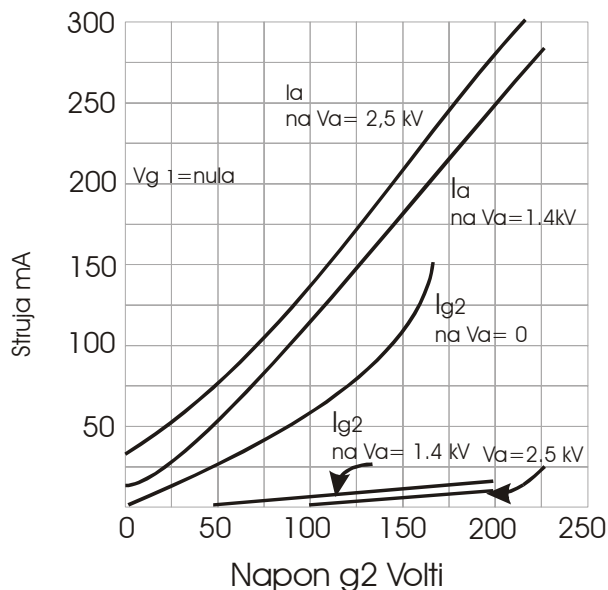


LINEARNI POJAČIVAČ G2DAF

Preveo i obradio Sejo Sudić T97C

Sa povećanjem upotrebe SSB uređaja rastao je i interes za pojačivač snage. Dobar dio radioamatera zainteresovanih za pravljenje linearnih pojačivača (linearaca) je uvijek nastojao da poboljša konstrukciju eksperimentišući sa raznim cijevima i klasama izvedbe. Sva ta iskustva su umnogome doprinijela poboljšanju raspoloživih korisnih informacija potrebnih za projektovanje linearnih pojačivača.

Šeme koje će biti opisane u ovom članku su rezultat eksperimenata koje je autor (G.R.B Thornley – G2DAF op.p.) radio nekad davno. Tadašnji interes je bio da se uproste postojeće šeme tako da bi se mogle koristiti neke tetrode ili pentode bez prednapona i uz to da se izbjegne otpornik u kolu zaštitne rešetke, dodatni stabilizatori, stabilizatorska kola sa diodama i dodatno napajanje. Početni eksperimenti su izvršeni sa Mullardovim cijevima QY3-125 (4-125A) paralelno sa pasivnim ulaznim kolom rešetke. Pokazalo se da će cijevi raditi i ako je prednapon jednak nuli i da je upravljanje anodnom strujom vrlo dobro u vrlo širokom području promjenom napona zaštitne rešetke od nule do neke pozitivne vrijednosti. Uradjena je serija testova i mjerenja da bi se odredila statička karakteristika anoda-zaštitna rešetka za različite vrijednosti anodnog napona. Na slici 1 je predstavljen grafik sačinjen na osnovu rezultata dobijenih u toku eksperimenata.



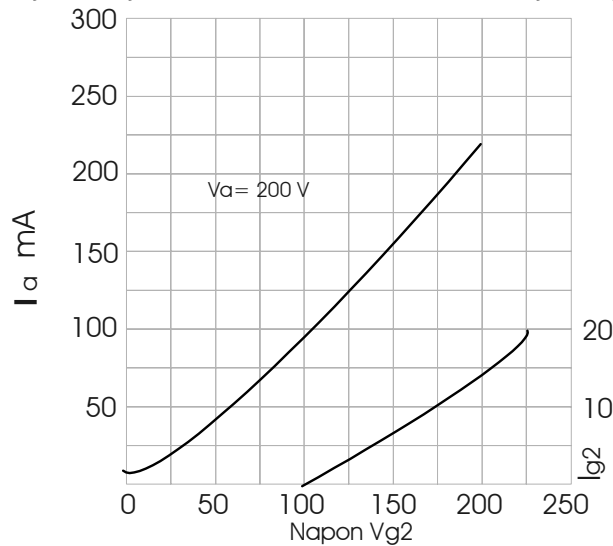
Slika 1 Statička karakteristika anode i zaštitne rešetke za dvije QY3-125 tetrode sa upravljačkom rešetkom na nultom potencijalu

Iz kataloških podataka za dvije QY3-125 u klasi AB1 pri naponu od 2.5 kV se vidi da "povuku" maksimalnu struju od 222 mA (111mA po cijevi) kod jednotonskog signala. Čak i letimičan pogled na krivulju na Slici 1 pokazuje da je upravljanje zaštitnom rešetkom linearno u širokom rasponu anodne struje, od struje mirovanja pa sve do vrijednosti koja je veće od kataloške vrijednosti za maksimalan signal. Uz to vrlo je mali uticaj promjena anodnog napona na ukupni stepen upravljanja. Nadalje je

utvrđeno da upravljačko kolo zaštitne rešetke nije uopšte zahtijevno u pogledu napajanja. Na 2.5 kV anodnog napona i sa 625 W inputa potrošnja je 6mA na 200 V što iznosi samo 1,2 W. Pri 1,4 kV anodnog napona potrošnja je 10mA na 190 V tj. 1,9 W.

U stvarnim (radnim) uslovima svaki pozitivni VF ciklus na upravljačkoj rešetki uzrokuje da anodna struja svaki put poteče od struje mirovanja do maksimalne vrijednosti. U isto vrijeme anodni napon padne a struja zaštitne rešetke raste do svoje maksimalne vrijednosti. Ako je trenutni pad anodnog napona suviše veliki, struja zaštitne rešetke će biti izuzetno velika. I ovo je prikazano na Slici 1 vrlo jasno. U uslovima ispod 1400 V, $I_{g2max} = 10mA$. Ako je $V_a = 0 V$, I_{g2max} će porasti do 160mA.

U praksi se smatra sa uobičajenim visokim naponom da minimalna vrijednost ne pada ispod 200V i predstavlja normalne radne uslove. Radjeni su testovi sa konstantnim naponom od 200V. Napon zaštitne rešetke je povećavan od nule u koracima od po 20 V. Izvršena su očitavanja struja zaštitne rešetke i anode. Sve je to prikazano na Slici 2.



Slika 2. Grafik predstavlja struje anode i zaštitne rešetke u statičkim uslovima za različite vrijednosti napona zaštitne rešetke i sa konstantnim anodnim naponom od 200 V

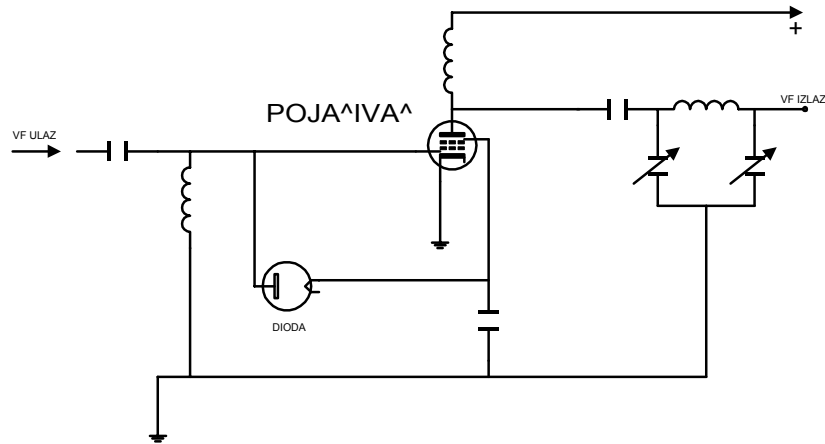
Kako se je i očekivalo odnos između struje zaštitne rešetke prema naponu je sasvim mali. Na 200 V struja na zaštitnoj rešetki je bila 13mA. Čak i na mjestima gdje napon raste za 20 V i gdje se očekivalo da struja skokovito raste, vrijednost je bila samo 20 mA. Posebno interesantno je napomenuti da potrošnja na g_2 pri anodnoj struji od 230 mA i naponu g_2 od 200 V nije bila veća od 2,6 W.

U ovom trenutku imamo sasvim dovoljno podataka iz statičke karakteristike da bi smo mogli predstaviti sliku stvarnog režima rada. To bi izgledalo ovako :

1. Odnos anodne struje prema naponu zaštitne rešetke će biti izvanredno linearan.
2. "Nulti signal" anodne struje i pri tome statička disipacija anode treba da bude vrlo niski.
3. "Nulti signal" anodne struje treba da ima povoljnu vrijednost za klasu AB u širokom rasponu anodnog napona.
4. Maksimalna potrošnja u kolu g_2 treba da bude manja od 5 W.

Nameće se slijedeći zaključak: Potrošnja zaštitne rešetke od 5 W je mali dio od ukupno raspoložive VF energije eksajtera koji pobudjuje linearac i pri tom bi trebalo biti izvodljivo da se potrebni napon zaštitne rešetke dobije direktno iz ulaznog signala.

Slijedeći korak je bio da se sastavi osnovna šema kola prikazanog na Slici 3. i da se



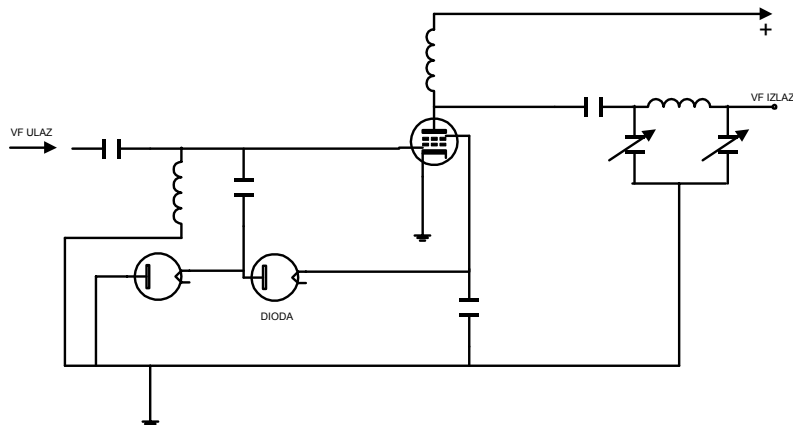
Slika 3 Osnovna šema G2DAF Linearca

konvertuje postojeća klasa AB1 pojačivača u novu šemu za testove "u živo". U jesen 1961 godine G2DAF je uradio priličan broj veza sa ovim pojačivačem na 80m i prikupio znatan broj raporta koji su poslužili za daljnje analize. Od uradjenih stanice kojima je bilo objašnjeno da se radi o novom linearcu je zatraženo da ocjenjuju i kvalitet modulacije kao eventualne devijacije u signalu. Sve stanice su se povoljno izjasnile u pogledu čistog signala (modulacija) i zanemarljivim distorcijama signala.

Nakon dobijanja ove praktične potvrde teorijskom modelu, uradjena je još jedna serija dijagrama koji pokazuju karakteristike pojačivača u stvarnim, dinamičkim uslovima sa jednotonskim i dvotonskim ulaznim signalom. Iz analize tih krivulja jasno je da se potrebni maksimalni napon signala zaštitne rešetke dobio iz ulaznog VF signala i da u tom slučaju uzrokuje veću vršnu struju rešetke. Ova poteškoća je otklonjena daljim doradom polaznog principa povećavajući odnos između V_{g_1} i V_{g_2} .

Rad Pojačivača

Kao što se može vidjeti na Slici 4, završna verzija pojačivača koristi ispravljač od dvije ispravljačice u Cockcroft-Waltonovom udvajačkom spoju. Ovo daje odprilike dvostruki napon zaštitne rešetke za isti pobudni VF signal i rezultira u povećanoj mogućnosti upravljanja maksimalnog signala sa značajnom uštedom u pogledu potrebne pobudne snage.

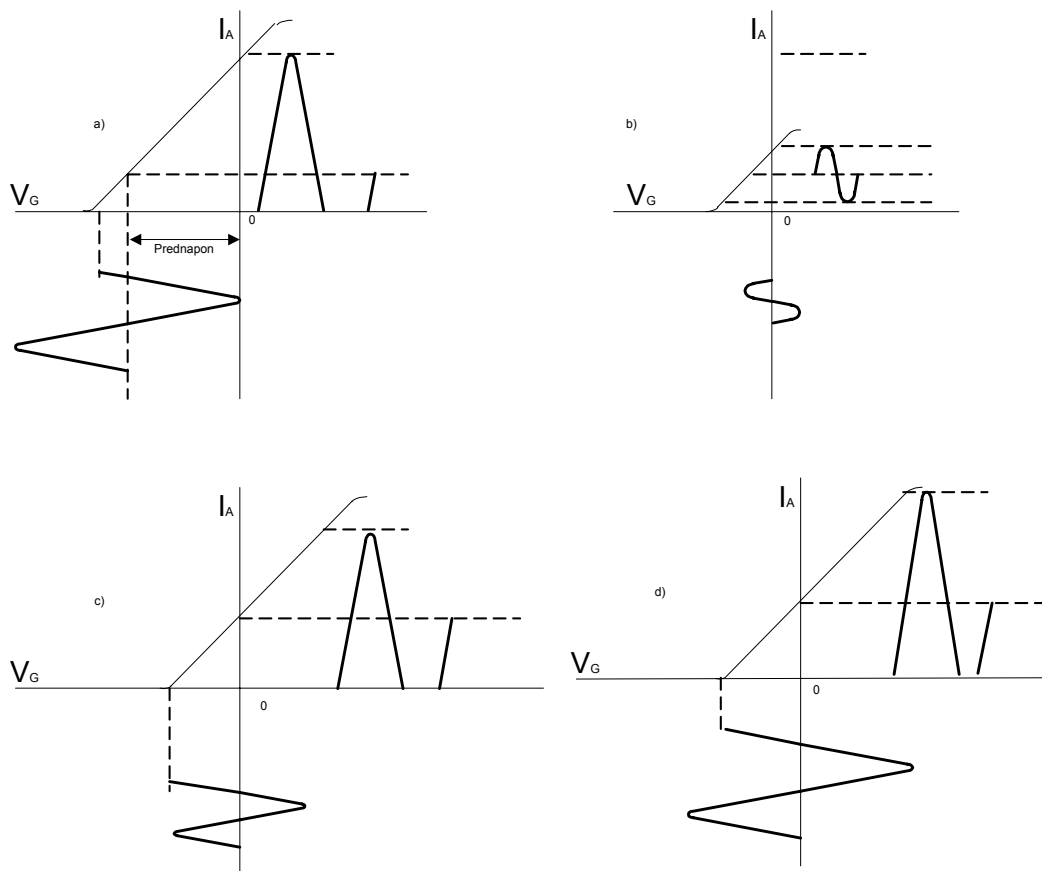


Slika 4 Osnovna šema koja koristi Cockcroft-Walton udvostruiva napona

Pridruženi kondenzator punjenja je izabran da obezbjedi nisku impedancu na frekvenciji ulaznog signala i visoku u slučaju svih govornih frekvencija. Pozitivni napon na zaštitnoj rešetki je dobijen isključivo iz VF ulaznog signala, mijenja se sve vrijeme u skladu sa pobudnim signalom i u direktnoj je proporciji sa amplitudom modulacije. Napon zaštitne rešetke se pri tome mijenja od nule u pozitivnom smjeru na frekvenciji modulisanog glasa.

Zahvaljujući tome linearac radi sa nula prednaponom a struja rešetke biva povučena pri svakom pozitivnom ciklusu ulaznog VF signala do 180° . Ako se posmatra samo ulazna strana pojačivača on radi u klasi B. Ako se posmatra izlazna strana pojačivača režim rada u cijevu je mnogo kompleksniji nego u konvencionalnim pojačivačima jer ne postoji referentna tačka na I_A/V_G -karakteristici u odnosu na koju se razvija protok anodne struje.

Posmatrajmo prvo dinamičku karakteristiku za konvencionalnu B klasu prikazanu na Slici 5a.



Slika 5 Predstavljena je dinamička karakteristika na a) konvencionalnog na b) , c) i d) G2DAF sa različitim oblicima ulaznog signala

Predstavljena je promjena anodne struje u zavisnosti od napona rešetke za određenu cijev i fiksnu vrijednost napona zaštitne rešetke. Pri prednaponu od nula volti, anodna struja je vrlo visoka kako se vidi na dijagramu i biće neophodno dovesti negativni prednapon na rešetku da bi se smanjila anodna struja na vrijednost koja će održavati statičku disipaciju u granicama kataloške maksimalne vrijednosti. Pobudni VF signal se

pomiče na obadvije strane radne tačke i određen je količinom neophodno potrebnog negativnog prednapona. Svaka polovina ciklusa čini rešetku pozitivnom i povećava linearno anodnu struju. Ovo povećanje bi se moglo nacrtati i u odnosu na I_a/V_g da se pri tom pokaže veličina i trajanje pulsa anodne struje.

U G2DAF linearcu nema prednapona i potencijal rešetke je nula. U isto vrijeme anodna struja je također na minimumu jer nema napona na zaštitnoj rešetki. Sa malim pobudnim VF signalom, napon na zaštitnoj rešetki će porasti neznatno iznad nule i anodna struja će se također povećati. Vidi krivulju na Slici 5b. Ovdje vrlo bitno primjetiti da je sada anodna struja puno veća od 180° u klasi B. U stvari, protok struje je za 360° od rešetke prebacuje pojačivač u klasu A. Da pogledamo šta se dešava ako se ulazni signal povećava. Potencijal zaštitne rešetke raste i anodna struja raste. Međutim rešetka je još uvijek na nula prednaponu sa VF signalom koji oscilira podjednako pozitivno i negativno oko nule prednapona radne tačke tako da se krivulja I_a/V_g se pomiče u lijevo na grafiku (Slika 5c). Opažamo da uvijanje pozitivne polovine sada ima više efekta na anodnu struju nego negativna polovina. Anodna struja je veća od 180° ali manja od 360° tako da pojačivač sada radi u AB klasi. Pri većoj jačini signala I_a/V_g krivulja se pomjera dalje, radna tačka se pomjera prema gore na strmini, anodna struja teče pri kraćim promjenama na rešetki i ukupno pojačivač se približava režimu klase B, kao što se i vidi na Slici 5d.

Grafik na Slici 5a predstavlja obično karakteristiku tetrode ili pentode koja nije potpuno linearna na krajevima pa taj dio proizvodi nelinearnosti u radu i povećanje intermodulacijskih izobličenja. U G2DAF pojačalu mali ulazni signal proizvodi mali napon na zaštitnoj rešetki. Ukupna dužina I_a/V_g krive postaje manja i sa oštrijim zakrivljenjima na krajevima. Posljedica toga je da se proporcionalno smanjuje i veličina nelinearnog dijela krivulje. Svi grafici su nacrtani u istoj razmjeri tako da je moguće upoređivati grafike 5b i 5d odakle se nameće zaključak da se zbog niskog nivoa signala u klasi A, nelinearnost značajno povećava a u isto vrijeme smanjuje nivo intermodulacijskih izobličenja.

Puls anodne struje kod G2DAF pojačivača je veći nego kod konvencionalnog. Proizlazi da za istu vrijednost snage ulaznog signala pojačivač zahtijeva manje upravljačkog napona. I obrnuto isti upravljački napon će potjerati veću izlaznu snagu.

Dinamička karakteristika

Najupotrebljiviji i najbolji način da se izrazi karakteristika pojačivača je grafički metod gdje je anodna struja nacrtana u odnosu na VF napon rešetke. Odatle se lahko provjeri :

1. Linearnost pojačivača
2. Anodna struja i struja zaštitne rešetke na različitim nivoima pobude
3. Maksimalna anodna struja
4. Maksimalna snaga

Ove karakteristike su prikazane na Slici 6 za jedno i dvotonski ulazni signal. Ulazni VF napon rešetke je mjereno cijevnim voltmetrom a struje I_a i I_{g_2} su direktno očitavane sa instrumenata na Linearcu.

Važno je napomenuti da je očitavanje anodne struje (za računanje snage) vršeno sa miliampermetra na prednjoj ploči Linearca. To u stvari nije prava vrijednost jer instrument ne može da prati dvotonski signal (audio). Srećom odnos između vršnih vrijednosti inputa i D.C. snage (računato sa vrijednošću istosmjernog napona op.p.) je radilo sa malim izobličenjima i prednaponom koji je kontrolisao linearnost, vršna snaga je bila 1,57 puta od D.C. mjereno sa dvotonskim test signalom. Međutim, vrijednost ovog faktora se može dobiti samo u slučaju savršene klase B linearnog pojačivača.

U stvarnosti, pojačivači ne rade u istinskoj B klasi i uvijek su ispod teorijskih granica. Imamo slijedeće relacije:

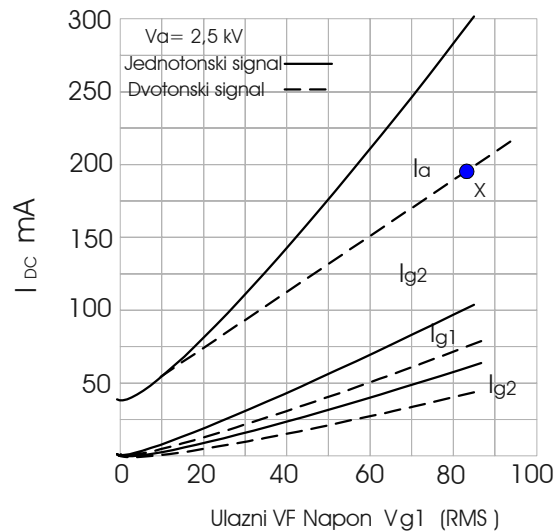
$$I_{\text{peak}} = 1.57 (I_{\text{dc}} - 0.363 I_0) \text{ gdje je}$$

I_{peak} = vršna struja

I_{dc} = očitavanje anodne struje

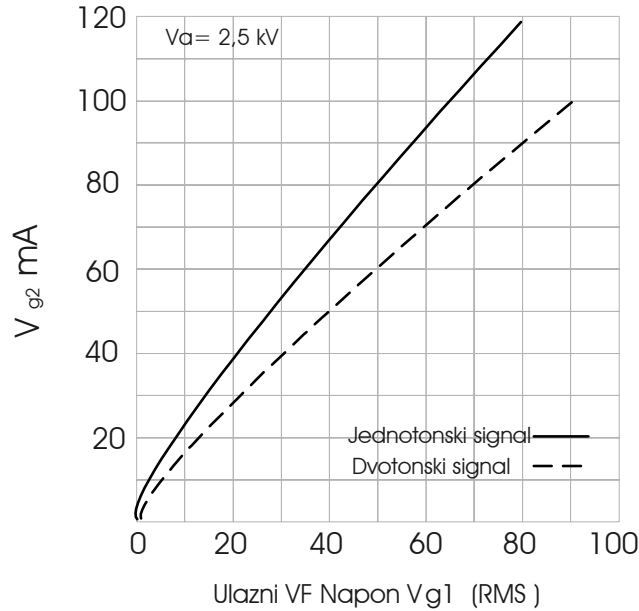
I_0 = Struja mirovanja

Pri anodnom naponu od 2.5 kV struja mirovanja je 30mA kako je prikazano na Slici 6 i tačna vrijednost $I_{\text{a peak}}$ je $I_{\text{a dc}}$ pomnoženo sa 1.5.



Slika 6 Dinamička karakteristika dvije Q. Predstavljene struje anode, zaštitne i upr. rešetke za pobudni napon od 0 do 80 V

Ako na primjer uzmemo tačku X u grafiku na Slici 6 za dvotonski ulaz onda imamo $220 \times 1.5 = 330 \text{ mA}$ a ulazna snaga je 825 W . U ovom slučaju Linearac radi u savršeno linearnom maniru. Na osciloskopu se lijepo vidi perfektno čist prelaz sa simetričnom karakteristikom signala bez tragova zaravnjenja na vrhovima sinusoide. Struja zaštitne rešetke I_{g2} je prikazana u funkciji pobudnog napona prve rešetke V_{g1} . U ovom slučaju pojačivač sa dvotonskim signalom daje 660 W PEP pri pobudnom VF signalu od 63 V i strujom zaštitne rešetke od 22 mA . Iz dijagrama na Slici 7 se vidi da je pri tome napon zaštitne rešetke 75 V . Proizvod ove dvije veličine $22 \text{ mA} \times 75 \text{ V}$ daje nam vrijednost pobudne snage koja u ovom slučaju iznosi približno 1.65 W .



Slika 7 Dinamička karakteristika napona z rešetke u funkciji pobudnog VF napona

Efikasnost Pojačivača

Napravljen je popriličan broj mjerenja vrijednosti izlazne snage preko neinduktivnog opterećenja pri ulaznoj snazi od nula do maksimalno moguće vrijednosti. Sve vrijednosti izlaza su bazirane na RMS naponu mjenom na vještačkom opterećenju od 100 Ω. Linearac je bio poštivan tako da se dobije maksimalan VF izlaz bez izobličenja signala uz optimalnu pobudu dvotonskim signalom. Mjerenja su izvršena sa jednotonskim i dvotonskim ulaznim signalom.

Na svakom nivou snage odnos između input i output snage je računat u procentima što je i grafički predstavljeno u odnosu na ulaznu snagu. Ali prije razmatranja efikasnosti linearca pisac bi željeo da da neke opšte napomene.

Postoji više različitih i zbunjujućih pristupa ispitivanju efikasnosti Linearca tako da mnogo amatera i ne shvaća da često spominjana cifra od 66% efikasnosti – za idalnu B klasu pojačivača – i može se samo primjeniti u slučaju kad pojačivač radi sa punim izlazom i maksimalnim pobudnim naponom u uslovima jednotonskog pobudnog signala. Na bilo kom drugom nivou snage efikasnost je manja od 66% i ustvari je proporcionalna pobudnom naponu npr. Ako se pobudni napon smanji za pola efikasnost će pasti na 33%, ako padne na jednu trećinu efikasnost pada na 22% itd. Objašnjenje je jednostavno. Zamislimo pojačivač sa naponom rešetke $V_{h.t.}$, VF napon na izlaznom rezonantnom kolu V_{tank} i RMS napon na vještačkom opterećenju R je V_{load} .

$$\text{Ulazna (Input) snaga pri punoj pobudi} = V_{h.t.} \times I_a = P_{in} \quad [W]$$

$$\text{Izlazna (Output) snaga pri punoj pobudi} = (V_{load})^2 / R = P_{out} \quad [W]$$

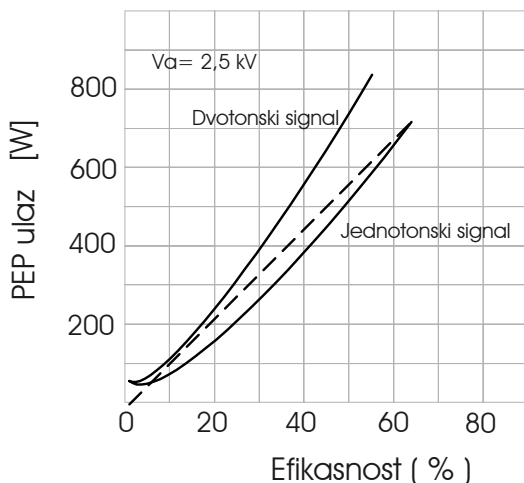
Uzmimo sada za polovinu pobude = $\frac{1}{2} V_g$, anodna struja = $\frac{1}{2} I_a$, napon na rezonantnom kolu $\frac{1}{2} V_{tank}$, napon na vještačkom opterećenju R je V_{load} .

$$\text{Ulazna (Input) snaga pri punoj pobudi} = V_{h.t.} \times \frac{1}{2} I_a = \frac{1}{2} P_{in} \quad [W]$$

$$\text{Izlazna (Output) snaga pri punoj pobudi} = (\frac{1}{2} V_{load})^2 / R = \frac{1}{4} P_{out} \quad [W]$$

Iz gornjeg slijedi: Istosmjerna anodna struja i anoda ulazna snaga (input) je proporcionalna pobudnom naponu dok je izlazna snaga (output) proporcionalna u svakom slučaju kvadratu pobudnog napona.

Na slici 8 je prikazan grafik efikasnosti u odnosu na snagu. Da bi se efikasnost idealne klase B sa jednotonskim signalom i anodnom strujom bez signala mogla uporediti, krive su nacrtane u istoj razmjeri sa 66% efikasnost uzete za 750 W.



Slika 8 Grafik pokazuje zavisnost ulazne snage efikasnosti za jedno i dvotonski signal. Isprekidana za uporedbu predstavlja zamišljenu idealnu liniju klasu B pojačivača sa nula prednaponom i 66% efikasnosti pri 750 W ulazne snage.

Ako linearac radi u zaista linearnom režimu, po definiciji, istosmjerna (DC) anodna struja i ulazna (input) anodna snaga biće proporcionalne pobudnom naponu dok je izlazna (output) snaga proporcionalna kvadratu pobudnog napona. Grafik bi trebao biti ravna linija, međutim na crtežu se vidi kriva a to je zbog toga što je linearac poštivan da daje maksimalan output u skladu sa maksimalnom linearnošću. Povećavanjem R_L uz poboljšane radne uslove na nižim nivoima snage postiže se i povećavanje same snage. Ovu proceduru bi trebalo usvojiti iz praktičnih razloga koja je uz to potpuno ispravna.

Uobičajeno je za proizvođače elektronskih cijevi da navedu izlaznu snagu i efikasnost mjerenu na anodi. U praksi izlazna snaga se računa iz vrijednosti očitano napona na poznatom neinduktivnom potrošaču. Jasno je da vrijednosti ovako dobivene – kao i druge kalkulacije efikasnosti bazirane na ovim vrijednostima - biće manje od anodne efikasnosti zbog toga što su uključene vrijednosti gubitaka na rezonantnom kolu. Kako bi se mogla dati stvarna baza za poredjenje G2DAF Linearca, izlazna snaga (output) je korigovana za vrijednosti gubitaka na rezonantnom kolu tako da vrijednosti navedene u Tabeli 1 i Slici 8 uključuju ove korekcije.

Maksimalan izlaz za dvije QY3-125 pri 2.5 kV anodnog napona		
	Jednotonski	Dvotonski
Anodna struja (DC)	300 mA	220 mA
Ulazna snaga (DC) ²⁾	750 W	550 W
PEP ulazna snaga	750 W	825 W
Anodna disipacija	260 W	250 W
PEP ³⁾ izlazna snaga	490 W	600 W
Srednja izlazna snaga	490 W	300 W
Efikasnost anode	65%	54%

Vrijednosti za 400 W PEP izlaza		
Va=2.5 kV		
Anodna struja	250 mA	250 mA
Ulazna snaga (DC)	650 W	650 W
PEP ulaz	650 W	650 W
I _{g2}	38 mA	38 mA
I _{g1}	70 mA	70 mA
V _{g2}	105 V	105 V
V _{g1 (RMS)}	65 V	65 V
Pobuda (PEP izlaz)	30 W	30 W
Anodna disipacija	250 W	250 W
Srednja izlazna snaga	400 W	400 W
PEP izlaz	400 W	400 W
Efikasnost anode	61.5%	61.5%

Odnosi se na 300 Ω u kolu zaštitne rešetke. Sa anodnim naponom od 3 kV i efikasnost će se povećati i biće približno 72 % za jednotonski signal i 58 % za dvotonski signal

Tabela 1

Na ovaj način se dobije anodna efikasnost od 65% za maksimalan signal koja je skoro jednaka konvencionalnom pojačivaču klase B. Na kraju, prije nego se zaključi ovo poglavlje, autor želi da jasno naglasi da ne tvrdi da je efikasnost G2DAF linerca 65% u najboljim uslovima i bazirano samo na procjenjenom koeficijentu gubitaka prenosa i mjerenja izlazne snage. Uopšteno govoreći moguće je koristiti različite tehnike mjerenja i ovaj metod je korišten kao provjera u odnosu na prvi.

Efikasnost pojačivača se može precizno provjeriti mjerenjem temperature staklene cijevi uz pomoć termometra i termopara kontaktnom metodom. Sa jednotonskim signalom poštima se anodna struja na 260mA i anodni napon na 2,5 kV. Pri tome je izračunata ulazna snaga (input) 650 W. Pri ovom ulazu mjerenje temperature pokazuje disipaciju od 250 W (125 W po cijevi) pa izlazi da je efikasnost na 650 W jednaka 61.5 % ⁴⁾ (650W-250W = 61.5% od 650W). Ovaj ekperiment je ponovljen sa dvotonskim ulaznim signalom pri čemu se dobilo očitavanje anodne struje od 194mA na 2,5 kV. To bi bio DC input od 480 W za 250 W anodne disipacije dajući srednju vrijednost od 230W i anodnu efikasnost od 48 %.

Dobro bi bilo kad bi brojčana vrijednost ulazne snage(input) i snage disipacije ulazile u vrijednost izlazne snage (output). Ako se izvrše istovremena mjerenja izlaza na vanjskom vještačkom opterećenju, razlika između vrijednosti za vještačko opterećenje i na anodi ustvari pokazuje koliki su gubici prenosa u rezonantnom kolu. Ovaj metod je korišten da odredi vrijednosti korekcije za output i efikasnost. Precizno mjerenje zaista nije jednostavno i uvijek postoji mogućnost greške. Medjutim autor je pokušao sa ponovljenim provjerama i koristeći različite metode, da dodje do pravog odgovora.

Zbog izabranog režima rada, napon zaštitne rešetke je uvijek proporcionalan pobudnom naponu koji puno niži od normalne vrijednosti za klasu AB. Zbog ovoga pad napona na anodi može biti puno manji bez prevelike struje zaštitne rešetke. Brojčana vrijednost $V_a - V_{a_{min}}$ se dobije iz formule:

Efikasnost Anode (jednotonski signal) =

$$\frac{3.14}{4} \left(\frac{V_a - V_{a \min}}{V_a} \right)$$

Efikasnost anode (dvotonski signal) =

$$\left(\frac{3.14}{4} \right)^2 \times \left(\frac{V_a - V_{a \min}}{V_a} \right)$$

Gornji zrazi određuju vrijednosti koje je moguće dobiti.

Obično je efikasnost dvotonskog signala kod tetrode oko 15 do 20 % manja od jednotonskog. U G2DAF linearcu posebno je dobra dvotonska efikasnost i ustvari iznosi samo 11 % manje od jednostonske. To je zahvaljujući samokompenciji kod dvotonskog signala gdje je srednji potencijal zaštitne rešetke u stvarnosti niži za isti PEP input i na taj način doprinosi poboljšanju odnosa $\left(\frac{V_a - V_{a \min}}{V_a} \right)$ sa povećanom efikasnošću a i dobije se malo više snage bez narušavanja deklarirane disipacije cijevi.

Pobuda

Pojačavačke cijevi koje rade sa nula prednaponom i vuku struju rešetke kroz pozitivnu polovinu ciklusa VF signala, zahtijevaju napajanje. Potrošnja je slična onoj za bilo koju drugu klasu B i iznosi 2 do 5 W odprilike zavisno od vrste cijevi. Uz to treba dodati i potrošnju zaštitne rešetke kao i mali gubitak na ispravljaču što bi trebalo da iznosi dodatnih 2-4 W, ponovo u zavisnosti od toga koja se cijev koristi.

Napokon tu je i gubitak na pasivnom otporu rešetke koji treba takodje uračunati. Otpornik ne samo da stabilizuje linearac i vrši neutralizaciju nego i obezbjeđuje konstantno pobudno opterećenje i u tom smislu treba zapamtiti – niža vrijednost, bolje performanse! Uzimajući konkretan primjer sa dvije QY3-125 maksimalna potrošnja bi bila (približne vrijednosti):

Potrošnja na pobudnoj rešetki = 5 W
 Potrošnja na zaštitnoj rešetki = 3 W
 Disipacija, Otpornik rešetke od 300Ω = 17 W

Ukupno 25 W

Postoje i dodatni gubici osilatornom kolu pobudnom kolu kao u gubici kod prenosa pa se i to treba na kraju dodati ukupnoj potrošnji.

Zlatno pravilo kod računanje PEP outputa je da su udvostučiti izračunata potrošnja pa tako u ovom slučaju imamo PEP output pobude = 50 W.

Na ovaj način se obezbjeđuje da pobuda ne bude prejaka i da se izbjegniju izobličenja pobudnog signala prije nego udje u Linearac. U svakom slučaju nema smisla praviti Linearac sa niskim nivoom izobličenja a onda mu na ulaz dovesti signal koje je već izobličen nekom nelinearnom operacijom u fazi pobude.

Dvije cijevi 6146 sa 500 V anodnog napona daju PEP output oko 57 W ili sa 600 V daju 76 W što je u praksi vrlo upotrebljivo. Kad bi pobuda bila npr za jednu cijev tj

upola manje ,onda bi se otpornik na rešetki morao popvečati na 400Ω .Sada bi računica izgledala ovako:

Potrošnja na pobudnoj rešetki = 5 W
Potrošnja na zaštitnoj rešetki = 3 W
Disipacija,Otpornik rešetke od 400Ω = 10 W

Ukupno 18 W

Uzimaju faktor sigurnosti od 2 naprama 1 imamo PEP output pobude = 36 W.

Prava vrijednost pasivnog otpornika na rešetki može se dobiti spajanjem serijski i paralelno karbonskih otpornika od 1 W.U uslovima dvotonskog ulaznog signala srednja vrijednost izlazne snage je jedna polovina PEP-a.Pri tome i disipacija na pasivnom kolu rešetke treba da bude samo jedna polovina.Tako bi se 400Ω otpornik mogao napraviti od 5 komada 1 W otpornika.Zbog originalnog režima rada cijevi , kataloške vrijednosti proizvođača cijevi se ne mogu primijeniti.Pobudni napon rešetke je manji a struja je veća nego što pokazuje katalog.Prema tome potrošnja pobude koja približno odgovara svim praktičnim izvedbama je:

Maksimalna potrošnja pobude = $V_{g(RMS)} \times I_{gDC}$.Za početni proračun $V_{g(RMS)}$ se može uzeti približno polovina napona koja je navedena za normalni režim pojačivača u klasi AB1 i AB2.Pri tome I_{gDC} je očitana vrijednost.Kad je Linearac završen i poštiman na maksimum PEP izlaz sa jednotonskim signalom , stvarna vrijednost napona rešetke se može očitati diodnom sondom cijevnog voltmetra. (Ovi instrumenti daju normalno očitavanje vršnih vrijednosti ali su kalibrisani u RMS vrijednostima ⁵⁾

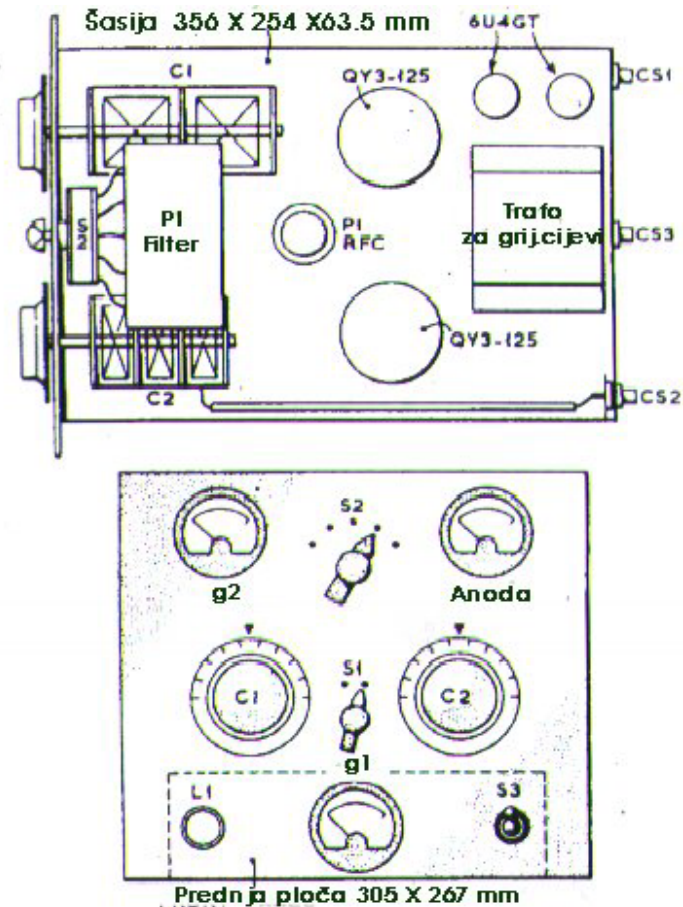
Istosmjerni napon (DC) na zaštitnoj rešetki se može ispitati pri istim uslovima ulaznog signala i sa običnim AVO ili sličnim metrom i onda se taj napon jednostavno pomnoži sa strujom zaštitne rešetke da bi se dobila potrebna vrijednost potrošnje.

Originalno G2DAF je koristio uređaj sa dvije cijevi 6146 kao pobudu 650 V visoko napon .Za provjeru je izvadio jednu cijev i pokazao da je moguće pobuditi Linearac i dobiti 400W PEP outputa u uslovima jedno i dvotonskog signala.Uz neminovne gubitke VF-a na prenos ipak je rezultat ostao u granicama predviđenog.

Praktični testovi pokazuju da je ista pobudna snaga dovoljna i za G2DAF linearac kao i za konvencionalni AB1 klase pojačivač.To je zbog toga što nula prednapon traži manji VF pobudni napon nego normalni AB1 i pri tome su i gubici manji na rešetkinom otporniku.Sa malim vrijednostima ovog otpornika skoro da je moguće kompenzirati potrošnju zaštitne rešetke.

Konstrukcija

Kompletna šema G2DAF Linearca je prikazana na Slici 9.



Slika 10 Izgled šasije i prednje ploče G2DAF Linearca

PI filter je namotan na keramičkom tijelu Eddystone prečnika $2\frac{1}{2}$ inča (63.5 mm) motano sa 8 zavoja po inču (25.4 mm) spojen na preklopnik prije nego što je ugradjen u kutiju. Pri motanju je ostavljen razmak između 15m i 20m-skog zavoja kao i između 20m i 40m-skog zavoja. Korištena je klajisana bakarna žica prečnika #16 AWG (1.29 mm prečnik) ukupne dužine zavojnice od $3\frac{1}{4}$ inča (82.55mm). Za 10m opseg vazdušna zavojnica ima 6 zavoja žice #12 AWG (2.05 mm prečnik) dužine 2 inča (50.8mm) položenom sa osom normalnom između između promjenjivog kondenzatora i kraja glavne zavojnice.

PI zavojnica zavisi od vrijednosti anodnog opterećenja i vrlo je bitno ,kao i kod bilo kojeg drugog pojačivača , da cijev radi sa podešenim opterećenjem. Ako to ne bi bio slučaj onda bi se odrazilo i na efikasnost i na izlaznu snagu. Uz pretpostavku da je V_a anodni visoki napon, $V_{a(min)}$ najniži trenutni anodni napon, $I_{a(DC)}$ maksimalna struja očitana na instrumentu, onda je

$I_{a(peak)} = I_{a(DC)} \times K$ (pri čemu je K konstanta koja zavisi od ugla struje – u ovo slučaju približno 3) i $R_L = 2 (V_a - V_{a(min)}) / I_{a(peak)}$. Za pojačivač o kojem je riječ $R_L = 2(2500-250)/300 \times 3 = 5000 \Omega$. Znači da su PI konstante : $R_L = 5000 \Omega$, $R_{L(out)} = 75 \Omega$, $R_L / R_{L(out)} = 5000/75 = 66 \Omega$. Kvadratni korjen iz 66 je približno 8 i to je ustvari vrijednost reaktase (XC1:XC2). Za $Q=12$ slijedi:

$$\begin{aligned}
 XC1 &= R1/Q &= & 5000/12= 416 \Omega \\
 XC2 &= R2/Q &= & 416/8 &= & 52 \Omega \\
 XL &= XC1 + XC2 &= & 416 + 52 &= & 468 \Omega
 \end{aligned}$$

Ove vrijednosti iako su jednostavna aproksimacija ipak su dovoljno dobre za amaterske potrebe. Iz dijagrama se može očitati vrijednost reaktanse za 80m koja iznosi $C1=116$ pF; $L=20\mu H$; $C2 = 900$ pF. Vrijednosti za ostale bandove su :

Band	C1	L	C2
80m	116	20	900
40m	58	10	450
20m	29	5	225
15m	20	3.5	160
10m	15	2.5	113

Pogodan kondenzator C1 je sa polukružnim pločama rotora i sa minimalnom vrijednošću od 15 do 20 pF koji zajedno sa kapacitetom kola i anodnim kapacitetom će biti veći nego što je potrebno za 10 i 15m-ski opseg. Ovo se rješava na dva načina: Prvo tako što se preračuna rezonantno kolo odnosno zavojnica sa većom Q vrijednošću od recimo 15 do 20 i drugo da se smanji minimalni kapacitet kondenzatora C1. Povećanjem vrijednosti Q povećaće se i VF struje a time i gubici. U skladu sa primjenjenim drugim načinom i s obzirom da se kondenzator sastoji ustvari od dvije sekcije od po 60 pF pri čemu je moguće prekidačem koristiti samo jednu sekciju od 60 pF ili ih spojiti paralelno i tako dobiti 120 pF. Jedna sekcija je spojena u kolu bloking kondenzatora anode i zavojnice za 10m i koristi se gornja tri opsega. Druga sekcija se uključuje za 40m i 80m-skom bandu. Na ovaj način je i samo štimanje na 10m, 15m i 20m manje kritično. Potreban razmak između ploča kondenzatora C1 iznosi približno 1/10 inča (2.54mm). Standardni trostruki kondenzator iz starih radio aparata sa po 500 pF u svakoj sekciji se može upotrijebiti za kondenzator C2. Ima dovoljan razmak između ploča da spriječi varničenje pri većem opterećenju. VF prigušnica ima 300 zavoja lakirane žice #32 AWG (0.202 mm prečnik) motano u više sekcija od po – 165, 65, 35, 20 i 15 zavoja na keramičkom tijelu prečnika 1 inč (25.4mm) i dužine 5 1/2 inča (139.7mm) sa razmakom od 1/8 inča (3.175mm) između sekcija. Standardna višeslojna unakrsno motana prigušnica nije dobra u ovom slučaju i ne treba je koristiti u kolu PI filtera. Jedna standardna VF prigušnica od 1,5 mH dimenzionisana za barem 300 mA se priključuje na izlazni koaksijalni ženski konektor i ne bi se smjela izostaviti ni u kojem slučaju kad se koristi visoki napon. U slučaju da se desi da propuca bloking kondenzator, struja koju bi povukla ova prigušnica bi spržila osigurač i tako spriječila da se visoki napon dočepa antenskog kola i katastrofu koja bi se u tom slučaju mogla desiti. !!

Štimanje Linearca

Štimanje je potpuno isto kao kod bilo kojeg pojačivač AB klase. Pobuda se lagano povećava dok anodna struja ne dostigne vrijednost 150-200 mA. Sa potpuno zatvorenim kondenzatorom C2 nadje se rezonancija sa C1 pr čemu anodna struja pada na minimum. Struja zaštitne rešetke raste. Smanjenjem izlaza sa C2 anodna struja će rasti a struja zaštitne rešetke će padati u već poznatom maniru. Pobuda se može povećati dok struje na rešetkama i anodi ne dostignu potrebnu vrijednost.

Ako bi se pojačivač pravio sa nekim drugim cijevima onde se trebaju koristiti kataloški podaci za klasu AB1 i AB2 kao početne vrijednosti. Ako je osciloskop na raspolaganju onda treba provjeriti modulirani signal za dvotonskim ulazom. Pri tom je vrlo jednostavno podesiti odgovarajuću pobudu štimanjem VF izlaza na maksimum u skladu sa izlaznim opterećenjem da bi se spriječilo odsjecanje vrhova amplituda i druga izobličenja u modulaciji. Položaj dugmadi za štimanje struja na upravljačkoj i zaštitnoj rešetki kao i na anodi se zabilježe za kasnije brzo i pravilno štimanje. Ako osciloskop nije na

raspolaganju onda štimanje treba vršiti tako da minimum anodne struje (dip) nije veći od 20% od nerezonantnog položaja. Npr ako je u nerezonantnom području struja 250mA onda će na rezonantnoj frekvenciji biti oko 200mA. Zlato pravilo je :”Ako nisi siguran onda probaj sa većim opterećenjem”. Pobuda fonijskim (govornim) signalom se podesi tako da instrument anodne struje ne prelazi preko pola pri postojanom signalu. Zapamtite da kazaljka ne može pratiti govorni ritam. Ako dostiže 150mA onda znači da je stvarni signal barem dvostruko veći.

Posebno i vrlo važno pitanje je zračenje harmonika i TV smetnje zbog izabranog metoda rada. Moglo bi se slobodno reći da između AB1 klase i G2DAF nema ustvari značajne razlike. K tome još treba reći da je autor koristio Linearac 18 mjeseci radeći uglavnom u isto vrijeme kad su na TV bile vrlo gledane emisije i niko se nije požalio.

Zaključak

Postoji mnogo načina da se napravi Linearac. Svakako su moguća razna rješenja sa prednaponom i napajanjem zaštitne rešetke koristeći nula prednapon triode. Takođe je moguće sa neutralizacijom i zemljenom rešetkom. Medjutim, Linearci sa pobudom u upravljačkoj rešetci tetroda ili pentoda su vrlo popularni među radioamaterima i to iz više razloga. Iskorištene su prednosti tetrode a u isto vrijeme jednostavnost nula prednapona triode, što posebno privlači ljubitelje SSB rada.

Prednosti bi bile:

1. Veće mogućnosti kontrole potrošnje.
2. Povećana efikasnost.
3. Mala statička disipacija anode i posebno hladan rad
4. Ne treba napajanje zaštitne rešetke, otpornika za pad napona, regulacije napona a ni zaštitnog diodnog kola
5. Ispravljač ne treba prednapon.
6. Ne rasipa se energija.
7. Nije neophodna posebna procedura za podešavanje.
8. Visok stepen pouzdanosti i zaštite. Npr cijevi se neće oštetiti zbog pogrešnog napona na upravljačkoj ili zaštitnoj rešetci ili na anodi.
9. Jednostavan i stabilan rad.
10. Stalno opterećenje pobudne cijevi
11. Vrlo nizak nivo intermodulacijskih izobličenja
12. Visok stepen pojačanja (pojačanje od 10 je vrlo praktično)

Mogu se koristiti bilo koje uobičajene izlazne cijevi ,tetrode i pentode ,npr 4-65 ,4-125,4-250,4-400,4X250B ,813...

S obzirom na napajanje visokog napona pojačivač radi zadovoljavajuće u širokom području. Autor je npr radio i sa naponom od 1400 V i dobivao odlične rezultate. Treba zapamtiti da za dvije izlazne cijevi struja mirovanja iznosi oko 10 mA i predstavlja oko 14 W disipacije. Jedini zahtjev anodnog napona je da je dovoljna statička anodna struja a što znači da cijev ne smije raditi izvan opsega odsjecanja vrhova amplituda.

Inače u svakodnevnom životu je vrlo teško dobiti bilo šta džabe pa ni G2DAF Linearac nije izuzetak od tog pravila tako da se mnoge pogodnosti svakako plaćaju. Ovdje je cijena malo veća pobuda nego kod konvencionalnih pojačivača AB1 klase sa pasivnom rešetkom. Medjutim poslednjih godina ulazi u modu da se pravi pobuda sa malo jačim cijevima. Danas predajnici uglavnom imaju izlaz od 50-100W PEP tako da imaju i previše za pobudu.

Linearac sa dvije 4 X 150 A izlazne cijevi Podaci za maksimalnu snagu
--

Va=1.25 kV (nominalno)			
	Jednotonski		Dvotonski
Va	1200	1000	1100
Anodna struja Ia	350 mA	400 mA	350 mA
Ulazna snaga (DC) Pin	420 W	400 W	385 W
PEP ulaz	420 W	400 W	578 W
I _{g2}	50 mA	60 mA	50 mA
I _{g1}	105 mA	125 mA	115 mA
V _{g2}	94 V	110 V	85 V
V _{g1 (RMS)}	22 V	26 V	32 V
Pobuda (PEP izlaz) V _{drive (rms)}	56 V	64 V	80 V
Anodna disipacija Pdiss	180 W	144 W	195 W
PEP izlaz PEPout	240 W	256 W	380 W
Srednja izlazna snaga P _{out (mean)}	240 W	256 W	190 W
Efikasnost anode	57.0%	64.0%	50.0%

Šema i način rada ovog Linearca su zaštićeni Britanskim Patentom broj 026081. Bez obzira na to radioamateri ako žele mogu praviti i koristiti ga za ličnu upotrebu.

Dodatak

Male metalne anode sa velikom strminom kao što su 4X150 A i 4X250B klase postaju vrlo popularne. Ove cijevi imaju vrlo mali međuelektrodni razmak i vrlo nisku maksimalnu disipaciju rešetke. U slučaju 4X150A ona iznosi 2 W po cijevi.

Zbog velike strmine pobudni napon rešetke je puno manji nego obično i uslovima nula prednapona dvije 4X150A se mogu drajvati po 130mA DC struje rešetke i pri tome napon ne prelazi 36 V. Koristeći formulu $V_{g_{peak}} \times I_{g_{DC}} \times 3.14/4$ nalazimo da je disipacija rešetke od 3.6 W vrlo blizu maksimalno dozvoljenoj. Medjutim male vrijednosti pobude će proizvesti napon zaštitne rešetke od 50V a to je nedovoljno da bi cijev povukla potrebni maksimalni anodnu struje. Pri tome slijedi da je: (i) neophodan veći pobudni VF napon koji će proizvesti veći potencijal zaštitne rešetke, (ii) zbog vrlo male disipacije ukupni napon se ne može koristiti za upravljačku rešetku. Praktično rješenje je vrlo jednostavno a to je da se napojna tačka rešetke odabere negdje na pasivnom otporniku rešetke koji u tom slučaju postaje djeliteľ napona. Za optimalan rad je moguće odabrati bilo koji odnos Vpobude : Vg₁ za određenu strminu odabrane izlazne cijevi.

Autor je bio u prilici da izvrši određena mjerenja na jednom eksperimentalnom G2DAF Linearcu koristeći par 4X150A izlaznih cijevi. Pri tome je na raspolaganju bio visoki napon od 1250V uz prilično jadnu regulaciju napona koji je pri punom opterećenju padao na 1100 V tako da to i nisu bili baš optimalni uslovi da bi se dobili najbolji rezultati. Sa punih 1250 V dobili bi se i puno bolji rezultati. Dinamičke karakteristike su predstavljene na Slici 11.

Većina izlaznih tetroda koristi katode sa presvučene oksidnim slojem i pokazuje negativnu struju zaštitne rešetke pod određenim uslovima opterećenja. Ovo se dešava zbog toga što se sekundarni elektroni počnu emitovati prema zaštitnoj rešetki. Male vrijednosti negativne struje zaštitne rešetke nisu ustvari štetne za normalan rad cijevi i za neke tetrode je to sasvim normalno. U tim uslovima ne bi trebalo da postoji prolaz kroz dvije diode (EY81) za suprotan tok elektrona. Zbog toga je dodat otpornik R2 od 27 KΩ u kolu zaštitne rešetke. Najvažnije je da u radnim uslovima sve vrijeme postoji povratni tok od zaštitne-upravljačke rešetke prema uzemljenju i ovaj otpornik se ne bi smio ispustiti ni po koju cijenu.

¹⁾ Od engleskih riječi root-mean-square (korjenovano, usrednjeno pa kvadrirano). To je vrlo uobičajen metod za izražavanje efektivne vrijednosti struje, snage ili napona kod talasnih formi naizmjenične struje. Procedura se sastoji u tome da se prvo amplituda kvadrira tako da se negativne i pozitivne vrijednosti talasa učine istim, zatim se nadje srednja vrijednost u vremenu i na kraju se korjenjuje da bi se dobila stvarna vrijednost ili RMS vrijednost (Op.p.).

²⁾ Temperatura anode za 250 W disipacije je određena u statičkim uslovima – bez VF pobude. Prikluči se jedan 20-25 kΩ /3 W žičani potencijometar između pobudnog napona a klizač na priključak instrumenta za mjerenje struje zaštitne rešetke. Na potencijometru se povećava otpor od nule dok se ne pobudi snaga na anodi. Pri 2,5 kV struja treba da bude oko 100 mA. Još jedan od načina je da se posmatra promjena boje anode cijevi u radu. Pri određenoj boji se zabilježe očitavanja struja i napona i uporede sa PEP proračunom za postojan anodni napon i struju.

³⁾ DC engl. Direct Current – Istosmjerna struja (Op.p)

⁴⁾ PEP engl. Peak Envelope Power – Kod amplitudno modulisanog signala ili SSB signala izlazna snaga nosećeg signal se mijenja u vrmenu. Ulazna snaga je takodje promjenjiva. Maksimalna snaga koju signal dostigne u jednom trenutku ili vršna snaga se naziva PEP (RMS) i uvijek je veća od neke srednje vrijednosti snage.

⁵⁾ Precizne vrijednosti za potrebnu snagu pobude se dobiju iz formule

$$\left(\frac{Vg_{peak} - Ig_{peak}}{4} \right)$$

pri čemu Vg_{peak} predstavlja 1.4 puta RMS vrijednost mjerenu sa diodnom sondom cijevnog voltmetra a $Ig_{peak} = Ig_{DC} \times 3.14$. Ova potrošnja se odnosi na grijanje – ako je energija disipacije veća od kataloške žarne niti rešetke mogu dostići bijelo usijanje i istopiti se. Najubojitiji slučaj je jednotoski signal (CW). U radu sa fone signalom (SSB) još bi se moglo i tolerisati da signal povremeno lagano probije vršno opterećenje.

Izvor : RSGB Bulletin April 1963 godine