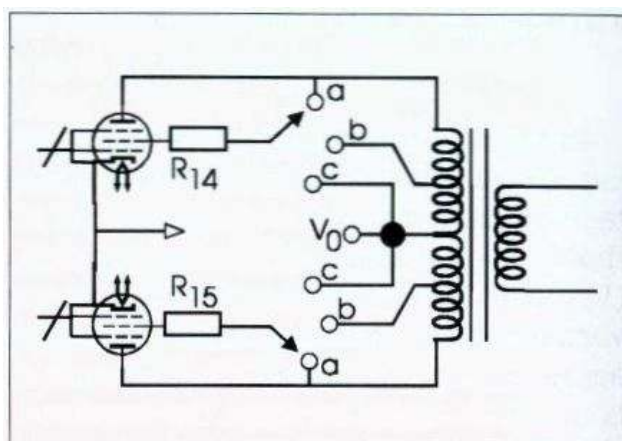
11.5 | Stabilizacija izlaznih cevi

Široko je poznata činjenica da nove cevi hoće da "pobegnu" sa njihovih optimalnih radnih tačaka. Slede važne napomene. Nove cevi zahtevaju određeno vreme da se stabilizuju kada se prvi put stave u pogon. Proizvođači pojačavača vode računa o tome, pa mnogi "razrađuju" svoje pojačavače određeno vreme. To se radi tako da se prvo uključenje vlakna cevi vrši 30 minuta bez prisustva visokog napona (drugim rečima, pojačavač je u standby modu; pogledaj poglavlje 12 za više informacija). Cevi će se tada prilično zagrejati. Posle toga, uključi se visoki napon i NGV se podesi na optimalnu radnu tačku. Pojačavač se tada optereti zvučnikom, ili veštačkim opterećenjem, a na ulaz se dovede jaki signal (sinusnog ili kvadratnog oblika približno 1 kHz, ili čak glasna muzika) i pusti da radi nekoliko minuta. Ceo proces se ponavlja koliko je potrebno, sve dok se ne uoci beznačajni pomak. Ponavljanje podešavanja nekoliko puta obično je dovoljno da se osigura da se ne mora ponovo dodatno podešavati barem šest meseci, obzirom da su cevi sada došle u stabilan režim rada.

Slika 9.1 Izjednačavanje anodnih struja korišćenjem katodnih voltmetara V_{k1} i V_{k2} i razlikom katodnih napona V_{kk}

11.6 | Povezivanje izlaznog transformatora

Nema se mnogo reći za povezivanje izlaznih cevi sa izlaznim transformatorom. Ranije smo napomenuli da se cevi mogu podesiti kao triode, ultralinear, ili kao pentode. To se može izvesti povezivanjem zaštitne rešetke (G2) sa anodom, na srednji izvod izlaznog transformatora, ili na napon napajanja, respektivno. Verovatno ste već primetili da su zaštitne rešetke povezane preko otpornika R_{14} i R_{15} 150 Ω svaki (vidi sliku 11.3). Ovi otpornici su veoma važni za bilo koji mogući mod, što znači da su oni uvek povezani sa zaštitnim rešetkama a kasnije sa različitim tačkama na kolu, u



Slika 9.1 Povezivanje za tri različita moda rada

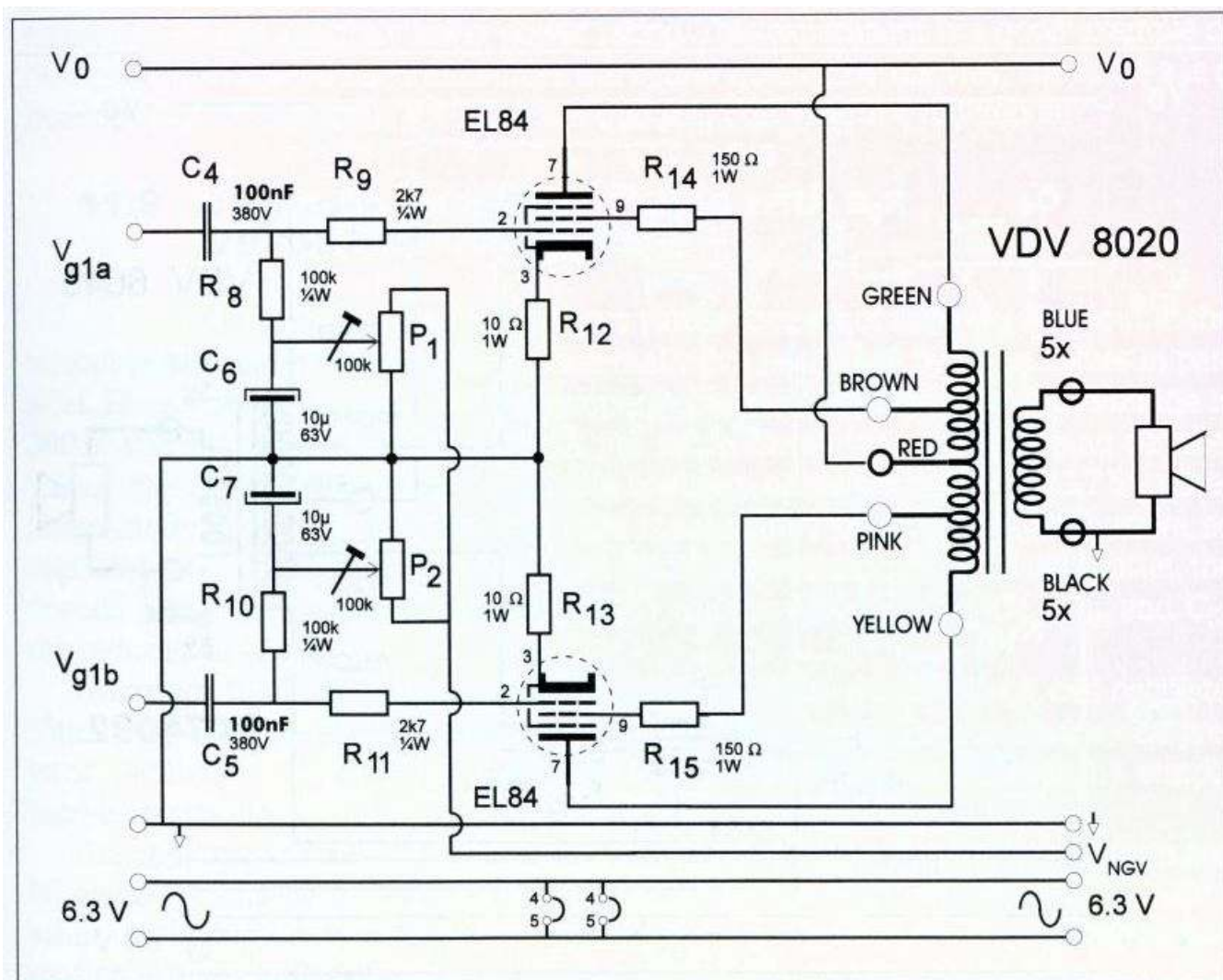
zavisnosti od moda rada. Otpornici R14 i R15 imaju svrhu da spreče oscilovanje i da ograniče struju prema zaštitnim rešetkama. U određenim okolnostima, može biti korisno postaviti selektor moda u pojačavač kako bi lako mogli da promenimo mod rada.

Upozorenje: nikada ne menjamo mod dok je visoki napon priključen na cevi!

U suprotnom možete čuti u zvučnicima jak prasak. Prvo, isključimo visoki napon, promenimo mod, pa ponovo uključimo visoki napon. Takođe treba obratiti pažnju na boje izvoda transformatora. Svi VDV torusni transformatori su identično označeni bojama, kako bi povezivanje izlaznih transformatora bilo lako. Jedino je drugačije kada se koristi poseban predpojačavač, a to je opisano u poglavlju 15.

11.7 | 10 Wati sa dve EL84 sa VDV8020PP (PAT4000)

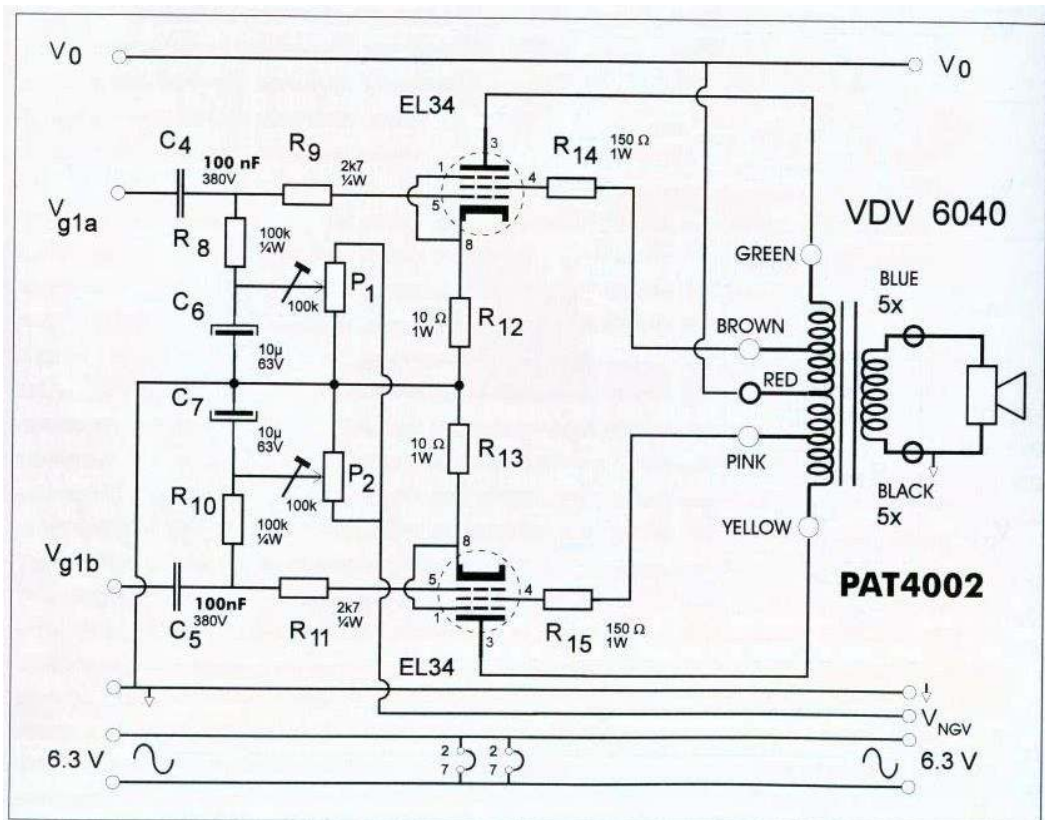
Slika 11.4 pokazuje šemu kola ovog pojačavača, sa označenim nožicama cevi EL84 (6BQ5). Anodni napon je 330V a struja je 40 mA. Napon na R12 i R13 će biti 0.4V ako je NGV pravilno podešen. Sa ovim naznačenim vrednostima, disipacija svake EL84 je za nijansu viša nego što je deklarisan maksimum od 12 Wati. Iz iskustva znam da cev nema problema sa tim. U stvari, EL84 daje malo više i osigurava dobru tranzijentnu reprodukciju na većim snagama. Dobrih 5 wati, audio snage je moguće dobiti u modu triode. Ultralinear mod daje 10 wati, dok pentodni mod daje 17 wati sa 5% izobličenja (po specifikaciji iz kataloga cevi). Informacije za ispravljački deo se nalaze u poglavlju 12.



Slika 11.4 10 watni pojačavač sa dve EL84

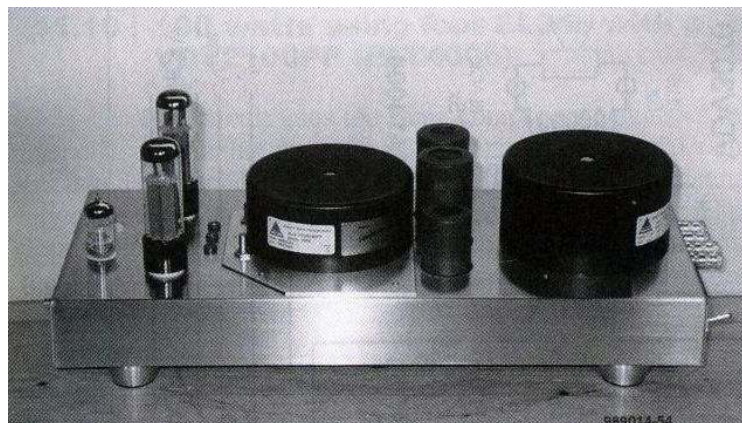
11.8 | 30 wati sa dve EL34 sa VDV6040PP (PAT4002)

U ovom pojačavaču, EL34 (6CA7) izlazne cevi su lagano opterećene. Naš cilj ovde je da radna margina ne pređe bilo koju kritičnu vrednost. Moguće je dobiti više snage iz EL34, ali konzervativna konstrukcija ovog kola daje vrlo miran, opušten i stabilan zvuk. Anodni napon je 380V a struja je 60mA po cevi. U triodnom modu, izlazna snaga je 13 W; ultralinear daje 33 W a pentodni mod daje skoro 40 W. Triodni mod je posebno dobar u produkciji finih zvučnih detalja, i dampira zvučnik optimalno. Vidi slike 11.5 i 11.6. Interesantno je pokušati da se zamene EL34 sa EL34-s cevima. Stakleni omotač EL34 je tanji, i konstrukcija anode i rešetki je drugačija. Po pitanju kvaliteta zvuka, postoje znatne razlike. Sa EL34 basovi su mekaniji i manje čvrsti, a visoke frekvencije su više "blagi". Glavni uzrok ovih razlika je



Slika 11.5 30 watni pojačavač sa dve EL34

razlika u unutrašnjoj otpornosti cevi. EL34-s ima malo veću unutrašnju otpornost. Takođe ima i malo manju snagu. Ovaj eksperiment je dobar primer kako tip cevi ima uticaj na kvalitet zvuka. Uzgred rečeno, EL34-s je tetroda dok je EL34 prava pentoda. Slušaj razliku!



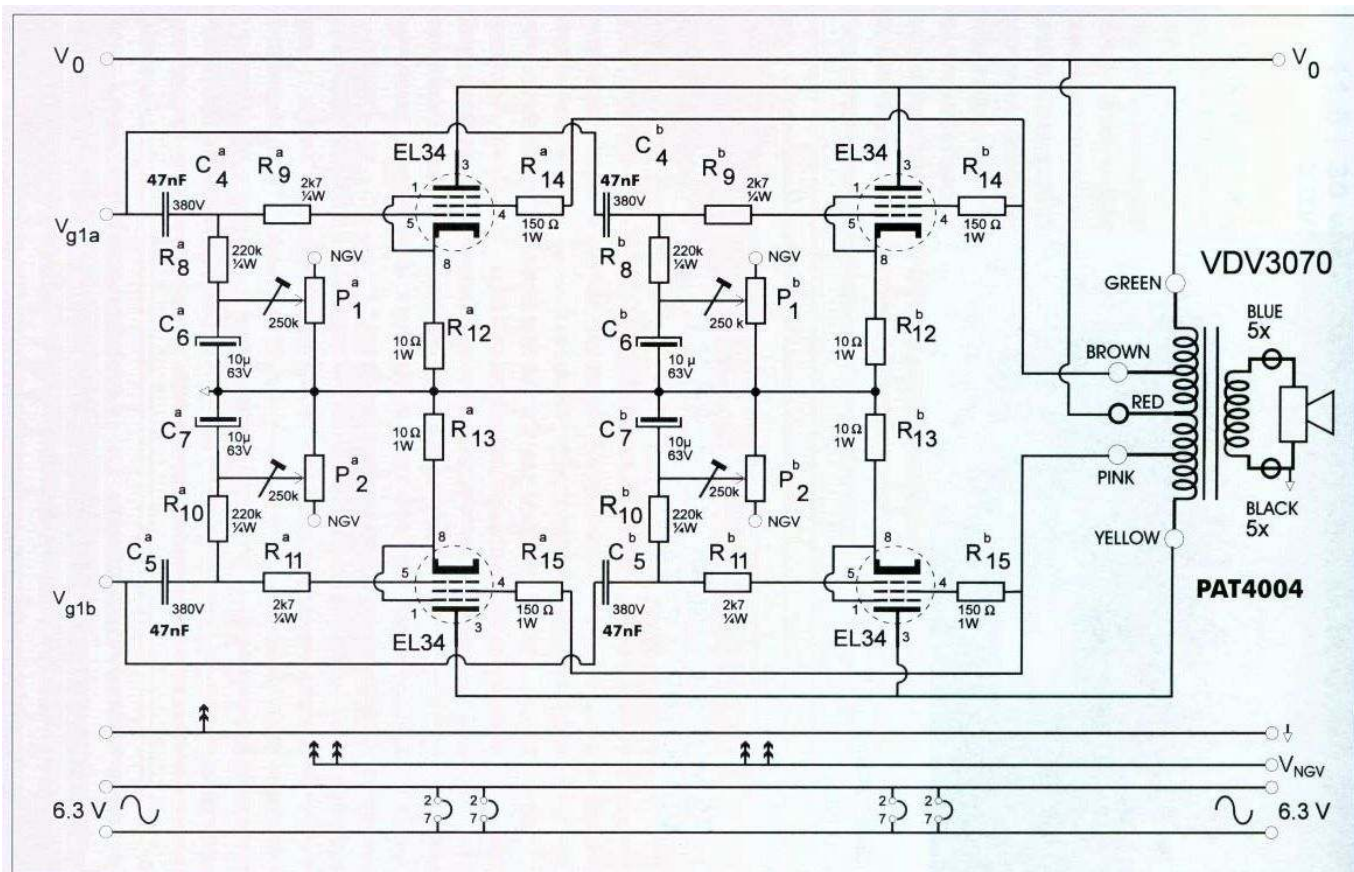
Slika 11.6
Vrlo atraktivan
primer 30 watnog
balansnog
pojačavača

11.9 | 70 wati sa četiri EL34 i sa VDV3070PP (PAT4004)

Ovaj pojačavač koristi četiri izlazne cevi umesto dve. Možno da udvostručimo izlaznu snagu i prepolovimo efektivnu unutrašnju otpornost cevi vezujući cevi u paralelu. Ponovo cevi rade konzervativno; anodni napon je 380 V a struja je 60 mA po cevi. Pošto su sada cevi vezane paralelno, šema kola je komplikovanija, i prikazana je na slici 11.7 za ultralineararni mod (preklapajući). Naglašavam da je podešavanje NGV ostalo posebno za svaku cev, pa je potrebno kondenzatore C4 i C5 duplirati. Kako bi izbegli preopterećenje obrtača faze, otpornici pobudne rešetke su promenjeni na 220 k Ω i vrednosti C4a, C5a, C4b, i C5b su smanjeni na 47 nF.

Upozorenje: veliki frekventni opseg ovog pojačavača znači da može da proosciluje. Razmislite veoma pažljivo gde postaviti tačke uzemljenja! Dobar izbor može da spreči oscilovanje. Ako i dalje dolazi do oscilovanja, rešićemo problem ako prosto povećamo vrednosti R9, R11, R14 i R15.

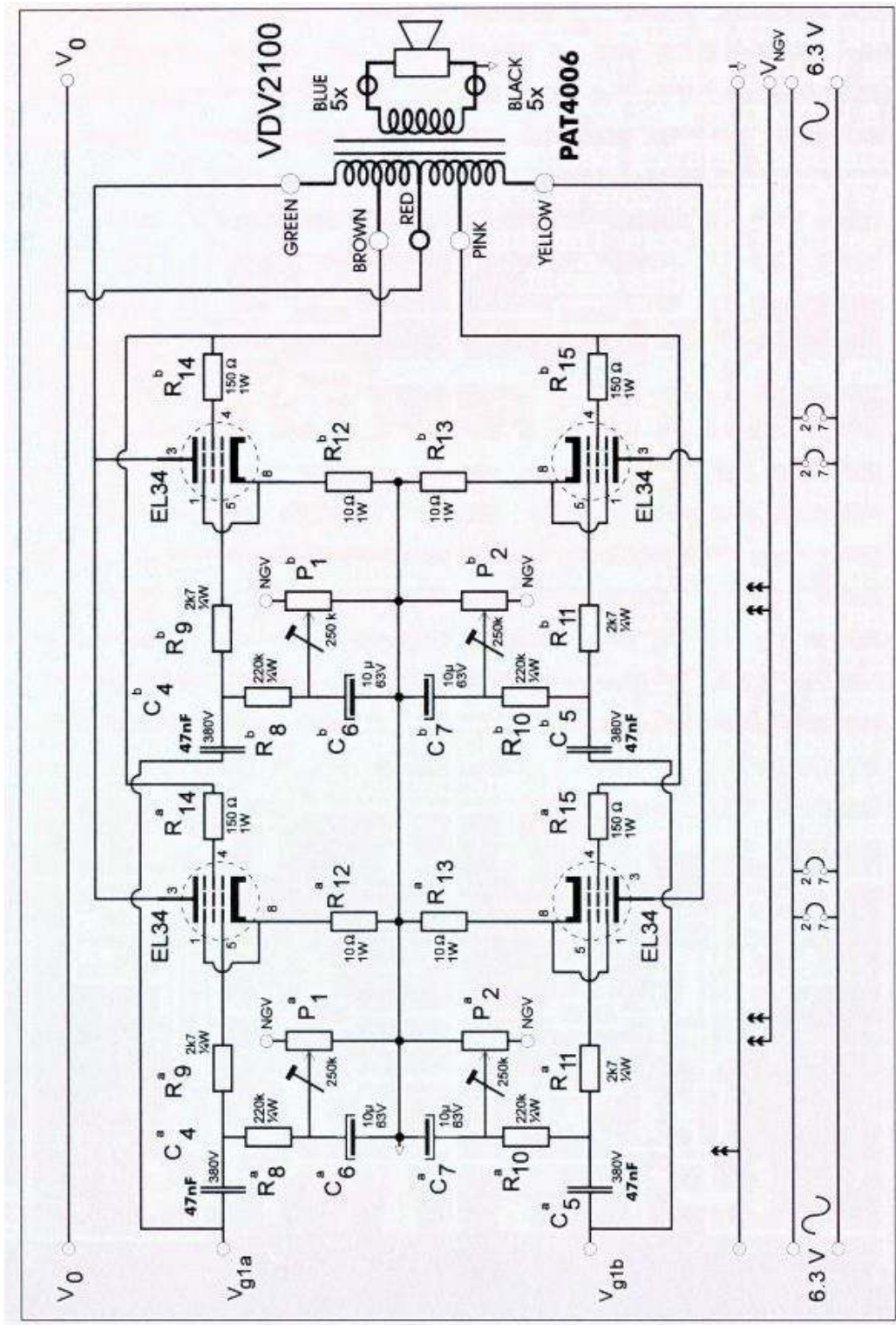
Ovaj pojačavač daje 30 wati u triodnom modu, 70 wati u ultralineararnom modu i 80 wati u pentodnom modu. Ponovo, triodni mod daje naj bolji kvalitet zvuka, dok ultralineararni mod može da se izbori sa mrežnim varničenjem. Informacije o napajanju su date u poglavlju 12.



Slika 11.7 70 watni pojačavač sa četiri EL34

11.10 | 100 Wati sa četiri EL34 sa VDV2100PP (PAT4006)

Ovo kolo koristi iste komponente kao i predhodni. Glavna razlika je da je anodni napon povećan na 450 V i mirna anodna struja je smanjena na 50 mA po cevi. Podešavanje mirne anodne struje mora da se izvede veoma pažljivo kako ne bi došlo do prekoračenja maksimalne disipacije. Veći anodni napon daje mnogo veću izlaznu snagu. Karakteristike ovog pojačavača su još uvek "high end", može se koristiti kao odlično razglasno ili gitarsko pojačalo, zbog njegove velike izlazne snage.



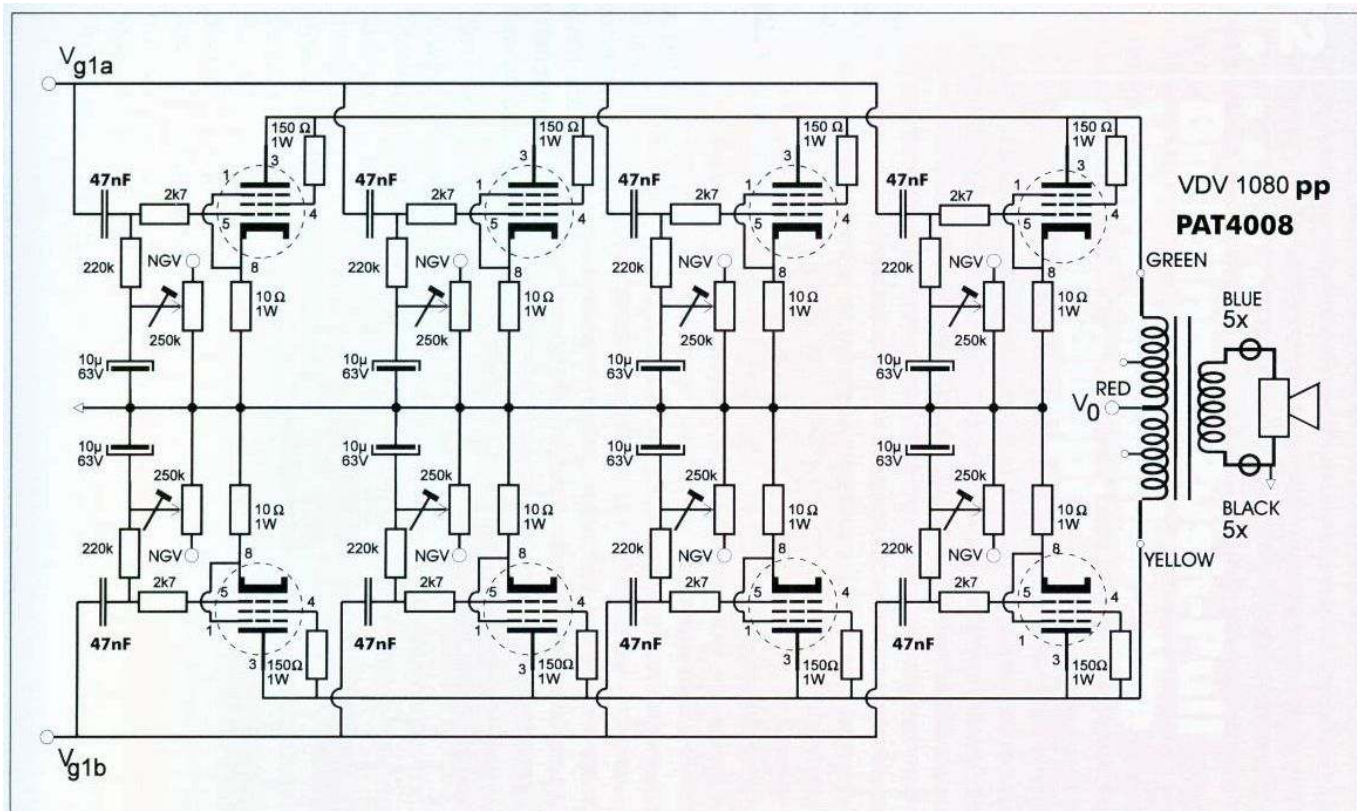
Slika 11.8 100 W push-pull pojačavač sa četiri EL34

11.11 | 80 Wati sa osam EL34 u triodnom modu sa VDV1080PP (PAT4008)

Možda će Vaše opredeljenje biti triodni mod izlaznih cevi. Možete takođe poželeti mnogo izlazne snage. To sve znači da Vam treba osam EL34 koje rade na 450 V, sa anodnom strujom od 50mA po cevi. Kolo je prikazano na slici 11.9. Kao i pre, NGV se može podešavati nezavisno za svaku cev. Anodna struja mora biti proverena da bude 50 mA kao što je zahtevano. Ako upoređujete karakteristike ovog pojačavača sa prethodnim 100 watnim, videćete da je triodni mod optimizovan u velikom stepenu dok je izlazna snaga ostala velika. Ovaj odvažan pojačavač radi ekstremno dobro sa cevima sa jednakom transkonduktansom i internom otpornošću, što znači da je vrlo dobra ideja da cevi budu uparene. Šta bi se dogodilo ako bi promenili u ultralinearni ili čak pentodni mod? Mnogo više izlazne snage se može dobiti, ali jezgro transformatora nije podobno ja ove modove. Niske frekvencije mogu zasiti jezgro. Ovaj transformator je specijalno razvijen za 80 W u triodnom modu koji se koristi u ovom kolu.

11.12 | Rezime i zaključci

Razmotrili smo pet različitih izlaznih pojačavača sa različitim izlaznim snagama i modovima rada. Interesantno je podvući da sličnosti u kolima, što ilustruje ideju da se cevni pojačavači mogu dizajnirati po standardnom konceptu. Glavni razlog ovih sličnosti je korišćenje negativnog napona rešetke radi dovođenja cevi u optimalnu radnu tačku. Takođe smo razmatrali efekat izlaznog pojačavača na obrtač faza, gde je potrebno vrednosti kondenzatora C4 i C5 i otpornika R8 i R10 menjati. Zaključili smo potrebu pažljivog uzemljavanja radi prevencije oscilovanja, i podvukli da povećanje vrednosti stop otpornika može rešiti ovaj problem u potpunosti. Odgovarajuće uzemljenje takođe otklanja brum.



Slika 11.9 Pojačavač sa osam EL34 u triodnom modu