

**Klub konstruktora elektronike - KKE
Beograd**

Dragoslav Dobričić, YUIAW

***NISKOŠUMNI ANTENSKI POJAČAVAČI
ZA VHF I UHF***

Predavanje održano u Novom Sadu 23. januara 1999. g.

©1998, 1999 Copyright by KKE
Umnožavanje zabranjeno. Sva autorska prava zadržava:
Klub konstruktora elektronike - KKE, Beograd
Drugo, ispravljeno i dopunjeno izdanje, januar 1999. god.

Dragoslav Dobričić, YUIAW

NISKOŠUMNI ANTENSKI POJAČAVAČI ZA VHF I UHF

Šum u radio-komunikacijama

Zadatak svakog radio-komunikacionog sistema je da od jednog do drugog korisnika prenese radio- - signale sa što boljim kvalitetom.

Bez obzira na primenjeno tehnološko rešenje, osnovni problemi prenosa ostaju manje-više isti, a to je stalna borba sa degradacijom kvaliteta radio-signala u sistemu.

Pod degradacijom kvaliteta se podrazumeva svaka nepopravljiva promena ili izobličenje koje direktno ili indirektno utiče na kvalitet reprodukovane informacije. Glavni činioci ovog neželjenog, ali neminovnog, procesa su sa jedne strane šum, a sa druge izobličenja usled nelinearnosti, tj. zasićenja (klipovanja) signala. Zasićenje za posledicu ima generisanje produkata koji mogu da utiču na kvalitet reprodukovanog signala.

Upravo zbog toga, radio-komunikacije imaju jednu stalnu brigu o kojoj moraju da vode računa, a koja se zove odnos signal/šum, tj. odnos korisnog signala i svih ostalih nekorisnih signala (smetnji) i produkata koji ga prate. Pod signalom se podrazumeva svaki nosilac korisne informacije, i obično se radi o modulisanom VF nosiocu. Pod šumom podrazumevamo sve ono što prati korisan signal, a to su obično prateći šum koji je preko antene primljen zajedno sa signalom, ukupan dodati ili generisani šum i smetnje koje se pojavljuju na izlazu komunikacionog sistema.

Prvih nekoliko stepeni prijemnog sistema: antena, antenski pojačavač, kabl i prvi pojačavač u prijemniku su oni delovi koji najviše utiču na odnos signal/šum primljenog signala.

Šumne karakteristike antene

Radio-signal koji se prima pomoću antene je uvek praćen određenim nivoom šuma koji zavisi od mnogih faktora. Na neke od tih faktora ne možemo, ili samo delimično možemo, da utičemo. Pošto je antena ono što nam pored postojećeg stanja u prostoru, na koji ne možemo da utičemo (jačina prijemnog signala, smetnje i šumovi), predstavlja najvažniji element prijemnog sistema, to je od velike koristi da ukratko razmotrimo njene karakteristike po pitanju šuma kako bi mogli da optimalno iskoristimo sve pomenute elemente koji utiču na odnos signal/šum.

Šumne karakteristike antene određene su njenom efikasnošću, tj. gubicima i fizičkom temperaturom. Po fizičkom zakonu o zračenju "crnog tela" ona, zavisno od svoje otpornosti gubitaka i fizičke temperature, generiše šum. Taj šum je nezavisan od svih drugih uslova u kojima antena radi. To je njen "unutrašnji" šum. Međutim, osim tog šuma javlja se i šum koji antena prima iz prostora oko nje, upravo isto kao i svaki drugi radio signal.

Ovaj "spoljašnji" šum antene zavisi od mnogih faktora, ali navešćemo samo one najvažnije.

Najveći deo spoljašnjeg šuma predstavljaju, u urbanim sredinama, razna varničenja i druge električne smetnje. Ovaj šum se često naziva "industrijski" ili "urbani" šum. U ruralnim predelima daleko od velikih gradova, velikih saobraćajnica i industrijskih centara ovaj šum je mnogo manji.

Drugi izvori šuma koji su dosta značajni posebno na nižim VHF frekvencijama su šumovi Zemlje i kosmosa.

Zemlja poput svakog tela zagrejanog na temperaturu iznad apsolutne nule zrači šum, zavisno od temperature i svoje provodljivosti, tj. otpornosti gubitaka.

Kosmički šum je velikim delom takođe termalnog porekla usled postojanja tela poput oblaka usijanog gasa, zvezda i galaksija, ali i ogromnim delom usled burnih fizickih procesa u pojedinim galaksijama ili zvezdama. Posebno jak izvor šuma predstavlja naša sopstvena galaksija Mlečni put, a naročito njen centralni deo, njeno vrlo aktivno jezgro, koje se nalazi u sazvežđu Strelca i koje predstavlja "porodilište novih beba-zvezda". Osim naše galaksije postoji još mnogo galaksija i drugih svemirskih objekata koji intenzivno zrače šum (ostaci eksplozije zvezda u sazveždima Kasiopeje i Bika, "crna rupa" ili drugi kolapsirajući objekat u sazvežđu Labuda itd.), kao i naša najbliža zvezda Sunce.

Na frekvencijama između 30 i 300 MHz ovo su dominantniji prirodni izvori šuma. Ispod 30 MHz, idući ka nižim frekvencijama, sve dominantniji postaje atmosferski šum koji je posledica električnih pražnjenja u atmosferi.

Antena ovaj "spoljašnji" šum prima kao i svaki drugi signal iz prostora i veličina tog šuma zavisi od dijagrama usmerenosti antene. Oni izvori šuma koji se nalaze u "vidnom polju" antene bivaju primljeni kao i svaki drugi signal emitovan od nekog predajnika elektromagnetskih talasa.

Upravo zbog ove činjenice važno je voditi računa o tome kakav je dijagram usmerenosti antene i kako je on postavljen u odnosu na izvore šuma, kako bi se primljeni šum minimizirao i time ostvario povoljniji odnos korisnog signala prema pratećem šumu.

Karakteristike antenskih pojačavača

Sa stanovišta elektronike svi pojačavači koji se koriste za pojačavanje signala mogu se procenjivati međusobno upoređivanjem nekoliko parametara. Najvažniji među njima su : šumni broj, stabilnost, pojačanje, dinamički opseg i prilagođenje.

Međutim, zbog nerazumevanja značenja, međusobne zavisnosti i uticaja pojedinih parametara, srećemo se često sa vrlo čvrsto ukorenjenim zabludama.

Pojačanje

Pojačanje je, kao što mu i samo ime kaže, osobina pojačavača da neki ulazni VF signal pojača. U tu svrhu se koristi jednosmerni izvor napajanja čija se električna snaga transformiše u snagu izlaznog VF signala. Tako na izlazu pojačavača dobijamo pojačan ulazni VF signal.

Ovo **aktivno** pojačanje treba razlikovati od onog što nazivamo pojačanjem kod antena ili drugih **pasivnih** uređaja koji ne sadrže izvore napajanja i koji "pojačavanje" signala vrše na drugi način, tj. korišćenjem drugih fizičkih principa. Antene u tu svrhu koriste svoje *kolektorske* osobine koje sakupljaju signal iz okolnog prostora i zato je bolje, kod antena, koristiti termin **dobit** umesto pojačanje.

Zablude o pojačanju

Zabluda da pojačavač *popravlja* kvalitet signala je dovela do toga da se poveruje da signali mogu beskonačno da se pojačavaju sve dok ima pojačavača dovoljno velikog pojačanja.

Nažalost, vrlo brzo se shvati da se sa signalom nešto desi i da, bez obzira koliko ga pojačavali, on uvek ima puno šuma u sebi.

Šta se to desi sa signalom da više nikakvo pojačanje ne može da obezbedi signal bez šuma?

Jedno od dosta rasprostranjenih verovanja je da je "**za kvalitetan prijem signala dovoljan određen nivo signala na ulazu u prijemnik. Ako je signal sa šumom, to znači da je signal slab i da ga treba samo dovoljno pojačati i biće sve u redu**".

Ovo je samo delimično tačno i tu je ključ svih problema. U stvari, pored određenog nivoa signala na ulazu, potrebno je da signal u odnosu na prateći šum bude dosta veći, tj. da odnos signala i šuma bude dovoljno veliki.

Ukratko, pored apsolutnog nivoa signala važan je i njegov odnos prema pratećem šumu.

Ovo je dosta lako proveriti. Uzmimo dva signala iz dve antene sa vrlo kratkim kablom. Prvi, čist i vrlo snažan oko 0.1 mV i drugi, vrlo slab sa dosta šuma oko 1 μ V. Slabiji signal pojačamo pojačavačem koji ima pojačanje 40 dB i na taj način ih po nivou izjednačimo. Kada poslušamo signale na prijemu videćemo da je razlika drastična iako su oba signala potpuno jednakog nivoa. Slabiji signal se nije potpuno oslobodio šuma i pored pojačanja i dovođenja na isti nivo sa signalom koji nema šuma. Šta se desilo?

Kada je signal slab to ne znači samo da je malog nivoa već i da je vrlo blizu nivoa šuma, tj. da je odnos jačine signala prema jačini šuma koji ga prati vrlo mali!

Kada takav signal sa lošim odnosom prema šumu pojačamo onda se zajedno sa signalom pojačava i šum. Njihov odnos na izlazu pojačavača ostaje isti, čak bude i lošiji, jer i pojačavač neminovno doda svoj sopstveni šum na već postojeći.

Kada signal, jednom na svom putu kroz prostor ili antenski kabl, bude oslabljen po nivou i približi se nivou šuma više nego što je njegov prateći šum, dolazi do degradacije odnosa signal/šum koja je nepopravljiva, kao što smo videli u gornjem primeru.

Kada kvalitetan i dovoljno jak signal, pre ulaska u prijemnik, prolazi kroz neki elemenat (dugačak ili nekvalitetan kabl, filter, razdelnik itd.) koji ga slabi, signal se može očuvati uz vrlo malu degradaciju, **ali samo u slučaju kada je pojačavač postavljen neposredno ispred elementa koji slabi signal**. Na taj način pojačavamo još nedegradirani signal, tj. podižemo mu nivo tako da kada izade iz oslabljivača još uvek ne padne u blizinu šuma. U slučaju kada se pojačavač nalazi iza oslabljivača on tada treba da pojača već degradirani signal koji je blizu šuma, i kao što smo videli na gornjem primeru, ne može više da pomogne, jer pojačava i signal i prateći šum!

Ponovimo još jedanput (po ko zna koji put) da pojačavač, bez obzira kako dobro napravljen, NE MOŽE da popravi odnos signal/šum koji je na njegovom ulazu (tj. na izlazu iz anene), već može postojeci da konzervira i SPREĆI njegovu dalju degradaciju!

Postoji takođe ukorenjeno verovanje da *“što više pojačavamo signal to on ima manje šuma”*.

Ovo uopšte nije tačno. Ukoliko se radi o slabim signalima treba ih pojačati toliko da prijemnik može normalno da radi, tj. da sopstveni šum prijemnika ne kviri postojeći odnos signala i pratećeg šuma. Kada se dostigne taj nivo svako dalje pojačavanje signala nema nikakvog smisla.

Ukoliko je signal već degradiran nikakvo dalje pojačanje ne može da popravi stvar!

I ovu tvrdnju nije teško proveriti. U prethodnom primeru sa dva signala možemo da pokušamo da slabiji signal pojačamo za dodatnih 20 dB, tj. umesto za 40 dB pojačamo ga za 60 dB. Tada ćemo imati kompletan paradoks. Signal koji je 20 dB jači od drugog, čistog i kvalitetnog, biće i dalje sa šumom!

Ovo je tipična situacija koja pokazuje kako pogrešan način razmišljanja dovodi do apsurdna.

Još jedan eksperiment može lepo da ilustruje sve ovo o čemu je bilo reči. Uzmite jedan snažniji pojačavač od 40 dB i jedan atenuator (oslabljivač) od 40 dB (može i komad dugačkog nekvalitetnog kabla). Vežite ih, u prvom slučaju, tako da signal iz antene dođe na pojačavač, a zatim na oslabljivač. Pošto su i pojačavač i oslabljivač istog pojačanja, odnosno slabljenja, njihovi efekti se potiru i na izlazu imamo isti nivo signala kao i na ulazu. Proverite kvalitet signala na prijemniku za neke slabije i jače signale. Videćete da su gotovo isti kao kada ih primamo direktno iz antene. Sada zamenimo mesta pojačavača i atenuatora tako da signal prvo ide u atenuator, a potom u pojačavač. Pogledajte sada kvalitet signala i bićete vrlo neprijatno iznenađeni. Gotovo svi signali će biti sa jakim šumom iako su svi signali istog nivoa kao u prethodnom slučaju!

Ovo najbolje ilustruje gde je mesto antenskim pojačavačima. **Uz antenu, a ne uz prijemnik!**

Zablude o decibelima

Ovde bi trebalo razmotriti još jednu situaciju koja je dosta tipična za praksu. To je ulazni signal u pojačavač i važnost njegovog odnosa prema pratećem šumu.

Zbog slabog ili nikakvog poznavanja teorije kod većine laika uobičajeno je mišljenje da je potpuno svedjedno da li potreban broj decibela pojačanja signala izvlačimo iz antene ili iz pojačavača. Oni jednostavno sabiraju decibele koje ima antena sa decibelima koje ima antenski pojačavač i proglašavaju ih kao pojačanje antene! Koliko je ovo pogrešno ilustrovaćemo jednim primerom:

Uzmimo da nam je potrebna antena od 20 dB da primimo neki vrlo slab signal. Imamo dve krajnje mogućnosti:

1. Da uzmemo antenu bez pojačanja (dipol) i pojačavač od 20 dB.

2. Da uzmemo samo antenu od 20 dB bez pojačavača.

U oba slučaja pojačanje će biti ono koje nam je potrebno, tj. 20 dB. Ako sada analiziramo dobijene rezultate imamo sledeću situaciju:

1. Uzmimo da je šumni broj pojačavača 1 dB i da iz dipol antene imamo signal od 6 dB μ V (2 μ V), sa pratećim šumom, koji antena takođe prima, od 0 dB μ V (1 μ V), što praktično znači da na ulazu u pojačavač imamo odnos signal/šum od 6 dB. Kada signal i šum prođu kroz pojačavač, na izlazu ćemo imati signal: 6+20=26 dB μ V, a šum: 1+0+20=21 dB μ V, pa će prema tome odnos signal/šum na izlazu biti 26-21=5 dB!

2. Signal iz (dugačke Yagi) antene koja ima 20 dB pojačanje u odnosu na dipol biće takođe 6+20=26 dB μ V, a šum 0 dB μ V, pa je odnos signal/šum 20-0=20dB, tj. signal daleko iznad šuma!

Uzmemo li, radi ilustracije, neku srednju varijantu, recimo antenu od 10 dB i pojačavač od 10 dB, imamo situaciju da je signal 6+10+10=26 dB μ V, a šum 1+0+10=11 dB μ V, pa je odnos signal/šum 26-

11=15 dB. Ista antena bez pojačavača daće signal $6+10=16\text{dB}\mu\text{V}$, a šum $0\text{dB}\mu\text{V}$, pa je odnos signal/šum $16-0=16\text{dB}$! **Bolje nego sa pojačavačem!**

Na osnovu ovoga jasno i nedvosmisleno se vidi da su decibeli iz antene, da ih tako nazovemo, “čisti”, jer ne kvare odnos signal/šum (antene pojačavaju samo signal, a ne i šum), a decibeli iz pojačavača “prljavi”, jer kvare odnos signal/šum (pojačavači pojačavaju jednako i signal i šum i plus dodaju svoj sopstveni šum).

Antena je najbolji pojačavač! To je jedini pojačavač koji pojačava signal tako što ga “vadi” iz šuma, tj. pojačavanjem signala ne pojačava i šum koji prima iz prostora oko antene.

Ono što se na kvalitetu signala dobije antenom, to je nemoguće postići ili prevazići bilo kojim drugim pojačavačem! Sva ostala pojačavanja signala pojačavaju i šum, pa je odnos signal/šum isti, čak i malo lošiji, zbog sopstvenog šuma pojačavača. Pojačavači mogu samo da konzerviraju postojeće stanje.

I da ponovimo još jedanput da se, upravo zbog ovoga, decibeli iz antene NE MOGU zamenjivati sa decibelima iz pojačavača!

Da je ovo jasno samo po sebi ne bi bilo raznih štapova, pendrek-antena, dipola i sličnih slabih antena koje se sa pojačavačima “poboljšavaju” i proglašavaju za “jake antene”!

Šumni broj

U literaturi se označava sa **NF** što je skraćenica od engleskog naziva **Noise Figure**.

Šumni broj pojačavača je mera degradacije odnosa signal/šum izlaznog (pojačanog) signala u odnosu na ulazni. Izražava se u decibelima. Predstavlja meru kvaliteta pojačavača u pogledu generisanja sopstvenog šuma. Naziva se i **faktor šuma**.

Poznato je da svaki pojačavač, osim što pojačava neki signal, i kvare odnos signal/šum time što mu dodaje određenu snagu sopstvenog šuma. Ovaj dodatni šum zavisi od kvaliteta pojačavača i ukoliko je pojačavač bolji, utoliko manje dodaje šuma signalu koga pojačava. Idealni pojačavač ne dodaje šum, pa je i njegov šumni broj jednak nuli, tj. $NF = 0\text{dB}$. Svaki realni pojačavač ima šumni broj koji je veći od nule. Pojačavač je utoliko bolji ukoliko ima manji šumni broj, tj. ukoliko je bliži idealnom. Koncept šumnog broja ustanovljen je tako da je nezavisan od pojačanja i širine frekventijskog opsega pojačavača, što nam omogućava lakše poređenje međusobno različitih pojačavača. Kako su karakteristike aktivnih pojačavačkih elemenata zavisne od radne frekvencije, to je i njihov šumni broj zavisn od frekvencije, pa je pri poređenju i definisanju šumnog broja neophodno specificirati frekvenciju.

To praktično znači da mi možemo upoređivati šumne brojeve uskopojasnog i širokopojasnog pojačavača različitih pojačanja, ali to moramo činiti na istoj (radnoj) frekvenciji.

Kao što smo već videli, odnos signal/šum je jedan od bitnih faktora kvaliteta prijemnog signala i stoga je veoma bitno pravilno razumeti i koristiti koncept šumnog broja pri projektovanju i održavanju komunikacionih sistema.

Koncept “osetljivosti” pojačavača takode je vezan za sopstveni šum, ali tako što je zavisn od širine propusnog opsega pojačavača (i mora se specificirati), pa je i međusobno poređenje različitih pojačavača otežano, jer zahteva ili da su pojačavači istog propusnog opsega ili da se izvrši normalizacija, tj. preračunavanje rezultata. **Osetljivost** predstavlja jačinu ulaznog signala za određeni odnos signal/šum na izlazu pojačavača i za unapred određenu širinu propusnog opsega. Za apsolutnu meru kvaliteta pojačavača (a ne samo za njihov relativan odnos) potrebno je i poznavanje ulaznog odnosa signal/šum.

Upravo zbog svega iznetog, mnogo je bolje operisati sa pojmom šumnog broja, jer je mnogo lakše upoređivati različite uređaje u domenu šuma.

Zabluda o šumnom broju pojačavača

Dešava se da mnogi proizvođači i graditelji pojačavača koji, valjda, zbog nedostatka uređaja za merenje šuma, za svoje pojačavače deklariraju onaj šumni broj koji proizvođači poluprovodnika daju za upotrebljeni tranzistor. Recimo, ako se u ulaznom stepenu nekog pojačavača nalazi tranzistor koji ima 0.5 dB šumni broj na određenoj frekvenciji, to znači da je to MINIMALNI šumni broj koji tranzistor MOŽE da ima, ali pod vrlo specifičnim i vrlo ograničenim uslovima:

1. Tranzistor **mora** na svom ulazu da vidi tačno određenu impedansu da bi na toj frekvenciji dao minimalni šum. Ovo je moguće u uskopojasnom režimu postići pomoću podešavanja ulaznog kola i merenja šuma. Međutim, u širokopojasnom režimu to jednostavno nije moguće zbog karakteristika kola na ulazu i promena koje na drugim frekvencijama izaziva podešavanje šumnog broja na jednoj. O promeni pojačanja i ostalih parametara pojačavača u celom frekventijskom radnom opsegu da i ne govorimo.

2. Struje i naponi, tj. radni režim tranzistora, mora da bude strogo određen, tj. onaj pri kome tranzistor daje minimalni šum. Međutim, za minimalnu IMD zahtevaju se upravo dijametralno različiti uslovi, pa su neophodni kompromisi i žrtve. Ponekad se, pri projektovanju, žrtvuje nešto od šumnih performansi kako bi se optimizirale performanse pojačavača za jake signale.

3. Gubici ulaznog kola, neprilagođenije izlazne impedanse, povratne sprege kojima se “pegla” kriva pojačanja, stabilizuje pojačavač ili smanjuju izobličenja, zatim uslovna stabilnost tranzistora, uticaj šuma sledećeg stepena, parazitetni efekti i sve drugo, utiče na to da pojačavač **ne može** da postigne šumni broj koji je dat za sam tranzistor.

Nažalost, prostor ne dozvoljava da se na primerima lako pokaže da je zabluda o jednakom minimalnom šumu tranzistora i pojačavača vrlo raširena, jer kako bi se inače desilo da pojedine firme reklamiraju da im pojačavači imaju isti ili čak MANJI šumni broj od šuma samog tranzistora?!

Ukoliko je šumni broj pojačavača niži, to je i njegov uticaj na signal, tj. degradaciju signala manji. Šumni broj, kao bitan element pojačavača, direktno utiče na veličinu degradacije signala kada on padne po nivou i približi se sopstvenom šumu koji generiše pojačavač.

Na VHF području zbog povećanog prirodnog praga termičkog šuma i povećanog urbanog šuma, smanjenje šumnog broja ispod 1 dB ne utiče značajno na kvalitet primljenog signala. Međutim, u onim komunikacijama (EME, DX, MS), gde se normalno računa i sa odnosima signal/šum od svega nekoliko decibela, ili čak sa odnosom S/N= 0 dB (signal i šum jednaki po snazi), ima mnogo smisla ići na sniženje šumnog broja ispod 1 dB, a na UHF i ispod 0.5 dB!

Stabilnost pojačavača

Pod stabilnošću tranzistora ili pojačavača podrazumevamo njegovu otpornost na samooscilovanje ili “divljanje” - kako se to obično kaže u žargonu među elektroničarima.

Koliko je ovaj problem aktuelan govori i jedan od tzv. “Marfijevih zakona” za elektroniku:

“Kad god napravimo oscilator on neće da osciluje, a kad napravimo pojačavač on odmah osciluje!”.

I nažalost, to nije daleko od istine!

U analizi razlikujemo stabilnost samog tranzistora i stabilnost celog, ponekad višestepenog, pojačavača. Tranzistor, kao pojačavački element, može biti, za dati opseg frekvencija, **bezuslovno** ili **uslovno** stabilan. Bezuslovna stabilnost tranzistora podrazumeva da, ukoliko se na njegov ulaz i izlaz priključe bilo koje vrednosti impedanse (od kratkog spoja do otvorenog), neće doći do pojave samooscilovanja. Matematički se na osnovu **S** parametara tranzistora može uvesti pojam faktora stabilnosti **K**, na osnovu čije vrednosti se može mnogo zaključiti o stabilnosti tranzistora.

Ukoliko je faktor stabilnosti nekog tranzistora **K** veći od jedinice (**K>1**) u celom frekventijskom opsegu, imamo posla sa **bezuslovno** stabilnim tranzistorom. Ukoliko je **K** manje od jedinice (**K<1**) u jednom delu frekventijskog opsega, onda je tranzistor u tom delu **uslovno** stabilan. Uslovna stabilnost podrazumeva da se sa ovakvim tranzistorom još uvek može napraviti pojačavač, ali da će on biti stabilan, tj. neće samooscilovati, samo ako se na njegovom ulazu i izlazu pojave impedanse iz strogo ograničenog opsega vrednosti. Van tih vrednosti on će stupiti u samooscilovanje i biće potpuno neupotrebljiv.

Zablude o stabilnosti

Kada je reč o stabilnosti pojačavača sve je vrlo slično kao kod samih tranzistora, osim što je moguće i sa *bezuslovno* stabilnim tranzistorima napraviti samo *uslovno* stabilan pojačavač. Ovo je vrlo čest slučaj u praksi kada se ne vodi dovoljno računa pri izradi ili projektovanju pojačavača. I gotovo po pravilu, skoro svi pojačavači koji su pravljani bez neke ozbiljnije analize i proračuna (kopiranjem i modifikovanjem bez stvarnog znanja o tome zašto je neko primenjeno rešenje takvo kakvo je) završavaju kao uslovno stabilni pojačavači i to u vrlo uskim granicama priključenih impedansi, iako su u njima upotrebljeni *bezuslovno* stabilni tranzistori.

I na kraju da rezimiramo: korišćenje *bezuslovno* stabilnih tranzistora u pojačavačima još uvek nam automatski NE garantuje da će i sagrađeni pojačavač biti *bezuslovno* stabilan!

Kada se koriste *uslovno* stabilni tranzistori, ako se ne preduzmu posebne mere, onda je i pojačavač uslovno stabilan i to obično u još nepovoljnijoj varijanti, tj. u još užem opsegu impedansi nego sam tranzistor.

Zablude o tranzistorima

Nažalost, kao što smo videli, ništa ni izdaleka ne garantuje da će svaki pojačavač napravljen sa nekim dobrim tranzistorom imati sve te karakteristike. Pre bi se reklo da će samo ekstremno mali broj onih najbrižljivije konstruisanih i izrađenih imati neke od tih osobina.

Zašto samo neke?

Pa iz prostog razloga što su pojedine osobine međusobno u direktnoj suprotnosti. Najbolji primer za to su minimalni faktor šuma i maksimalna linearnost, minimalni šum i maksimalno pojačanje, maksimalno pojačanje i stabilnost, ulazno prilagođenje i šumni broj, itd.

Kako pomiriti ove suprotstavljene zahteve?

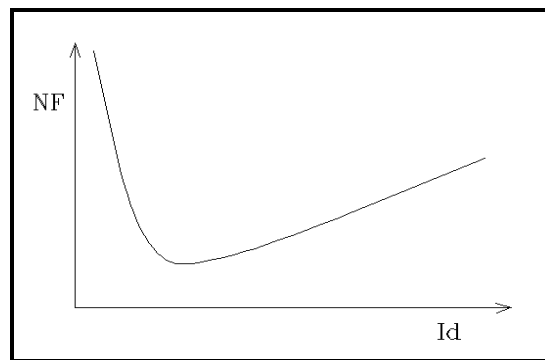
Nikako drugačije, osim napraviti kompromis i forsirati one uslove koji obezbeđuju osobine koje su važnije, žrtvujući one manje bitne.

Imajući to u vidu, jasno je da, posebno kada su ekstremno niskošumni pojačavači u pitanju, nije moguće napraviti kvalitetan pojačavač bez ozbiljnih proračuna, velikog iskustva u toj oblasti i laboratorijskih merenja kako bi se većina dobrih osobina upotrebljenih tranzistora ostvarila i u praksi. Potrebno je vrlo pedantno, proračunima obezbediti sve potrebne preduslove kako bi se tranzistoru omogućilo da zaista pruži ono što se od njega u datom slučaju očekuje. To znači da se unapred postavljaju određeni kvaliteti kao cilj, a ne pravi se pojačavač - "pa šta ispadne".

Upravo ovo je razlog što na tržištu imamo pojačavače različitih proizvođača, sa istim upotrebljenim tranzistorima, čak i sa relativno sličnim konstruktivnim rešenjima, ali sa tako neverovatno različitim performansama.

Uslovi za minimalni šum

Da bi jedan pojačavač imao minimalan šumni broj, potrebno je da se, prilikom njegovog projektovanja i izrade, strogo poštuju neka pravila koja će obezbediti da se sa određenim tipovima tranzistora postignu minimalni šumni brojevi.



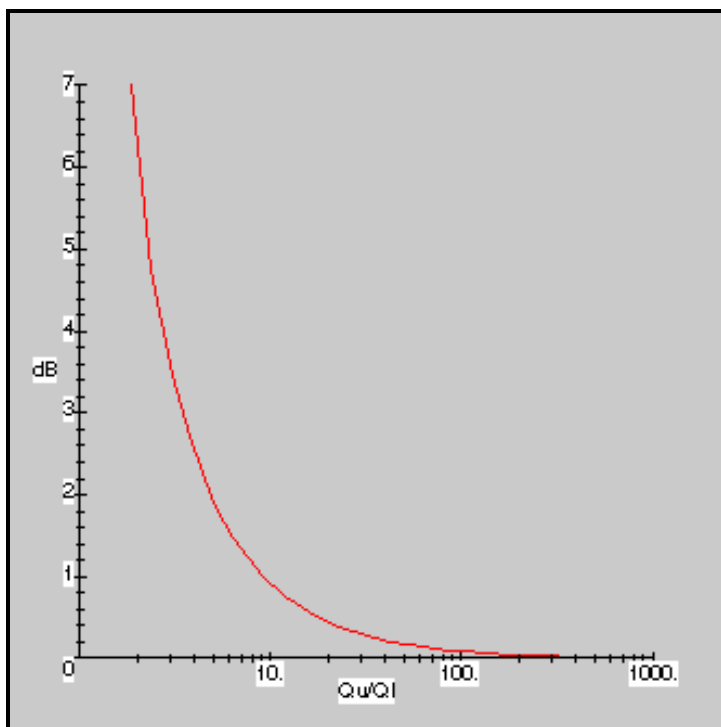
sl. 1. Zavisnost šumnog broja FE tranzistora od struje drejna

Optimalno prilagođenje ulaza

Potrebno je optimalno prilagoditi ulaz trnazistora, radi postizanja minimalnog šuma, uz ekstremno male gubitke ulaznog kola koje vrši transformaciju impedanse.

Tranzistor zbog toga, na svom ulazu "vidi" tačno određenu vrednost impedanse, Z_{nf} , pri kojoj generiše minimalni šum. Često je, zbog vrlo nepovoljne vrednosti impedanse pri kojoj se dobija minimalni šum, kod pojedinih tipova tranzistora ovaj zahtev dosta ozbiljan.

Vrednost impedanse Z_{nf} data je od strane proizvođača tranzistora i odnosi se na strogo definisane uslove pod kojima ona važi. Naime, vrednost impedanse Z_{nf} i minimalnog šumnog broja tranzistora dati su i važe samo pri tačno određenim jednosmernim naponima i strujama tranzistora.



sl. 2. Gubici ulaznog kola u zavisnosti od odnosa Q faktora neopterećenog (Q_u) i opterećenog kola (Q_l)

impedansu antene, koja je obično 50 oma, transformišemo na zadatu vrednost impedanse Z_{nf} .

Ovu transformaciju obavlja ulazno kolo pojačavača.

Transformacija se mora obaviti sa što manje gubitaka pošto su oni, pored tranzistora, drugi najvažniji faktor koji utiče na povećanje šumnog broja pojačavača. Zapravo, gubici ulaznog kola direktno povećavaju šumni broj pojačavača.

Gubici u ulaznom kolu za prilagođenje (transformaciju) impedanse zavise od odnosa Q faktora za neopterećeno (Q_u) i opterećeno (Q_l) kolo i dati su na *sl. 2*.

Da bi gubici u kolu bili što manji potrebno je da odnos Q_u/Q_l bude što veći.

Pravilnim izborom parametara kola, pažljivim projektovanjem i praktičnim izvodenjem moguće je postići maksimalnu vrednost za ovaj odnos, a time i minimalne gubitke za dati slučaj.

Kod pojačavača za 144 MHz na ulazu treba koristiti umesto klasičnog kola, helikoidni rezonator, koji daje dvostruko viši Q_u od običnih kalema, kao što je predloženo u *Ref. 1*.

Na 432 MHz i višim frekvencijama najbolje je koristiti koaksijalne rezonatore, koji imaju najveće faktore dobrote Q_u . Mogu se uspešno koristiti i rezonatori sa trakastim vodovima koji imaju nešto manji Q_u ali još uvek dovoljno visok. Rezonatori moraju biti sa vazduhom kao dielektrikom i karakteristične impedanse koja se kreće oko 77 oma, jer tada imaju najveću vrednost faktora ζ_{theta} , a time i najveći Q_u , kao što se vidi na *sl. 3*. Opširnije o ovome može se naći u *Ref. 1*.

Tipična zavisnost šumnog broja od struje tranzistora data je na *sl. 1*.

Logika nam nalaže da u pojačavaču obezbedimo upravo takve radne uslove za tranzistor u cilju obezbeivanja optimalnih šumnih karakteristika.

Kod većine FE tranzistora, a posebno onih u GaAs tehnologiji, impedansa Z_{nf} se u velikoj meri razlikuje od impedanse koju tranzistor treba da ima na svom ulazu da bi imao maksimalno pojačanje.

Ovo žneprilagođenje' na ulazu smanjuje pojačanje tranzistora, ali se na ovu žžrtvu' svesno ide, jer je minimalni šumni broj primarni zahtev. Osim toga, pojačanje je često i mnogo veće nego što nam je neophodno, a može da bude i štetno za prijemnik, kada se tiče njegove otpornosti na jake signale.

Da bismo zadovoljili ovaj zahtev, potrebno je da

Uslovi za bezuslovnu stabilnost

Gotovo svi noviji GaAs FET-ovi su bezuslovno stabilni ($K > 1$) tek iznad oko 8 GHz, tako da je njihov rad na nižim frekvencijama skopčan s veoma izraženom tendencijom ka samooscilovanju. Naime, zbog svog izuzetno velikog pojačanja i uslovne stabilnosti ($K < 1$) u području VHF i UHF frekvencija, vrlo je teško napraviti bezuslovno stabilan pojačavač.

Kako je izlazno prilagođenje tranzistora usko povezano sa stabilnošću, to se ono i koristi za različite metode kompenzacije tranzistora, kao i specifičnog opterećivanja izlaznog kola, u cilju popravljanja stabilnosti pojačavača.

Prilagođenje izlaza tranzistora

Prilagođenje izlaza i kompenzacija S parametara tranzistora, koje obezbeđuje stabilan rad, uvek je mnogo teže nego prilagodavanje ulaza na minimalni šum.

Posebno je problematično prilagođenje izlaza zbog činjenice da se često koriste kaskadno vezani pojačavači, tako da drugi pojačavač, zbog svog neprilagođenja ulaza, tj. prilagođenja po šumu, veoma loše opterećuje prvi pojačavač, koji onda lako stupa u oscilovanje.

Prilagođenje tranzistora na izlazu nema (ili ima veoma malo) uticaja na veličinu šuma, međutim ovo prilagođenje je od presudne važnosti za stabilnost i pojačanje tranzistora.

Veliki broj konstruktora se tokom poslednje decenije sukobio sa ovim problemom i rešenja su uglavnom bila u pravcu žrtvovanja velikog dela pojačanja zarad stabilnog rada. Međutim, pojačavači su i dalje ostajali samo uslovno stabilni, ali u nešto širim granicama radnih frekvencija i priključenih impedansi.

Kao provera stabilnosti pojačavača može da posluži i uočavanje, eventualne, male promene struje tranzistora sa isključivanjem i uključivanjem antene. **Ako je pojačavač bezuslovno stabilan ne bi smelo da bude promene struje kada se uključi ili isključi antena.**

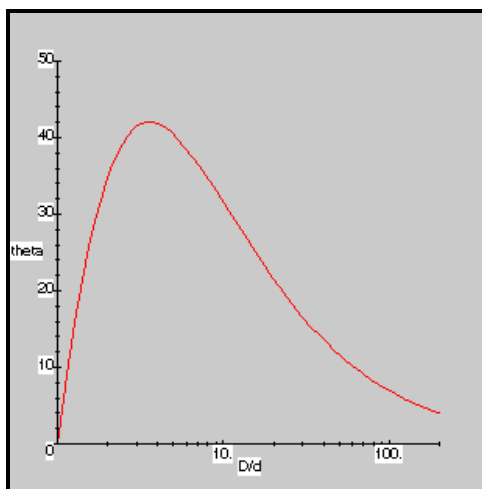
Kompenzacija S parametara tranzistora

Za bezuslovnu stabilnost pojačavača sa GaAs FET -om, jedino kompenzacije S parametara tranzistora uz ozbiljnu računarsku analizu i optimizacione metode mogu da daju rezultate.

Naime, kako je K faktor stabilnosti definisan preko S parametara tranzistora, često je moguće dodavanjem kompenzacionih elemenata promeniti parametre ovako kompenzovanog "novog" tranzistora tako da on ima bezuslovnu stabilnost, tj. $K > 1$ u celom radnom frekvencijskom opsegu.

Naravno, za ovakav zahvat potrebno je mnogo toga uraditi, ali je uz pomoć savremenih računarskih tehnika postalo znatno lakše.

Upravo jedna takva kompenzacija je opisana u predloženoj konstrukciji pojačavača za 144 MHz datog u **Dodatku** ovog teksta.



sl. 3. Vrednost faktora θ' , odnosno Q_u koaksijalnog rezonatora u zavisnosti od odnosa D/d , tj. od karakteristične impedanse voda.