

polacijom mogu se dobiti i druge vjerojatnosti (postoci vremena). Pomoću dijagrama na sl. 8 mogu se dobiti korekcije za druge postotke terena. (O lokaciji i smještaju odašiljača na vrlo visokim frekvencijama v. u poglavlju Elektronički uređaji u radio-prijenosu.)

Valovi vrlo visokih frekvencija se na radio-horizontu difrakcijom ne rasprostiru daleko iza tog horizonta, ali se mogu, slijedeći zakrivljenost Zemljine površine, rasprostirati na udaljenost od nekoliko stotina kilometara kroz prirodne troposferne valovode koji nastaju pod posebnim meteorološkim uvjetima, a i na više od 1000 km refleksijom i difrakcijom na slojevitim tvorevinama u troposferi i raspršivanjem na turbulentnim nehomogenostima troposfere. Za uspostavljanje veza uz korištenje tih efekata potrebni su odašiljači velike snage, prijemnici velike osjetljivosti i oštro usmjerene antene. Prijem u tim vezama prate fedinzi zbog interferencije valova i fluktuacijâ u ionosferi.

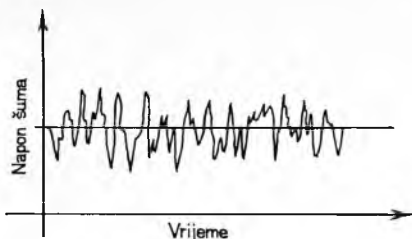
LIT.: D. E. Kerr, Propagation of short radio waves, New York 1951. — Л. А. Вайнштейн, Электромагнитные волны, Москва 1957. — П. П. Грудинская, Распространение ультракоротких волн, Москва 1960. — Р. Кинг, У Тай-Цзунг, Рассеяние и дифракция электромагнитных волн, Москва 1962. — F. Du Castel, Propagation troposphérique, Paris 1963. — G. Bronzi, Fondamenti di radiotrasmissioni, Roma 1963. — А. Г. Аренберг, Распространение дециметровых волн и сантиметровых волн, Москва 1966. — И. В. Крутецкий, Дифракция электромагнитных волн на проводящих телах в морской среде, Ленинград 1969. — I. Ranzi, Propagazione troposferica e ionosferica delle onde elettromagnetiche, Roma 1969. — О. Б. Черный, Распространение радиоволн, Москва 1972.

Z. Smrkvič

ŠUM

Šum se zovu spontane električne fluktuacije koje se pojavljuju u električnim i elektroničkim (komunikacijskim) sistemima. Šum je nepoželjan jer ograničava moć i kvari kvalitet prijenosnih sistema.

Šum se može čuti i vidjeti. Na izlazu pojačala s velikim pojačanjem, kojemu na ulaz nije priveden nikakav signal, moći će se npr. registrirati fluktuacije napona prikazane na sl. 1. Ako



Sl. 1. Prikaz napona bijelog šuma

se na izlaz pojačala priključi zvučnik, čut će se iz njega šum. U televizijskim prijemnicima šum se reproducira na ekranu reproductorske cijevi zajedno s korisnim signalom, i kad je napon signala prenizak, vidi se kao smijeg.

S obzirom na izvor nastajanja, šum se dijeli na dvije grupe: na šum koji nastaje *izvan sistema* (kozmički, atmosferski, elektrostatički, od aparata i uređaja, itd.) i na šum koji nastaje *unutar sistema* (termički šum, šum u vakuumskim elektronkama, šum poluvodičkih komponenata, kontaktni šum i sl.). Ovdje će biti govora samo o šumu u sklopovskoj tehnici; s obzirom na to da je on neizbježan pratilac električnog signala, potrebno je poznavati i istraživati njegove osobine.

Objašnjenje pojmova

Pri razmatranju i analizi šuma susreću se neki specifični pojmovi, koje treba radi razumijevanja daljeg izlaganja najprije objasniti i definirati.

Ekvivalentni otpor šuma R_{eq} . Uslijed gibanja toplinski uzbuđenih elektrona u vodiču poteče u njemu struja, zbog koje se na njegovim krajevima pojavljuje razlika potencijala. Nyquist je pokazao da je aritmetička sredina kvadratâ napona šuma jednaka

$$\overline{e_s^2} = 4 k T \Delta f R_{eq}, \quad (1)$$

gdje je k Boltzmannova konstanta ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K), T apsolutna temperatura, Δf širina frekvencijskog pojasa koji se promatra i R_{eq} ekvivalentni otpor vodiča.

Na temperaturi 27 °C (300 K) dobije se iz relacije (1) za ekvivalentni otpor u omima brojčana jednadžba

$$R_{eq} = 0,66 \cdot 10^{20} \frac{e_s^2}{\Delta f}$$

(e_s u voltima, Δf u hercima).

Na taj se način može bilo koji izvor šuma zamijeniti ekvivalentnim otporom šuma definiranim prema relaciji (1).

Širina frekvencijskog pojasa ili frekvencijskog opsega Δf je razmjerno uski pojas frekvencijâ (npr. propusni pojas nekog uređaja) raspoređen oko svoje središnje frekvencije f . Unutar tog pojasa snaga je šuma po jedinici frekvencije svugdje jednaka. Pojam širine frekvencijskog pojasa odnosi se uvijek na uređaj o kome je riječ, kojim se mjeri, itd.

Kad bi se pri izračunavanju šuma pojačala, filtera itd. upotrijebila kao širina frekvencijskog pojasa, što je inače uobičajeno, frekvencijski opseg B između dvije određene točke (npr. između točaka propuštanja pola snage), ne bi se redovito dobio dovoljno točan podatak za ukupno propuštenu snagu šuma. Stoga se — ako se želi veća točnost — uzima u račun zamišljena efektivna ili *ekvivalentna širina pojasa* šuma B_{eq} jednaka širini frekvencijskog pojasa idealnog filtra s propusnom frekvencijskom karakteristikom pravokutnog oblika (tj. s okomitim bokovima i vodoravnim gornjim dijelom) koji bi propuštao istu ukupnu snagu šuma kao krugovi promatranog uređaja. Ekvivalentna širina pojasa B_{eq} dobiva se iz širine pojasa B množenjem s faktorom koji je za različite slučajeve poznat i kojemu je vrijednost za uređaje s velikim brojem usklađenih krugova bliska jedinici.

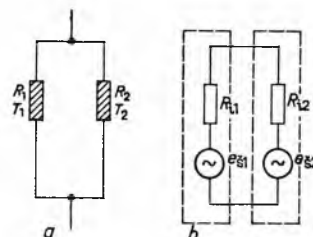
Temperatura šuma T_s je ona (pretpostavljena) temperatura pri kojoj bi na izlazu iz nekog uređaja snaga samo termičkog šuma bila jednaka snazi ukupnog stvarnog šuma na radnoj temperaturi. Ova veličina služi kao mjerilo šuma i iznosi npr. u stepenu miješanje radara 1200–2000 K, a u hladnom parametarskom pojačalu s varaktorskom diodom (v. *Elektronika, uređaji mikrovalne tehnike*, str. 577) samo ~ 30 K.

Ako je snaga šuma na izlazu iz uređaja P_s , a širina frekvencijskog opsega Δf , temperatura šuma iznosi (v. jedn. 4):

$$T_s = \frac{P_s}{k B_{eq}} \quad (2)$$

Ako se uvrsti $P_{s1} = P_s/\Delta f$, tj. ako se snaga šuma karakterizira snagom po jedinici širine frekvencijskog opsega, dobije se jednadžba $T_s = P_{s1}/k$, a ako se uvrsti numerička vrijednost konstante k u jedinicama J/K, dobije se računaska formula $T_s = 7,25 \times 10^{22} P_{s1}$ (T_s u kelvinima, P_{s1} u W/Hz). Prema jedn. (2) temperatura šuma je funkcija frekvencije. (I snaga P_{s1} po jedinici širine frekvencijskog opsega ovisi, općenito, o frekvenciji. Šum kojemu je P_{s1} neovisan o frekvenciji zove se, u analogiji sa svjetlom, *bijeli šum*. Nasuprot tome su u *obojenom šumu* pojedine frekvencije ili pojedini frekvencijski opsezi naročito naglašeni.)

Ekvivalentna temperatura šuma T_{eq} . Ako su dva otpornika otpora R_1 i R_2 spojena paralelno, prema sl. 2, i ako je jedan



Sl. 2. Sheme za tumačenje ekvivalentne temperature šuma. a Shema sklopa, b nadomjesna shema

na temperaturi T_1 , a drugi na temperaturi T_2 , aritmetička je sredina kvadratâ napona šuma unutar dionog sklopa što ga tvore samo ti otpornici među sobom spojeni u seriji, s otporom $R_1 + R_2$, jednaka

$\overline{e_s^2} = 4 k T_1 R_1 \Delta f + 4 k T_2 R_2 \Delta f = 4 k T_{eq} (R_1 + R_2) \Delta f$, gdje je T_{eq} *ekvivalentna temperatura šuma* tog dionog sklopa de-

finirana jednadžbom

$$T_{\text{eq}} = T_1 \frac{R_1}{R_1 + R_2} + T_2 \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

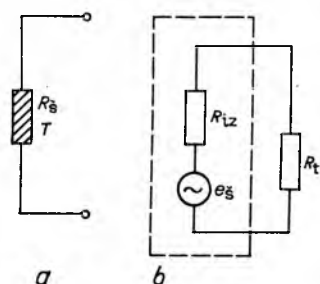
Maksimalna snaga šuma $P_{\text{s max}}$ je ona snaga koja se prenosi na opteretni otpor R_t pri pravilnom prilagođenju, tj. kad je otpor izvora šuma R_{1z} jednak opteretnom otporu, $R_{1z} = R_t$ (sl. 3). Ona iznosi

$$P_{\text{s max}} = \left(\frac{e_s}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{R_t} = \frac{e_s^2}{4 R_t}. \quad (3)$$

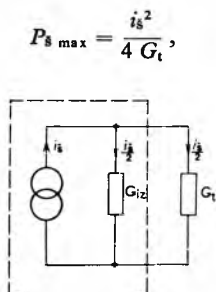
Nakon uvrštenja izraza (1) dobije se

$$P_{\text{s max}} = k T \Delta f. \quad (4)$$

Isto vrijedi i za strujni izvor šuma kad je $G_{1z} = G_t$ (sl. 4):



Sl. 3. Prijenos maksimalne snage šuma na otpor R_t tereta. a) Otpornik otpora R_s kao izvor termičkog šuma, b) nadomjesna shema za naponski izvor šuma. Otpori R_{1z} i R_t su bešumni, a najveća se snaga šuma prenosi na otpor R_t tereta kad je $R_{1z} = R_t$.



Sl. 4. Nadomjesna shema strujnog izvora šuma s teretom. G_{1z} i G_t bešumne vodljivosti izvora i tereta. Najveća se snaga šuma prenosi na otpor tereta kad su $G_{1z} = G_t$.

gdje su G_i i G_t vodljivosti izvora šuma i tereta. Nakon uvrštenja izraza (8) dobije se također

$$P_{\text{s max}} = k T \Delta f. \quad (5)$$

Iz izraza (4) i (5) vidi se da je maksimalna snaga šuma pridružena otporu neovisna o veličini otpora koji generira šum i da ona jedino ovisi o širini frekvencijskog opsega Δf i o apsolutnoj temperaturi T .

Važno je napomenuti da kod paralelno vezanih otpora koji su na istoj temperaturi ne postoji prijenos energije šuma iz jednog otpora u drugi.

Odnos signala prema šumu u prijenosnim je sustavima definiran kao odnos prosječne snage signala prema prosječnoj snazi šuma mjerenih u istoj točki sistema. Njihov se *energetski* odnos zove odnos signala prema šumu, označava se sa S/Š i obično se izražava u decibelima

$$\frac{S}{\text{Š}} = 10 \log \frac{P_s}{P_{\text{s}}} \text{ dB}, \quad (6)$$

gdje je P_s prosječna snaga signala, a P_{s} prosječna snaga šuma.

Pod *signalom* se razumijeva val nosilac informacije koji se sistemom želi prenijeti. Šum je u većini općenitih slučajeva razlika između primljenog i željenog vala. Dozvoljena razlika između razine signala i razine šuma ovisi o prirodi signala koji se prenosi.

Faktor šuma F_{s} može se definirati kao kvocijent odnosa signal/šum na ulazu u četveropol i odnosa signal/šum na izlazu iz četveropola:

$$F_{\text{s}} = \frac{(S/\text{Š})_{\text{ul}}}{(S/\text{Š})_{\text{iz}}}.$$

Ekvivalentna je definicija da je faktor šuma kvocijent odnosa ukupne snage na ulazu u pojačalo prema ulaznoj snazi šuma i ukupne snage na izlazu iz pojačala prema izlaznoj snazi šuma:

$$F_{\text{s}} = \frac{\frac{P_{\text{ul}}}{(P_{\text{s}})_{\text{ul}}}}{\frac{P_{\text{iz}}}{(P_{\text{s}})_{\text{iz}}}} = \frac{P_{\text{ul}}}{(P_{\text{s}})_{\text{ul}}} \cdot \frac{(P_{\text{s}})_{\text{iz}}}{P_{\text{iz}}} = \frac{(P_{\text{s}})_{\text{iz}}}{(P_{\text{s}})_{\text{ul}}} \cdot \frac{1}{A},$$

gdje je P_{ul} ukupna snaga na ulazu u četveropol, P_{iz} ukupna snaga na izlazu iz četveropola, $(P_{\text{s}})_{\text{ul}}$ snaga šuma na ulazu u četveropol $(P_{\text{s}})_{\text{iz}}$ snaga šuma na izlazu iz četveropola i A pojačanje ($A = P_{\text{iz}}/P_{\text{ul}}$).

Faktor šuma obično se izražava u decibelima. Ako ima n kasnakadno vezanih sistema jednake širine pojasa, kojima su $F_{\text{s}1}$ i $F_{\text{s}2}$ faktori šuma svakog pojedinog sistema, a A_1 , A_2 su pojačanja pojedinih sistema, ukupni je faktor šuma dan Früssovim izrazom

$$F_{\text{s uk}} = 1 + (F_1 - 1) + \frac{F_2 - 1}{A_1} + \frac{F_3 - 1}{A_1 \cdot A_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{A_1 \cdot A_2 \dots A_{n-1}}.$$

Termički šum

Termički šum otpora javlja se u otpornicima zbog nepravilnog toplinskog gibanja elektrona a ovisan je o temperaturi. Još 1928 J. B. Johnson je objasnio neželjeni utjecaj termičkog šuma, te se ovaj šum zove i *Johnsonov šum*. Elektroni stavljeni u gibanje i ubrzani kolizijom s termički pobuđenim molekulama proizvode promjenu magnetskog polja koja uzrokuje gibanje elektronskog plina (nagomilanih slobodnih elektrona), što na krajevima vodiča rezultira u naponu šuma.

Nyquistov teorem kaže da se svaki otpor koji se javlja kao izvor šuma (sl. 5 a) može nadomjestiti naponskim generatorom elektromotorne sile jednake $e_s = (4 k T \Delta f R_{1z})^{1/2}$ i jednim bešumnim unutarnjim otporom R_s , s time da je $R_s = R_{1z}$, kako je pokazano na sl. 5 b.

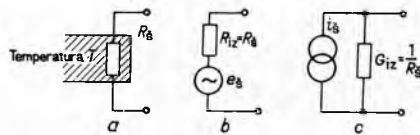
Prema Nyquistu iznosi, dakle, aritmetička sredina kvadrata elektromotorne sile šuma

$$\overline{e_s^2} = 4 k T \Delta f R_t, \quad (7)$$

za serijski spoj izvora šuma, i srednja vrijednost kvadrata struje šuma

$$\overline{i_s^2} = 4 k T \Delta f G_t, \quad (8)$$

za paralelni spoj izvora šuma (sl. 5 c). Ovdje je k Boltzmannova konstanta, Δf širina frekvencijskog opsega, R_t otpor, a G_t vodljivost otpornika (izvora) koji proizvodi šum. Na temperaturi $T = 300 \text{ K}$ ($\sim 27^\circ \text{C}$) je $4 k T = 1,66 \cdot 10^{-20} \text{ J}$.



Sl. 5. Nadomjesni krugovi za otpornik koji proizvodi termički šum (a) na temperaturi T ; b) serijski ekvivalentni krug, c) paralelni ekvivalentni krug; e_s elektromotorna sila šuma, i_s struja šuma, R_{1z} bešumni otpor izvora, G_{1z} bešumna vodljivost

Termički šum u električnim mrežama koje sadrže kapacitet C , induktivitet L i otpor R , čine rezonancijski titrajni krug s frekvencijom rezonancije f_0 i nalaze se na temperaturi T , može se izračunati pomoću teorema jednake raspodjele energije statističke fizike. Prema klasičnoj primjeni tog teorema sadržaj energije sistema u termičkoj ravnoteži iznosi $\frac{1}{2} k T$ po stepenu slobode što ga sistem ima i po elementu u kojem se energija nagomilava. Pri tom se pretpostavlja da je energija u sistemu jednoliko raspodijeljena. Kako prema modernim teorijama kvantne mehanike energija nije jednoliko raspodijeljena nego kvantizirana, klasični izraz za prosječni sadržaj energije po stepenu slobode treba pomnožiti s tzv. Planckovim faktorom $p(f)$, koji iznosi

$$p(f) = \frac{hf}{kT} (e^{hf/kT} - 1)^{-1},$$

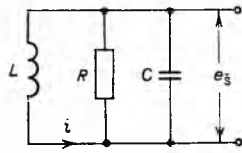
gdje je f frekvencija, a h Planckova konstanta ($6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$).

U električnom sistemu broj stepena slobode odgovara broju načinâ na koji se energija može nagomilavati u sistemu. U promatranom sistemu energija se može nagomilavati kao kinetička i kao potencijalna. Prema tome, prosječna kinetička energija promatrana unutar kompletnog ciklusa jednaka je prosječnoj potencijalnoj energiji i jednaka $\frac{1}{2} k T p(f)$.

Slobodna energija šuma otpornika u električnom krugu prema sl. 6 raspodjeljuje se na analogan način na energiju magnetskog i energiju električnog polja, pa se za takav krug može pisati:

$$-L i_s^2 = -C u_s^2 = -k T p(f).$$

Na osnovi toga može se izvesti, uz određene pretpostavke o spektralnoj raspodjeli snage šuma koje su rezultati potvrdili, da aritmetička sredina kvadratâ šuma na kondenzatoru kapaciteta C iznosi $u_s^2 = k T p(f)/C$, aritmetička sredina kvadratâ šuma bilo kojeg otpora $u_s^2 = 4 k T R \Delta f p(f)$, aritmetička sredina kvadratâ struje šuma $i_s^2 = 4 k T G \Delta f p(f)$. Budući da je na normalnoj sobnoj temperaturi (300 K) i frekvencijama koje se danas normalno upotrebljavaju (sve do mikrovalnog područja) $h f/k T \ll 1$, u tim je uvjetima $p(f) \approx 1$, pa se taj faktor može zanemariti. Znatnija odstupanja nastaju tek iznad frekvencije $3 \cdot 10^{12}$ Hz ($\lambda < 0,1$ mm). Prema tome može se s dobrim približenjem pisati, kako je to učinio Nyquist, da je u titrajnom krugu $u_s^2 = k T/C$ i da je općenito aritmetička sredina kvadratâ napona šuma bilo kojeg otpora $u_s^2 = 4 k T R \Delta f$, aritmetička sredina kvadratâ struje šuma $i_s^2 = 4 k T G \Delta f$. Može se pokazati da je u tim uvjetima maksimalno raspoloživa snaga šuma $P_s = k T \Delta f$, tj. $k T$ po jedinici širine frekventijskog pojasa.



Sl. 6. Šum u krugu LRC na rezonancijskoj frekvenciji f_s

Snaga termičkog šuma u električnim mrežama koje osim otpora, induktiviteta i kapaciteta sadrže i pasivne elemente, kao što su antene, mikrofoni, zvučnici itd., na temperaturi T jednaka je snazi termičkog šuma ekvivalentnog kruga na istoj temperaturi.

Termički šum prijemne antene koja se nalazi u slobodnom prostoru na temperaturi T_A , napajana je iz izvora visokofrekventne struje jakosti I , ima otpor zračenja R_A a snagu zračenja $\frac{1}{2} I^2 R_A$, jednak je

$$P_{sA} = k T_A \Delta f. \quad (9)$$

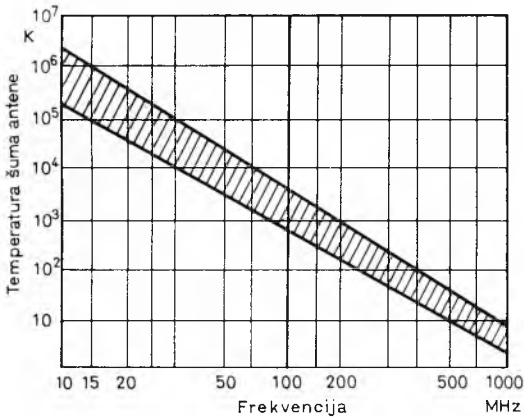
Dakle, primjenom Nyquistovog teorema dobiva se da je snaga termičkog šuma antene jednaka snazi ekvivalentnog kruga antene na temperaturi T_A u frekventijskom intervalu Δf . Ukupna temperatura šuma antene koja prima šum iz svih smjerova iznosi

$$T_{A uk} = T_k + T_a + T_z + T_g,$$

gdje je T_k temperatura šuma kozmičkog zračenja, T_a temperatura šuma atmosferskog zračenja, T_z temperatura šuma zračenja koja dolaze sa zemlje i T_g temperatura šuma uslijed omskog otpora, otpora zračenja i drugih unutarnjih gubitaka u anteni.

Ukupna temperatura šuma antene ovisi o položaju i usmjerenosti antene, a također o promjenama koje nastupaju zbog rotacije zemlje.

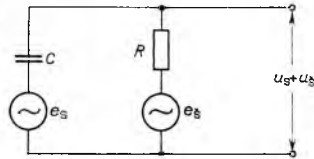
Za prijemnu antenu duljine $\lambda/2$ koja se nalazi na visini $\lambda/4$ iznad zemlje, temperaturu šuma T_A pokazuje dijagram na sl. 7 (v. poglavlje Antene u ovom članku, str. 605).



Sl. 7. Temperatura šuma prijemne antene duljine $\lambda/2$ postavljene na visini $\lambda/4$ iznad zemlje

Termički šum mikrofona. U mikrofona pojavljuje se šum zbog termičkog gibanja molekula u okolišnjem uzduhu, zbog termičkog gibanja atoma u mehaničkom titrajnom sustavu (u što se ovdje neće ulaziti) i zbog termičkog šuma u pojedinim dijelovima mikrofona ili mikrofonskog sklopa koji imaju određeni omski otpor.

Termičko gibanje molekula uzduha uzrokuje stanoviti izmjenični tlak na membranu mikrofona, što izaziva šum. Ova izmjenična komponenta, koja se superponira statičkom atmosferskom tlaku, to je veća što je temperatura uzduha viša, što je akustički otpor isijavanja membrane veći i što je širi frekventijski opseg koji se mikrofonom prenosi.



Sl. 8. Ekvivalentni krug kondenzatorskog mikrofona

Napon šuma mikrofona na temperaturi T jednak je, prema Nyquistovom teorem, naponu šuma ekvivalentnog kruga mikrofona. Nivo šuma mikrofona

ovisi i o vrsti mikrofona kako je navedeno u nastavku.

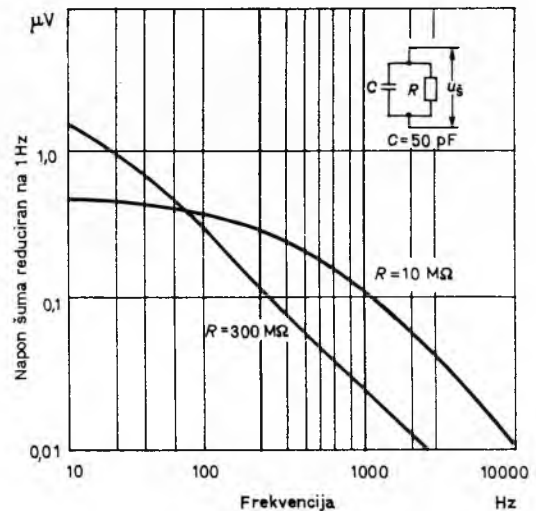
Za kondenzatorski mikrofona prikazana je na sl. 8 nadomjesna shema u kojoj C znači kapacitet mikrofona, R otpor izolacije i opteretnog otpornika, e_s elektromotornu silu signala, e_s elektromotornu silu šuma, u_s napon signala i u_s napon šuma na izlazu iz mikrofona. Struja šuma u krugu tog mikrofona iznosi

$$i_s = \frac{e_s}{R + \frac{1}{j \omega C}}$$

Napon šuma na priključnicama mikrofona iznosi

$$u_s = i_s \cdot R = \frac{e_s \cdot j \omega C R}{j \omega C R + 1}$$

Ako je $j \omega C R \gg 1$ bit će $u_s \approx e_s$.



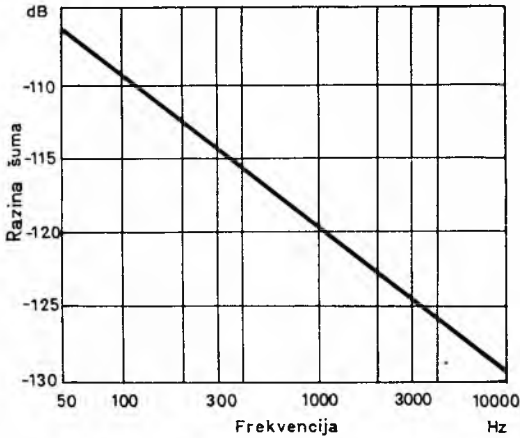
Sl. 9. Napon šuma (sveden na 1 Hz) kondenzatorskog mikrofona u ovisnosti o frekvenciji

Napon šuma kondenzatorskih mikrofona javlja se kao termički šum opteretnog otpora i izolacijskog otpora materijala između membrane i protuelektrode. Napon signala nema utjecaja na napon šuma. Na dijagramu sl. 9 prikazan je reducirani napon šuma kondenzatorskog mikrofona kapaciteta $C = 50$ pF za dvije vrijednosti opteretnog otpora, i to za $R = 300$ MΩ i $R = 10$ MΩ. Napon šuma prikazan na slici sveden je na širinu frekventijskog opsega od 1 Hz. Vidi se iz dijagrama da tako reducirani napon šuma varira sa $1/f^2$ u radnom frekventijskom području mikrofona.

Do šuma u kristalnim mikrofona dolazi od istosmjernog otpora kristala (tj. zbog termičkog gibanja molekula u kristalu), kojemu je paralelan kapacitet kristalnog elementa. Napon mu varira sa $1/f^2$ i podliježe istom zakonu kao i napon šuma kondenzatorskih mikrofona, ali je u ovim mikrofona znatno veći.

Napon termičkog šuma u ugljenim mikrofona pojavljuje se zbog spontanijih fluktuacija ugljenih zrnaca, koje uzrokuju promjenu otpora na kontaktnim mjestima. Napon šuma raste s povećanjem mikrofonske struje. Stoga ta struja ne smije biti veća od 100 ... 200 mA, već prema tipu mikrofona, jer, ako je veća, termički šum naglo raste i dolazi do pojave kuhanja, tj. na kontakt-

nim mjestima javljaju se užarene točke. Frekvencijska karakteristika spektra šuma ugljenog mikrofona dana je na sl. 10.



Sl. 10. Frekvencijska karakteristika spektra šuma ugljenog mikrofona

Šum u vakuumskim elektronkama

Pored otpornika, elektronke predstavljaju u sklopovima značajan izvor šuma. On se u njima pojavljuje zbog efekta sačme, efekta treperenja, sekundarne emisije, raspodjele struje i pozitivnih iona. Šum elektronki ograničava u pojačalima maksimum pojačanja.

Efekt sačme (zove se i šot-efekt, ili šrot-efekt, od engl. shot i njem. Schrott, sačma) najznačajniji je uzročnik šumova u elektronkama. 1918 objasnio je taj efekt W. Schottky fluktuacijama anodne struje u vakuumskim elektronkama, koje nastaju zbog toga što ta struja nije sastavljena samo od kontinuirane komponente nego i od djelića diskretnih naboja nošenih od svakog elektrona koji stigne na anodu u slučajnom vremenu.

Srednja kvadratna vrijednost fluktuacije anodne struje pri efektu sačme u području njezina zasićenja iznosi

$$\overline{i_s^2} = 2 q I_a \Delta f, \quad (10)$$

gdje je q naboj elektrona, a I_a je jakost istosmjerne anodne struje zasićenja. U praksi vakuumske elektronke rade s anodnom strujom znatno manjom od struje zasićenja, pa je mjerena vrijednost stvarnog šuma mnogo niža od one koju daje ta jednadžba.

Zbog prostornog naboja koji oko katode stvara virtuelnu katodu i određeni potencijalni minimum (v. *Elektronika, sastavni dijelovi*, str. 462), smanjuju se spontane fluktuacije broja elektrona koji s katode stižu na anodu. To vrijedi naročito za elektronke s rešetkom. To smanjenje efekta sačme uzima se u obzir uvođenjem faktora redukcije šuma $\Gamma^2 < 1$ u jedn. (10), te se za aritmetičku sredinu kvadrata struje šuma piše

$$\overline{i_s^2} = 2 q I_{sr} \Gamma^2 \Delta f, \quad (11)$$

gdje je I_{sr} srednja anodna struja. Faktor redukcije šuma Γ^2 ovisi o veličini emisije katode; pod normalnim uvjetima rada kreće se između 0,15 i 0,5.

Izračunavanje faktora redukcije šuma za pojedine vrste elektronki je zamršen. Stoga će ovdje biti dani samo konačni rezultati koji se dobiju ako se vrijednosti od F_g za diodu i triodu uvrste u jedn. 15a. Aritmetička sredina kvadrata struje šuma u tom slučaju iznosi za diodu

$$\overline{i_s^2} = 3 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \frac{2 k T_k}{q I_{sr} R_1} = 0,644 \frac{2 k T_k}{q I_{sr} R_1},$$

a za triodu

$$\overline{i_s^2} = \frac{0,644}{\delta} \cdot \frac{2 k T_k S}{q I_{sr}}$$

U tim izrazima T_k znači temperaturu katode, R_1 unutarnji otpor diode, S strminu triode, a δ koeficijent koji pokazuje zavisnost potencijalnog minimuma u funkciji prednapona rešetke i iznosi obično 0,5...1.

U slučaju tetrodâ i pentodâ, gdje je zaštitna rešetka obično na pozitivnom potencijalu u odnosu prema katodi, šum zbog efekta sačme modificiran je podjelom struje između rešetke i anode. Ovdje se radi o *podijeljenom šumu* jer je tok struje podijeljen između dvije ili više elektroda, a podjela tih struja ponešto varira.

Ostali izvori šuma u elektronkama. Osim šuma uslijed efekta sačme i podijeljenog šuma javljaju se i šumovi navedeni u nastavku.

Šum uslijed sekundarne emisije nastaje od neželjenih sekundarnih elektrona i ovisi o faktoru sekundarne emisije i o broju elektroda u cijevi na kojima dolazi do sekundarne emisije.

Šum zbog neravnomjerne emisije katode ili Schottkyjev efekt, (zvan također efekt treperenja, engl. flicker effect, njem. Funkel-effekt) ispoljava se samo na niskim frekvencijama (do 500...1000 kHz), a nekoliko je puta veći od šuma uzrokovanog efektom sačme. On dolazi do izražaja u pojačalima istosmjerne struje i u pojačalima zvučnih i podzvučnih frekvencija. Amplituda ovog šuma proporcionalna je recipročnoj vrijednosti frekvencije. Šum zbog neravnomjerne emisije katode sličan je šumu koji se javlja u poluvodičima i na kontaktnim mjestima. Naziva se još i *šum 1/f* ili *ekscs-šum*.

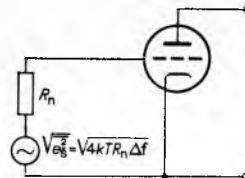
Šum proizveden od elektrona reflektiranih s anode pridonosi povećanju efekta sačme, što je ustanovljeno eksperimentalno i što objašnjava pojavu da je izmjerena vrijednost šuma sačme veća od izračunane vrijednosti.

Šum od pozitivnih iona nastaje uslijed ionizacije zaostalih molekula plina. Elektroni stvoreni pri ionizaciji dodaju se anodnoj struji, a pozitivni ioni lete prema negativnoj rešeci; tamo dolazi do rekombinacije i u vezi s time pojavljuje se rešetkina struja koja stvara napon na impedanciji rešetkinog kruga, što djeluje kao izvor šuma.

Šum od primarne emisije nastaje od elektrona koji izlijeću iz upravljačke rešetke pobudeni od čestica koje dolaze s katode.

Inducirani šum dolazi do izražaja u sklopovima vrlo visokih frekvencija. Izazivaju ga elektroni koji proljeću pored rešetke, jer je njihov broj podložan statističkim zakonima. Na taj način inducirani naponi očituju se kao šum.

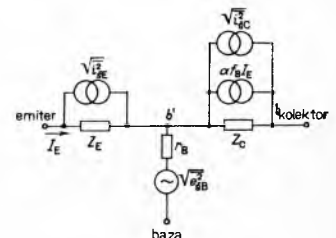
Ekvivalentni otpor šuma u elektronkama. Da se pojednostavniti izračunavanje šuma, uobičajeno je sve vrste bijelog šuma izražavati bilo ekvivalentnim otporom šuma, bilo ekvivalentnom temperaturom šuma. Može se zamisliti da je elektronka sama po sebi bešumna i da sve njezine šumove izaziva neki izvor napona šuma u_g na rešeci. Kako svaki otpornik predstavlja izvor bijelog šuma, može se zamisliti da je izvor šuma u_g otpornik koji ima otpor R_g i daje na određenoj temperaturi isti napon šuma u_g kao elektronka (sl. 11). To je ekvivalentni otpor šuma elektronke. Tipične vrijednosti ekvivalentnog otpora šuma kreću se za triode između 200 i 1200 Ω , a za pentode između 600 i 3800 Ω .



Sl. 11. Ekvivalentni krug za izvor šuma u vakuumskim elektronkama. R_n ekvivalentni otpor šuma na ulazu u elektronku

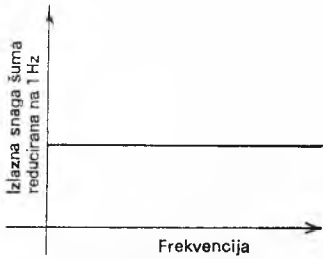
Šum tranzistora

Tranzistori unose vlastite šumove u sklopove u kojima se primjenjuju. Ti su šumovi posljedica građe samog tranzistora. Tranzistor je poluvodički element koji se sastoji od tri elektrode: emitera, baze i kolektora. Manjinski nosioci injektirani preko emitterske barijere prolaze kroz bazu i skupljaju se u kolektoru. Jedan se njihov dio re-kombinira u bazi i stvara struju baze. Drugi dio, koji stiže do kolektora, stvara struju kolektora. Brzina difuzije i rekombinacija nisu konstantne, nego su podložne statističkim zakonima. Zbog toga su obje ove struje izvori šuma, kako je to pokazano na nadomjesnoj shemi tranzistora (sl. 12).



Sl. 12. Nadomjesna shema tranzistora s izvorima šuma

U tranzistorima postoje dva tipa šuma: bijeli šum, koji ima ravnu frekvencijsku karakteristiku (sl. 13), i niskofrekventni šum treperenja ili šum $1/f$ (v. gore). Frekvencijska karakteristika šuma tranzistora dana je na sl. 14. U području niskih frekvencija postoji šum treperenja, a u srednjem i višem frekvencijskom opsegu postoji bijeli šum.



Sl. 13. Frekvencijski spektar snage bijelog šuma

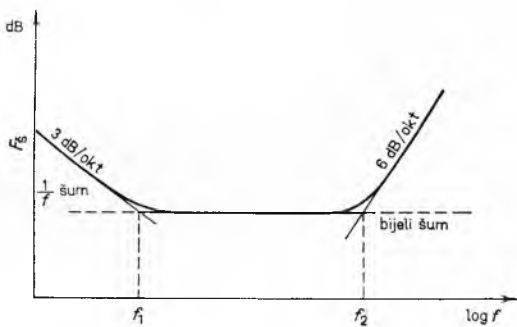
Šum $1/f$ pripisuje se efektu površine i nastaje iz dva neovisna izvora: površinski šum $1/f$ i odvodni šum $1/f$. Površinska komponenta šuma $1/f$ nastaje od parova elektron-šupljina

u tranzistoru koji mijenjaju serijski otpor spoja. Odvodna komponenta šuma $1/f$ dovodi se u vezu s odvodnim otporom spoja.

Bijeli se šum sastoji od termičkog šuma i šuma uslijed efekta sačme. Komponenta šuma uslijed efekta sačme dodaje se kao izvor šuma u emiter i kolektor i iznosi, slično kao u elektronkama (jedn. 10),

$$\overline{i_{SE}^2} = 2q I_E \Delta f,$$

gdje je I_E srednja struja emitera, a q naboj elektrona.



Sl. 14. Faktor šuma F_B tranzistora u ovisnosti o frekvenciji f

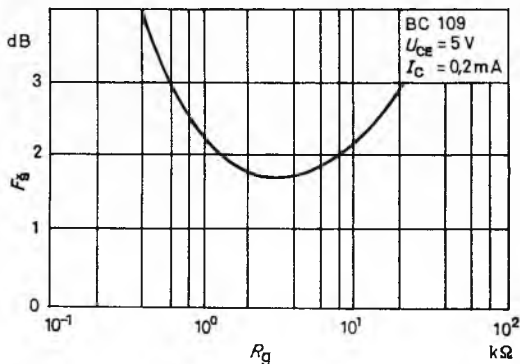
Komponenta šuma u krugu baze ovisi o materijalu baze i njezinom otporu r_B i određena je prema (7) jednadžbom

$$\overline{e_{SB}^2} = 4kT r_B \Delta f.$$

Struja šuma u kolektoru određena je jednadžbom

$$\overline{i_{SC}^2} = 2q \Delta f [I_B (\alpha_0 - |\alpha_{rB}|^2) + I_{C0}],$$

gdje je I_{C0} struja kolektor-baza s otvorenim emiterom, α_0 strujno pojačanje, a α_{rB} strujno pojačanje kratkog spoja baze za niske frekvencije. Do frekvencije f_1 koja je ~ 1 kHz za sve tranzistore, faktor šuma opada za približno 3 dB po oktavi. Frekvencija f_2

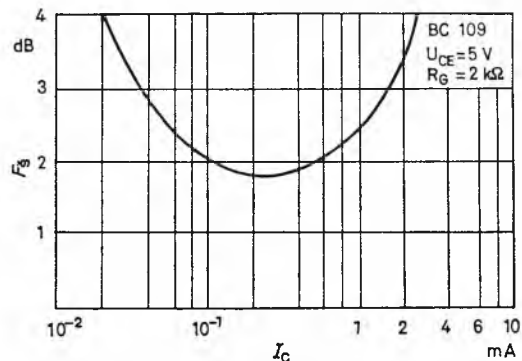


Sl. 15. Ovisnost faktora šuma F_B o struji kolektora za tranzistor tipa BC 109

može iznositi od nekoliko desetaka kiloherca do nekoliko megaherca; između f_1 i f_2 nivo je šuma najniži. Na frekvencijama višim od f_2 termički šum i efekt sačme ne mijenjaju se s frekvencijom, ali se, zbog smanjenja pojačanja i zbog vremena proleta

sporednih nosilaca u području baze, faktor šuma povećava za približno 6 dB po oktavi.

Na sl. 15 prikazani su ovisnost faktora šuma o struji kolektora za tranzistor BC 109, koji se upotrebljava u niskošumnim predstavnjivima pojačala. Vidi se da se faktor šuma F_B naglo povećava pri višim vrijednostima kolektorske struje I_C .



Sl. 16. Ovisnost faktora šuma F_B tranzistora tipa BC 109 o unutarnjem otporu R_G izvora ulaznog signala

Na sl. 16 prikazana je ovisnost faktora šuma F_B o veličini unutarnjeg otpora R_G izvora ulaznog signala koji je priključen na ulaz tranzistora BC 109.

Iz oba iznijeta primjera slijedi da je za postizanje što manjeg šuma u sklopu potrebno izabrati optimalne vrijednosti struje emitera i otpora izvora signala.

Šum u komunikacijskim sustavima

U svim prijenosnim sustavima u kojima se informacije prenose posredstvom električnog signala, bez obzira na to da li se radi o prijenosu fizičkim vodovima ili radio-kanalom, pojavljuju se smetnje bilo u vidu unutarnjih spontanijh električnih fluktuacija ili električnog šuma, bilo u vidu drugih signala koji izvana prodiru u promatrani kanal interferencijom iz drugih prijenosnih sustava. Takve smetnje imaju statistički karakter i superponiraju se korisnom signalu.

Neželjena interferencija s drugim prijenosom zove se i *pre-slušavanje*. Ono može biti razumljivo i nerazumljivo. Međutim, i ako je provedena zaštita od takve interferencije, šum ipak ostaje kao smetnja koja se, doduše, pod različitim uvjetima može smanjiti, ali rijetko sasvim eliminirati. Šum je, dakle, uvijek u većoj ili manjoj mjeri prisutan pri prijenosu svih vrsta informacija električnim putem.

U posebnim slučajevima (radar, satelitske komunikacije, rubna područja pokrivanja i sl.) može šum doseći red veličine korisnog signala, te je potreban poseban postupak da se korisni signal izdvoji ili da se ocijeni njegovo prisustvo. U osnovi se radi o termičkom šumu, koji je uzrokovan statističkim kretanjem elektrona u vodičima, kako je ranije bilo pokazano.

U prijenosnim sustavima koji su izgrađeni od fizičkih vodova, uslijed statističkih gibanja atoma i elektrona u vodičima i tijelima koja ih okružuju, dolazi do zračenja elektromagnetske energije. Dio te energije vodi se vodičima do mjesta prijema, gdje se uslijed toga pojavljuje napon šuma. Može se pokazati pomoću zakonâ termodinamike da je kvadrat srednje vrijednosti tog napona na mjestu prijema proporcionalan realnom dijelu ulazne impedancije u smjeru izvora šuma, tj. u smjeru prema vodu.

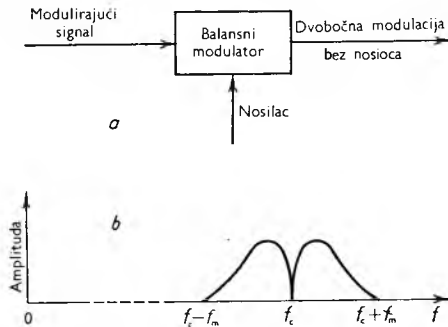
U radio-komunikacijskim sustavima postoje slični uvjeti. Tijela koja okružuju prijemnu antenu zrače energiju, a dio te energije prihvaća antena, već prema svojoj usmjerenosti, uslijed čega se napon šuma prema jednadžbi (9) pojavljuje na priključnicama antene. Isto takav napon šuma pojavljuje se i na stezaljkama prijenosnih sustava, kao posljedica izvora šuma u samom sustavu. Bilo je prikazano da je srednja vrijednost kvadrata napona šuma proporcionalna ekvivalentnoj širini frekvencijskog pojasa prema izrazu (7). Za prijenos nekog signala uz što manji šum mora širina frekvencijskog pojasa biti što manja.

Odnos signal/šum pri različitim vrstama modulacije

Informacija sa svojim niskofrekvencijskim spektrom nije prikladna za prijenos, već je treba transponirati na vrlo visoke frekvencije, što se provodi procesom modulacije. Na mjestu prijema korisna se informacija izdvaja iz primljenog signala demodulacijom. Komunikacijski sistem za prijenos informacija sastoji se od odašiljača s modulatorom, prijenosnog medija i prijemnika s demodulatorom. Ovisno o postupku modulacije mijenja se i odnos signal/šum, kako će biti prikazano u daljem izlaganju.

Amplitudna modulacija s dvobočnim prijenosom i potisnutim nosiocem (sl. 17). Pri ovoj vrsti modulacije iznosi napon signala $u_p(t)$ na strani prijemnika

$$u_p(t) = A_n \cos 2\pi f_m t \cdot \cos 2\pi f_n t + u_s(t).$$



Sl. 17. Dvobočna amplitudna modulacija s potisnutim nosiocem. a Blok-shema modulatora, b prikaz spektra moduliranog vala

Prvi je član dvobočni signal s amplitudom nosioca A_n , a drugi je član uskopojasni bijeli šum; f_m je modulatorska frekvencija, a f_n frekvencija nosioca. Šum nastaje bilo za vrijeme prijenosa bilo u ulaznom dijelu prijemnika. Aritmetička sredina kvadrata signala na jediničnom otporu izražena je brojčanom jednadžbom

$$\overline{u_p^2(t)} = \frac{A_n^2}{4} + P_s$$

(u_p , A_n i P_s su numeričke vrijednosti u koherentnim jedinicama). Odgovarajući odnos S/Š prije detekcije na ulazu prijemnika dobije se iz aritmetičke sredine kvadrata snage signala definirane jednadžbom (6), te izlazi da za bijeli šum pojasa $2f_m$, spektralne gustoće $n_0/2$ iznosi

$$\left(\frac{S}{S_{ul}}\right)_{dvobočno} = \frac{A_n^2}{4 P_s}$$

Koherentnom detekcijom dobiva se modulacioni val, a poništava se komponenta šuma koja nije u fazi.

Nakon koherentne detekcije prosječna vrijednost kvadrata izlaznog signala jednaka je

$$\overline{u_{iz}^2(t)} = \frac{A_n^2}{2} + P_s,$$

a odnos S/Š nakon detekcije

$$\left(\frac{S}{S}\right)_{iz(dvobočno)} = \frac{A_n^2}{2 P_s}, \quad (12)$$

ili pisano u odnosu prema ulazu:

$$\left(\frac{S}{S}\right)_{iz(dvobočno)} = 2 \left(\frac{S}{S}\right)_{ul(dvobočno)} \quad (13)$$

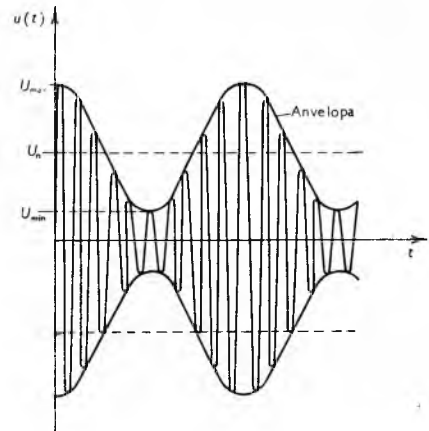
Koherentna detekcija osigurava, dakle, podvostručenje odnosa S/Š, tj. dobitak od 3 dB, u dvobočnoj demodulaciji. Taj se dobitak tumači ili poništavanjem jedne od komponenta šuma ili koherentnom adicijom napona bočnih pojasa dvobočnog signala, dok se bočni pojasi šuma kombiniraju nekoherentno. Iz jednadžbe (13) vidi se da je izlazni odnos $(S/S)_{iz}$ uvijek proporcionalan ulaznom odnosu $(S/S)_{ul}$.

Amplitudna modulacija s prijenosom obaju bočnih pojasa i nosioca. Njome se postiže da anvelopa moduliranog nosioca predstavlja vjernu reprodukciju modulacionog vala. (Ta se modulacija označava sa A3.) Anvelopa varira oko srednje vri-

jednosti U_T linearno ovisno o modulacionom valu (sl. 18). Modulirani signal na strani prijemnika dan je jednadžbom

$$u_{ul}(t) = A_n [1 + m_a \cos 2\pi f_m t] \cos 2\pi f_n t + u_s(t),$$

gdje je indeks modulacije $m_a = A_m/A_n$.



Sl. 18. Val nosilac koji je amplitudno moduliran sinusnim valom

Aritmetička sredina kvadrata napona ulaznog signala jednaka je

$$\overline{u_{ul}^2(t)} = \frac{A_n^2}{2} \left(1 + \frac{m_a^2}{2}\right) + P_s.$$

Kako je zanimljiva samo snaga bočnih pojasa, a ne nosioca $\frac{A_n^2}{2}$, odnosno S/Š prije detekcije iznosi

$$\left(\frac{S}{S}\right)_{ul(A3)} = \frac{m_a^2 A_n^2}{4 P_s}$$

Nakon detekcije dobije se odnos signal/šum

$$\left(\frac{S}{S}\right)_{iz(A3)} = \frac{m_a^2 A_n^2}{2 P_s} = 2 \left(\frac{S}{S}\right)_{ul(A3)} \quad (14)$$

Iz izražaj (12) i (14) vidljivo je da je pod dobrim uvjetima prijema amplitudno modulirani dvobočni sistem s nosiocem jednako dobar kao sistem s potisnutim nosiocem, pod uslovom da su snage u bočnim pojasi jednake. Za velike odnose nosilac/šum amplitudno modulirani sistem prilikom detekcije unosi isti dobitak od 3 dB kao i dvobočni prijenos s potisnutim nosiocem. To znači da je pod dobrim uvjetima prijema detektor anvelope jednako dobar kao i koherentni detektor.

Kad se uzme u obzir nosilac, i nakon izjednačenja ukupno prenijete snage, odnos signal/šum na izlazu razlikuje se najmanje za faktor 3, tj.

$$\left(\frac{S}{S}\right)_{dvobočni} \geq 3 \cdot \left(\frac{S}{S}\right)_{iz(A3)}$$

Znak jednakosti odnosi se na 100%tno amplitudnu modulaciju. Broj 3 se pojavljuje zbog svojstva amplitudne modulacije s nosiocem da u najboljem slučaju (100%tne amplitudne modulacije) samo jedna trećina ukupne snage pripada bočnim pojasi, a ostatak je snaga nosioca. Prema tome je dvobočni prijenos s potisnutim nosiocem za trostruko, tj. ~ 5 dB, bolji od dvobočnog prijenosa s nosiocem.

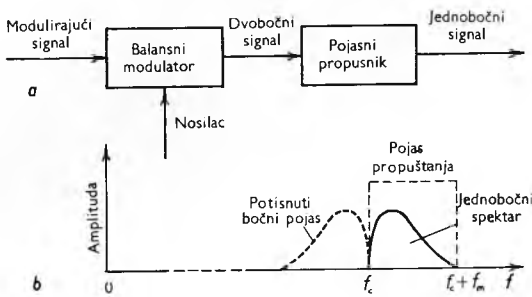
Amplitudna modulacija s jednobočnim prijenosom. Proces jednobočne detekcije izravna je transpozicija signala visoke frekvencije na frekvenciju osnovnog pojasa (sl. 19). Tako su sve komponente signala i šuma prenijete nepromijenjene na niske frekvencije. Stoga odnos S/Š ostaje nakon jednobočne detekcije nepromijenjen,

$$\left(\frac{S}{S}\right)_{iz(jednobočno)} = \left(\frac{S}{S}\right)_{ul(jednobočno)}$$

Vidljivo je da jednobočna detekcija ne unosi dobitak od 3 dB kao dvobočna s valom nosiocem ili bez njega. Međutim, kako

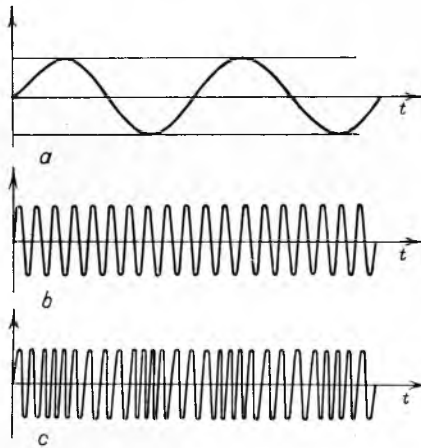
je pri jednobočnom prijenosu širina pojasa šuma koju propušta filtar ispred jednobočnog detektora jednaka polovici snage šuma pri dvobočnom prijenosu s valom nosiocem ili bez njega, izlazni su odnosi signal/šum ipak u te vrste detekcije jednaki:

$$\left(\frac{S}{\Sigma}\right)_{\text{iz (jednobočno)}} = \left(\frac{S}{\Sigma}\right)_{\text{iz (dvobočno ili AS)}}$$



Sl. 19. Amplitudna modulacija s jednobočnim prijenosom. a Blok-shema modulacijskog sklopa, b frekvencijski spektar jednobočnog signala

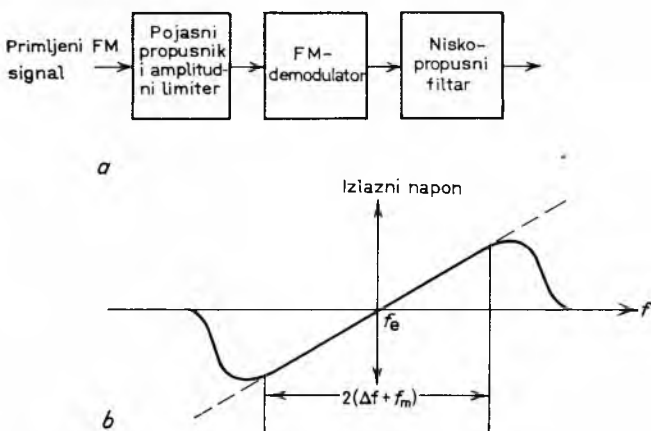
Frekvencijska modulacija je postupak kojim modulirajući val mijenja frekvenciju nosioca kako to pokazuje sl. 20. Na sl.



Sl. 20. Shematski prikaz frekvencijske modulacije. a Modulacijski val, b nedomulirani val nosilac, c frekvencijski moduliran val nosilac

21 a prikazana je blok-shema dijela prijemnika frekvencijski moduliranih (FM) signala. Za demodulaciju služi ovdje diskriminator (v. poglavlje Prijemnici u ovom članku, str. 601). Izlazni napon tog sklopa slijedi varijacije trenutne frekvencije vala nosioca

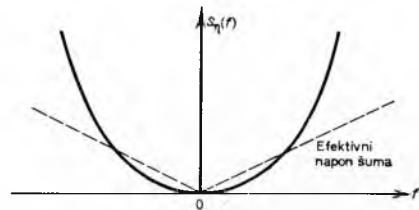
$$u_{\text{ul}}(t) = A_n \cos [2 \pi f_n t + \beta g_n(t) + e_s(t)],$$



Sl. 21. Demodulacija frekvencijski moduliranog signala. a Blok-shema demodulatorskog dijela prijemnika, b karakteristika demodulatora

gdje je indeks modulacije $\beta = \frac{\Delta f}{f_m}$ (Δf je maksimalna frekvencijska devijacija), a $g_n(t) = \frac{g(t)}{|g(t)_{\text{max}}|}$ je vremenski promjenljiva fazna funkcija koja sadrži željenu informaciju, normalizirana na jediničnu vršnu amplitudu.

Šum koji se na putu između odašiljača i prijemnika unosi u frekvencijski moduliran signal mijenja pretežno njegove amplitude, ali mijenja i fazu. Budući da se prije detekcije u limiteru vrši ograničavanje amplituda, na taj se način amplitudni dio šuma eliminira. Međutim, šum koji nastaje uslijed promjena faze time se ne izbacuje, pa se FM detektoru osim frekvencijski moduliranog signala dovodi i bijeli šum kojemu je gustoća snage duž cijelog spektra jednolika. Zbog prirode takve detekcije, nakon nje se dobiva demodulirani signal sa šumom koji linearno raste s porastom frekvencije (trokutasti šum). Prema tome gustoća



Sl. 22. Spektar gustoće snage bijelog šuma na izlazu iz demodulatora frekvencijski moduliranog signala. S gustoća snage

snage šuma u spektru nakon detekcije raste proporcionalno kvadratu frekvencije i njezina je karakteristika parabolnog oblika (sl. 22). Ta gustoća snage šuma u spektru iznosi

$$S_\mu(f) = \frac{f^2 P_s}{B A_n^2}, \quad |f| \leq \frac{B}{2}, \quad (15)$$

gdje je $B = 2(\Delta f + f_m)$ širina pojasa frekvencijske modulacije (sl. 21 b). Važno je napomenuti da se u ovom slučaju efektivni napon šuma mijenja linearno s frekvencijom.

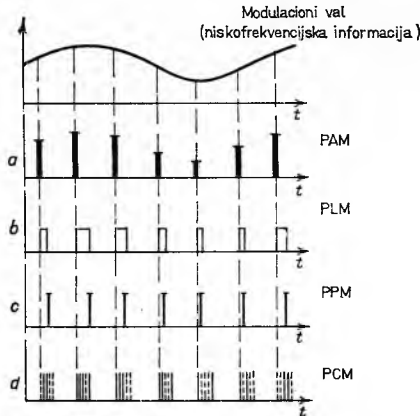
Gustoća snage izlaznog šuma u spektru raspodijeljena je preko širokog pojasa frekvencija $|f| \leq \Delta f + f_m$ s posebno naglašenim visokim frekvencijama. Ovaj rezultat je naročito važan, jer naknadnim filtriranjem niskopropusnim filtrom, radi dobivanja modulacije koja je ograničena na područje frekvencija $(-f_m, f_m)$, ujedno se uklanja veliki dio šuma koji leži izvan tog područja. Poboljšanje omjera S/Š za frekvencijsku modulaciju može se postići uz veliki odnos snage nosioca prema snazi šuma, uz prisustvo bijelog šuma i postojanje pravokutnog međufrekvencijskog pojasnog propusta. Nakon detekcije se dobije:

$$\left(\frac{S}{\Sigma}\right)_{\text{iz(FM)}} = \frac{3 B (\Delta f)^2}{2 f_m^3} \cdot \frac{A_n^2}{3 P_s} = 3 \beta^2 (\beta + 1) \frac{A_n^2}{2 P_s}.$$

Prema tome, detekcija u širokopojasnim frekvencijski moduliranim sistemima daje dobitak od $3 \beta^2 (\beta + 1)$, ili približno $3 \beta^3$, za sisteme s vrlo širokim pojasom, tj. uz velike indekse modulacije.

Iz izraza (15) vidljivo je da gustoća snage šuma u spektru raste s kvadratom frekvencije. Pored toga, poznato je da amplitude komponenata modulacijskog signala opadaju s porastom frekvencije. Ako se sve ove činjenice skupe, izlazi da su nakon detekcije frekvencijski moduliranog signala komponente signala viših frekvencija izgubljene u jakom izlaznom šumu, što daje vrlo mali odnos S/Š. Da bi se to izbjeglo, u frekvencijski moduliranim sistemima primjenjuje se metoda tzv. *predakcentuacije* i *deakcentuacije*. Ta se metoda sastoji u tome da se modulacijski val prije modulacije propusti kroz filtar za predakcentuaciju, kojim se postiže izdizanje komponenata signala na višim frekvencijama. Na taj se način izjednačuje raspodjela energije u spektru signala. U prijemniku, odmah poslije demodulacije, propuštaju se dobiveni signal i detektirani šum kroz filtar za deakcentuaciju, koji predakcentuaciji suprotnim djelovanjem slabi komponente viših frekvencija točno onako kao što su predakcentuacijom bile pojačane. Tako se smanjuje snaga detektiranog šuma na višim frekvencijama, a da se modulacijski signal ne promijeni. Time se postiže povećani odnos S/Š.

Impulsno-amplitudna modulacija primjenjuje postupak pri kojem je val nosilac, koji biva moduliran, impulsnog oblika, a informacija je kontinuirana funkcija. Tako se uzorci kontinuirane funkcije prenose u ritmu frekvencije impulsa, prema spektru prikazanom na sl. 23 a. Nastaju impulsi uzoraka trajanja T_u s jednolikim razmakom među njima. Za prijenos su svakako povoljniji širi impulsi. Odabire se takva širina impulsa da se pri multipleksnom prijenosu u prijemniku mogu još lako odvojiti dva susjedna impulsa, što je važno da bi se spriječilo preslušavanje.



Sl. 23. Shematski prikaz različitih vrsta modulacije. a PAM impulsno amplitudna modulacija, b PLM impulsno širinska modulacija, c PPM impulsno fazna modulacija, d PCM impulsno kodna modulacija

Širina impulsa ovisi o broju kanalâ koji se žele jednim multipleksnim sistemom prenijeti. Da bi se odredio odnos S/\bar{S} , pretpostavlja se da je širina frekvencijskog opsega prijenosa od $-f_m$ do f_m i da je P_s snaga po jedinici širine frekvencijskog opsega na ulazu u prijemnik. Svakom uzorku signala pridružen je šum srednje snage šuma $2f_m P_s$. Da bi se izračunao odnos S/\bar{S} pri punom opterećenju, pretpostavlja se da ispitni generator na ulazu u prijemnik proizvodi impulse kojima amplituda varira između $+A$ i $-A$. Aritmetička sredina kvadrata amplitude impulsa za signal sinusoidnog oblika je $A^2/2$, pa je

$$\frac{S}{\bar{S}} = \frac{A^2}{4f_m P_s}$$

Impulsno-širinska modulacija i impulsno-fazna modulacija. Pri *impulsno-širinskoj modulaciji* mijenja se trajanje (širina) impulsa u ritmu primarnog modulacijskog signala, tako da se pri promjeni primarnog signala pomiču oba boka impulsa (v. sl. 23 b). Pri *impulsno-faznoj modulaciji* pomiču se impulsi sa svog osnovnog položaja za iznos faznog pomaka (v. sl. 23 c). Dobitak odnosa S/\bar{S} je manji nego pri frekvencijskoj modulaciji, pa se stoga impulsna modulacija vrlo rijetko primjenjuje za direktan prijenos.

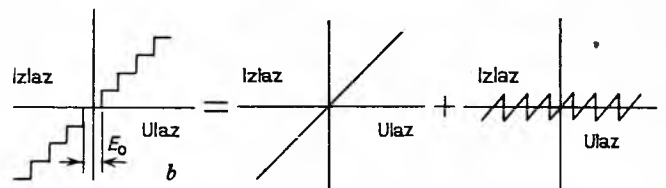
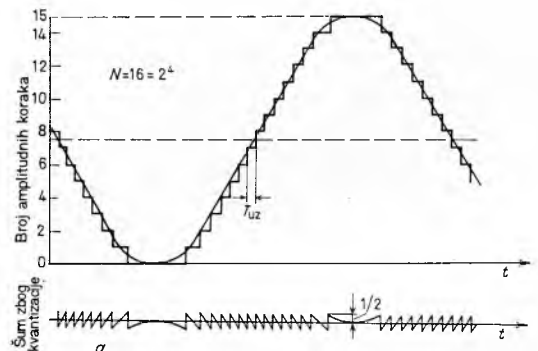
Impulsno-kodna modulacija. Pri toj se modulaciji od niskofrekventnog modulacijskog signala, koji je na sl. 24 a jednostavnosti radi prikazan kao sinusni val, u uzastopnim vremenskim intervalima uzimaju uzorci, kojima se amplitude kodiraju po nekom, npr. binarnom, kodu i u obliku niza impulsa prenose. U prijemniku se s pomoću impulsa može reproducirati val bilo kakva oblika. Postupak impulsno-kodne modulacije svodi se, dakle, na uzimanje uzoraka (kvantiziranje) i kodiranje.

Kvantiziranje provodi se tako da se razmak od minimalne do maksimalne amplitude modulacijskog signala podijeli na $N-1$ intervalâ (amplitudnih koraka), a trajanje signala u vremenske intervale određenog trajanja (trajanje uzorka T_{uz}). Uzastopnim intervalima od minimalne do maksimalne amplitude signala određuju se amplitude koje tvore niz prirodnih brojeva od 1 do $N-1$. Različitim naponima signalâ koji leže unutar istog intervala trajanja uzorka pridružuje se time ista amplituda uzorka, pa se umjesto kontinuirane karakteristike signala dobiva stepeničasta. Usljed toga nastaje iskrivljenje signala koje se ispoljava u tzv. *šumu kvantiziranja*. To je iskrivljenje, razumljivo, to manje što je veći broj uzetih uzoraka u jedinici vremena, tj. što je trajanje

uzorka T_{uz} kraće. Budući da se osim brojeva amplitudnih koraka prenosi od predajnika prijemniku u kodiranom obliku i nula, koja odgovara najvećoj negativnoj amplitudi signala, broj je amplitudnih koraka za jedinicu manji od broja kodiranih brojeva N prenesenih u intervalu između minimalne i maksimalne amplitude signala. Broj N bira se prema vrsti prijenosa. Za kvalitetni prijenos govora uzima se $N = 64$, a za prijenos glazbe $N = 128$.

Kodiranje. Kvantiziranjem dobivaju se amplitude uzoraka kao broj amplitudnih koraka izražen decimalnim brojem. Da bi se ti podaci mogli prenijeti impulsima, treba ih kodirati. Obično se za to upotrebljava binarni kod s brojkama 0 i 1, koje odgovaraju odsutnosti impulsa (pauzi), odn. njegovoj prisutnosti (v. *Digitalna računala*, TE 3, str. 322 i *Elektronika, sklopovi*, str. 560); a ponekad i trinarni kod s impulsima $-1, 0, +1$. Općenito, ako je m broj impulsa potreban da se prenese jedan podatak (broj impulsa u jednom trajanju uzorka), a n broj vrsta impulsa ($n = 2$ u binarnom, $n = 3$ u trinarnom kodu), najveći broj podataka koji se može prenijeti u intervalu između minimalne i maksimalne amplitude signala iznosi $M = n^m$. [Za kvalitetni prijenos govora potrebno je, prema tome, prenijeti 6 impulsa po uzorku ($M = N = 2^6$), za prijenos glazbe 7 impulsa po uzorku ($M = N = 2^7$).] Grupe od toliko impulsa (odn. pauza) prenose se neprekidno u razmacima vremena jednakim trajanju uzorka T_{uz} . Jedna je od prednosti ove vrste impulsne modulacije pred drugima što je za prijem jedino važno da li određeni prenijeti impuls postoji ili ne postoji, a indiferentno je kakva mu je amplituda, duljina ili položaj. Te su karakteristike impulsa stoga po pravilu konstantne.

Šum kvantiziranja. Kako je naprijed rečeno, tako se nazivaju smetnje koje nastaju uslijed razlike između kvantiziranog (stepenastog) i stvarnog (kontinuiranog) oblika signala. Pri dovoljno kratkom trajanju uzorka, te smetnje imaju približno oblik pilastog napona (sl. 24 b).



Sl. 24. Impulsno-kodna modulacija. a Kvantiziranje i šum kvantiziranja, b analogno-digitalna konverzija

Efektivna vrijednost amplitude signala iznosi $N/(2\sqrt{2})$, a efektivna vrijednost pilastog napona (vršna mu vrijednost iznosi polovinu amplitudnog koraka) iznosi $1/(2\sqrt{3})$ amplitudnog koraka. Prema tome je odnos signal/šum u ovom slučaju

$$\frac{S}{\bar{S}} = \frac{u_s^2}{u_b^2} = \frac{N^2}{8} : \frac{3}{12} = \frac{3}{2} N^2 = \frac{3}{2} n^{2m}$$

Širina frekvencijskog pojasa f_a potrebna za prijenos pri impulsno-kodnoj modulaciji proporcionalna je broju impulsa u sekundi. Za prijenos signala koji ima širinu frekvencijskog pojasa Δf potrebno je odaslati prema Nyquistu bar $2\Delta f$ impulsa u sekundi. Budući da je za prijenos kodiranog podatka o broju amplitudnih koraka za svaki uzorak potrebno m impulsa, širina

frekvencijskog pojasa za prijenos niskofrekvencijskog signala širine Δf bit će

$$B = a \cdot m \cdot 2 \Delta f,$$

gdje je a koeficijent proporcionalnosti koji ima vrijednost između 0,5 i 1. Ako se taj izraz kombinira s prethodnim, dobije se da je

$$\frac{S}{\bar{S}} = \frac{3}{2} n^{B/a\Delta f}$$

Iz toga slijedi da se pri impulsno-kodnoj modulaciji odnos S/Š poboljšava eksponencijalno sa širinom frekvencijskog opsega koji se prenosi.

Demodulacija u prisustvu šuma središnji je problem komunikacija i ovisi znatno o odnosu signala prema šumu. Promjene u odnosu signala prema šumu uzrokovane linearnim sustavima mogu se određivati faktorom šuma, ali ako se radi o nelinearnom sustavu, potreban je drugačiji pristup. Među najvažnije nelinearne sustave u procesu komunikacija ubrajaju se uređaji za demodulaciju.

Pri demodulaciji analognih signala pojedine vrste detektorâ različito utječu na odnos S/Š. Po pravilu bit će za isti odnos S/Š na ulazu odnos S/Š na izlazu iz detektora najpovoljniji u slučaju koherentnog detektora (faznog diskriminatora), nešto slabiji u slučaju linearnog detektora, a najslabiji u slučaju kvadratnog detektora. To će vrijediti u dovoljno velikom rasponu ulaznog odnosa S/Š, s time da će koherentni detektor imati povećanu prednost za ulazne odnose S/Š koji su manji od jedan, a linearni će se detektor približiti po kvalitetu koherentnom detektoru za veće ulazne odnose S/Š (za $S/\bar{S} > 15$ dB).

Ako je električni signal *impulsnog oblika* (takvi se signali primjenjuju u telegrafiji i u radarima) način detekcije je malo drugačiji. Kad je impulsu pridodan šum, impuls se detektira decizionim sklopom čija je karakteristika prag otkrivanja. Ovisno o položaju impulsa sa šumom, detektor, naime, otkriva nulu (0) ili jedinicu (1) u digitalnom smislu. U sinhronoj telegrafiji sklop daje odluku o prisustvu impulsa u sredini telegrafskog elementa, a u radaru ovisno o prednaponu katodne cijevi koja služi kao indikator. Međutim, decizionski sklop može učiniti i pogrešku zbog šuma i njegove amplitude koja prelazi prag otkrivanja. U radaru to može dovesti do lažne uzbuje ili do ispadanja cilja, ovisno o polaritetu momentalnog intenziteta šuma.

Mjerilo kvaliteta za prijenosni sustav je vjerojatnost pogreške, a ova stoji u čvrstom odnosu s vrijednošću S/Š. Taj je odnos eksponencijalan i već mali porast u odnosu signala prema šumu znatno smanjuje vjerojatnost pogreške. Konkretni odnosi ovisit će i o vrsti impulsa. Oni će biti npr. različiti za pravokutni impuls i za impuls oblika pola sinusoide, jer ovise i o frekvencijskoj širini kanala.

Šum u televiziji

Prema frekvencijskom području u kojem se u televiziji šum pojavljuje, on se dijeli na dvije grupe: na šum koji se javlja ispod horizontalne frekvencije i šum iznad te frekvencije.

Šum ispod horizontalne frekvencije sastoji se od više različitih šumova koji se ispoljavaju na vrlo niskim frekvencijama. To su lutajući šum, šum od napona brujanja, periodski šum i impulsni šum.

Lutajući šum pojavljuje se kao posljedica lutajućih struja na prijenosnim vodovima. Njihova se amplituda može procijeniti vizuelno na ispitnoj slici (test-slici) koja se emitira na početku televizijskog programa, a očituje se u laganom savijanju slike, što je posljedica djelovanja na otklonski sustav.

Šum od napona brujanja može ili biti ili ne biti u sinhronizmu s izmjeničnim naponom napajanja. Očituje se bilo u video-signalu bilo u otklonskom sustavu.

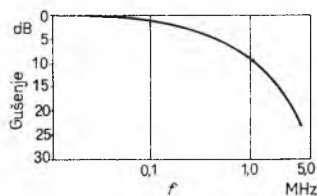
Periodski šum javlja se u širokom opsegu frekvencija, a izliva sinusoidne interferencije. On dolazi od mnogih izvora, a razlikuje se od šuma brujanja. Može prouzročiti znatnu degradaciju slike.

Impulsni šum obuhvaća različite oblike impulsa koji dolaze od takvih izvora kao što su iskrenje, interferencija uslijed paljenja, itd. Impulsni šum teško je mjeriti jer se on ne pojavljuje stalno. On katkada prekida linearnost nivoa istosmjernog napona, što se očituje kao praznina u slici.

Šum iznad horizontalne frekvencije sastoji se od kontinuiranog šuma koji dolazi od aktivnih i pasivnih elemenata u samom prijemniku. On ima statističku prirodu i njegove amplitude variraju od nule do beskonačnosti; to je bijeli šum, o kojemu je već ranije bilo govora.

Ovamo ide i *trokutasti šum*, koji nastaje kao posljedica frekvencijske modulacije i sve je veći na višim frekvencijama. Za poboljšanje odnosa S/Š ovdje se iskorištava činjenica da je energija govora i glazbe na višim frekvencijama manja nego na nižim, pa se poboljšanje navedenog odnosa postiže predakcentuacijom pri odašiljanju i deakcentuacijom u prijemniku (v. str. 633). Deakcentuacijom se vraća amplituda raspodjele signala u izvorno stanje, čime je utjecaj trokutastog šuma smanjen. Trokutasti šum ima vizuelnu strukturu s finijim zrcncima nego bijeli šum, zbog većeg udjela visokofrekventnih komponenata. Pronađeno je statistički da je nivo trokutastog šuma za 6 dB viši od nivoa bijelog šuma, a jednako negativno djeluju na kvalitet slike.

Kako se oba ova šuma, reproducirana na ekranu reproduktorske cijevi, prenose zajedno s korisnim signalom u svijesti normalnog vida, ne postoji frekvencijski odziv. Zbog frekvencijske ovisnosti osjetljivosti oka, treba u lanac uključiti tzv. *ponderabilni filter* što su ga predložili Müller i Demus — on ima sličnu frekvencijsku karakteristiku kao čovječje oko — a izrađen je prema rezultatima psihofizičkih mjerenja (sl. 25). Rezultat se odnosi na sistem televizije sa 625 linija.



Sl. 25. Frekvencijska karakteristika ponderabilnog filtra za šum

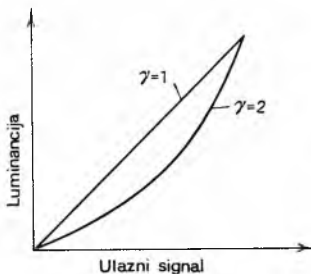
Šum zbog analizirajućeg snopa ovisan je o luminancijskom nivou; pri pozitivnom signalu najveći je na srednjem luminancijskom nivou, a najmanji na maksimalnom. Određeni su korekcijski faktori: *korekcija otvora* i tzv. *gama-korekcija*.

Korekcija otvora je promjena frekvencijske karakteristike sistema u smislu izdizanja viših frekvencija. Oslabljenje razmaka prema šumu izazvano korekturom otvora veće je kod vidikona nego kod superortikona (v. poglavlje o televiziji u ovom članku). Vidikon već u izvoru signala daje jače izražene više frekvencije u šumu.

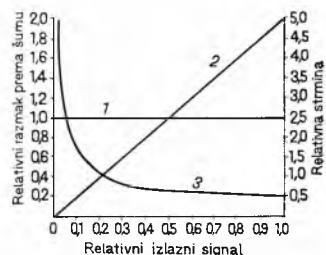
Gama-korekcija. Amplitudna prijenosna karakteristika luminancije reproducirane slike u odnosu prema luminanciji snimane slike nije linearna. Nelinearnost unose, s jedne strane, analizatorske cijevi za snimanje, a s druge strane kineskopi televizijskog prijelnika. Zbog odstupanja gradacije luminancije reproducirane slike B_{rep} od gradacije luminancije snimane slike B_{sn} , reproducirana je slika suviše kontrastna. Stupanj navedene nelinearnosti izražava se eksponentom γ (gama) u izrazu

$$B_{rep} = k B_{sn}^\gamma,$$

koji vrijedi za područje u kojemu je γ konstantan. U akromatskoj televiziji, npr., kineskopi imaju $\gamma = 2 \dots 2,5$ (sl. 26). Radi



Sl. 26. Utjecaj eksponenta γ na izobličjenje pri televizijskom prijenosu



Sl. 27. Promjena razmaka prema šumu u ovisnosti o γ -regulaciji. 1 Pretpostavljeni jednaki šum na svim razinama ulaznog signala, 2 promjena strmine zbog γ -korekcije, 3 odnos S/Š za ulazni signal

eliminiranja te nelinearnosti video-signal se nakon snimanja vodi kroz posebno pojačalo s nelinearnom karakteristikom suprotnog

djelovanja, koje se zove *gama-korekcija*. Ako se tim pojačalom eksponent γ sistema smanji na jedinicu ili ispod toga, i šum će se, zbog promjene strmine, slabije prenositi na višim nivoima, pa će za više nivoe odnos S/Š biti bolji. U sl. 27 pravac 1 predstavlja pretpostavljeni jednaki šum na svim razinama ulaznog signala, pravac 2 promjenu strmine zbog gama-korekcije, a krivulja 3 odnos S/Š za izlazni signal.

Psihofizička ispitivanja za kromatsku televiziju pokazuju da je osjetljivost prema smetnjama pri promatranju kromatskog prijemnika veća nego pri promatranju akromatskog prijemnika, i to zbog samog sistema jednokanalnog prijenosa u sistemu NTSC. Povećanje osjetljivosti na području frekvencija između 3 i 5 MHz nastaje demodulacijom krominantnog nosioca i ono je toliko da osjetljivost na tom području postaje jednaka osjetljivosti na frekvenciji 1 MHz. Opaža se da je osjetljivost prema šumu nešto veća kod crvene i zelene boje, a nešto manja kod modre. Budući da pojedine boje daju različitu osjetljivost prema šumu, postoji poteškoća pri određivanju karakteristike ponderabilnog filtra. Rješenje je ili u kompromisnom filtru ili u uzimanju najgoreg slučaja.

Šum preslušavanja javlja se kad se energija signala prenosi iz jednog video-kanala u drugi. Obično se ne klasificira kao šum, ali je potpuno identičan šumu. Preslušavanje može biti izobličeno i neizobličeno, već prema tome kolika je prividna impedancija između kanala. Najnepovoljniji je slučaj kad se preslušavanje javlja između dva nesinhronizirana signala, a utječe na monitor slike ili prijemnik.

U tabl. 1 i 2 dani su prema Darbyju i Toomsu dopustivi iznosi šuma i granične vrijednosti odnosa S/Š za visokokvalitetan kromatski prijenos.

Tablica 1
DOPUSTIVI IZNOSI ŠUMA
ZA VISOKOKVALITETAN
KROMATSKI PRIJENOS
(u decibelima za izravni put
prijenosa)

Vrsta šuma	Iznos šuma
Kontinuirani šum (odnos S/Š izmjeren) u luminantnom kanalu u krominantnom kanalu	64 58
Preslušavanje Interferentni signal na svim ulazima	50
Interferentni signal na jednom ulazu	55

Tablica 2
GRANIČNE VRIJEDNOSTI ODNOSA S/Š ZA ENGLJSKI
TELEVIZIJSKI SISTEM ($f_H = 10\ 125$ Hz, $f_v = 50$ Hz), u decibelima

Vrsta šuma	Male lokalne veze	Srednje lokalne veze	Glavne veze
Lutajući šum	26	26	26
Šum od napona brujanja	35	35	35
Kontinuirani šum (ponderiran)			
luminantno mjereno	68	62	60
krominantno mjereno	62	56	54
Periodski šum	55	55	55

Šum u radio-relejnim sustavima

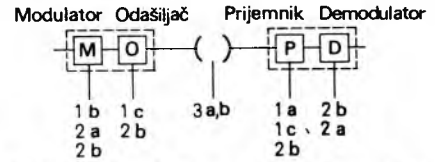
Šum u radio-relejnim sustavima ima odlučujuću ulogu u procjeni kvaliteta prijenosa. Stoga treba i u konstrukciji uređaja i u planiranju veze i razmaka među stanicama posvetiti naročitu pažnju uzroku nastajanja šuma i analizi utjecaja. Za prijenos u radio-relejnim sistemima primjenjuje se uglavnom frekvencijska modulacija, kojoj je prednost da je nivo modulacijskog signala konstantan i da se njome postiže najveće poboljšanje odnosa S/Š (v. str. 633).

Podjela šumova u radio-relejnim sustavima. Šum koji se pojavljuje u svakom radio-kanalu radio-relejnog sustava može se podijeliti u tri grupe kako je to pokazano na sl. 28. To su:

1. osnovni šum neovisan o opterećenju, koji se sastoji od 1 a) termičkog šuma prijemnika, 1 b) osnovnog šuma modulatora i 1 c) osnovnog šuma radio-uređaja;

2. šum ovisan o opterećenju, koji nastaje uslijed refleksije u valovodu i od višestruke refleksije drugih veza, a može se podijeliti na 2 a) intermodulacioni šum modulatora i 2 b) intermodulacioni šum u različitim dijelovima radio-uređaja;

3. šum od drugih radio-kanala u istom sustavu, koji može biti 3 a) šum uslijed interferencije u samom kanalu i 3 b) šum uslijed interferencije od susjednog kanala.



Sl. 28. Raspored šuma u radio-relejnim sustavima

Ako se pogodnom konstrukcijom radio-relejnog sustava ne može postići da šum od drugih radio-kanala u istom sistemu bude zanemarljivo malen (npr. ≤ 2 pW), sve se tri navedene komponente šuma moraju uzeti u račun prilikom proračuna radio-relejne veze. Npr., pri prijenosu televizije šum ovisan o opterećenju utječe na kvalitet prijenosa slike i tona, i to djelovanjem jednog kanala na drugi u istom osnovnom frekvencijskom opsegu.

Odnos S/Š u radio-kanalu. Snaga signala u definiciji odnosa signala prema šumu u radio-kanalu (izraz 6) nije u svim slučajevima definirana jednako, pa je stoga za svaku pojedinu vrstu signala određen referentni signal prema preporukama CCITT.

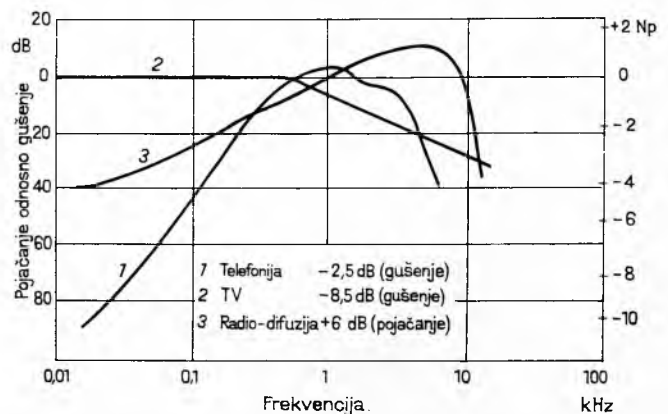
Referentni nivo za prijenos govora je apsolutna snaga od 1 mW na nultom relativnom nivou na odašiljačkom kraju prijenosnog sustava, prouzročena sinusnim valom frekvencije 800 Hz i efektivnim naponom od 0,755 V na otporu od 600 Ω . To je snaga normal-generatora i označava se pri izražavanju nivoa snage u decibelima kao «0». Dakle, izraz x dB m 0 znači nivo snage od x dB ispod 1 mW na točki nula relativnog nivoa, tj. x dB ispod normalnog ispitnog tona u kanalu na bilo kojoj točki sistema.

Referentni nivo za prijenos slike u televiziji je napon od vrha do vrha (od vršnog negativnog do vršnog pozitivnog napona) u iznosu od 0,7 V na otporu od 75 Ω . Na istoj točki sa signalom, za sinhronizaciju napon je od 1 V od vrha do vrha.

Referentni nivo za prijenos tona. Primarni referentni nivo je nominalni napon od 2,2 V. Referentni nivo snage za nulti relativni nivo (mjereno na priključnicama između radio-difuzijskog studija i prijenosnog sustava) određuje se iz toga. To je snaga od 8 mW, koja odgovara efektivnom sinusnom naponu od 2,2 V, frekvencije 800 Hz na otporu od 600 Ω .

Obično je referentni nivo snage na nultom relativnom nivou 9 dB m 0.

Ponderirana snaga šuma. Snaga šuma mjerena iza ponderabilnog filtra (v. str. 635) koji ima ista subjektivno-analitička svojstva kao uho, zapravo je mjera kvaliteta primljenog signala. Na sl. 29 dan je prema preporukama CCITT prikaz gušenja ili



Sl. 29. Ponderirane krivulje šuma prema preporukama CCITT za telefoniju (1), akromatsku televiziju (2) i radio-difuziju (3)

smanjenja efekta šuma, odnosno pojačanja ili povećanja efekta šuma, nakon ponderiranja za bijeli šum u radio-kanalu. Preporuke važe za fazno modulirani signal. Uvjeti za čistu faznu modulaciju postoje jedino pri višem položaju osnovnog opsega u frekvencijski moduliranim sistemima s predakcentuacijom.

Faktor šuma prijemnika. Ukupni šum na ulazu prijemnika sastoji se od šuma dovedenog kabelom iz antene, koji stvara ekvivalentni otpor zračenja R_a prijemne antene, i vlastitog šuma prijemnika, koji nastaje uslijed termičkih efekata u ulaznom krugu.

Termički šum koji se dovodi kabelom iz antene iznosi prema jedn. (1) i (9)

$$\overline{e_s^2} = 4 k T \Delta f R_a,$$

gdje je R_a otpor zračenja antene, a Δf ekvivalentna širina frekvencijskog opsega. Maksimalna je snaga šuma koju antena daje prijemniku pri pravilnom prilagođenju, prema jedn. (3) i (4),

$$\frac{\overline{e_s^2}}{4 R_a} = k T \Delta f.$$

Ako se ta snaga uzme kao referentna vrijednost snage šuma, ukupna je snaga šuma na ulazu u prijemnik

$$P_s = F_s k T \Delta f, \quad (16)$$

gdje je F_s faktor šuma. Dakle, faktor šuma prijemnika je veličina koja kaže koliko je puta ukupna snaga šuma na ulazu prijemnika veća od one koja se dovodi antenom. Ukupna snaga šuma je

$$P_{s_{uk}} = P_{s_{pr}} + k T \Delta f,$$

gdje $P_{s_{pr}}$ znači šum koji se stvara u prijemniku. Faktor šuma prijemnika iznosi, dakle,

$$F_s = \frac{P_{s_{pr}} + k T \Delta f}{k T \Delta f},$$

a šum prijemnika

$$P_{s_{pr}} = k T \Delta f (F_s - 1).$$

Kako je omjer signala prema šumu definiran kao

$$\frac{S}{\bar{S}} = \frac{P_s}{P_{s_{uk}}},$$

proizlazi da potrebna korisna snaga signala P_s mora iznositi

$$P_s = P_{s_{uk}} \cdot \frac{S}{\bar{S}} = F_s k T \Delta f \cdot \frac{S}{\bar{S}}.$$

Iznos faktora šuma ovisi o frekvencijskom području za koji je građen prijemnik, kako to pokazuje tabl. 3.

Karakteristična vrijednost sustava. Odnos S/\bar{S} na izlazu iz predajnika s kojim treba računati pri planiranju radio-relejne veze ne ovisi samo o duljini trase nego i o karakteristikama predajnika i prijemnika, a te ovisе isključivo o konstruktivnom rješenju sustava. Svi se ti utjecaji zajedno izražavaju karakterističnom vrijednošću S sustava koja iznosi

$$S = \frac{P_{s_{iz}}}{P_{s_{ul}}} \cdot K,$$

gdje je $P_{s_{iz}}$ snaga signala na izlazu iz predajnika, $P_{s_{ul}}$ snaga šuma na ulazu u prijemnik, K faktor poboljšanja S/\bar{S} koji iznosi za slučaj prijenosa multipleksnog telefonskog signala s frekvencijskom modulacijom

$$K = \frac{\Delta F_{max}}{f}.$$

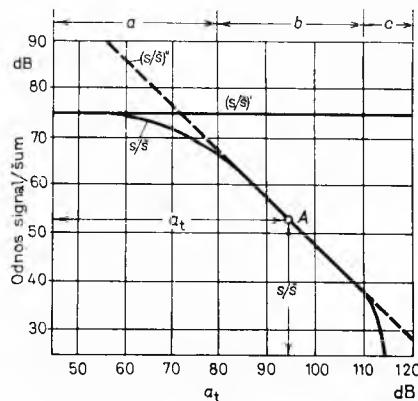
(ΔF_{max} je maksimalna devijacija korisnog signala u kanalu.) Faktor poboljšanja pokazuje koliko je puta odnos signal/šum veći na izlazu prijemnika u jednom kanalu od tog odnosa na ulazu u prijemnik.

Karakteristična vrijednost sustava S je za određene sustave konstantna, bez obzira na to kako je veza planirana. U logaritamskom obliku ona iznosi

$$S = \left(a_t + \frac{S}{\bar{S}} \right) \text{ dB}, \quad (17)$$

gdje a_t znači gušenje na trasi, a S/\bar{S} odnos signal/šum na izlazu iz predajnika. Na sl. 30 prikazana je promjena odnosa S/\bar{S} za ukupni

osnovni šum u govornom ili TV-kanalu u ovisnosti o ukupnim gubicima na trasi a_t . Na slici znači $(S/\bar{S})'$ osnovni odnos signal/šum na izlazu iz predajnika (horizontalna linija), $(S/\bar{S})''$ odnos signal/šum koji ovisi o gubicima na trasi i prema jednadžbi (17) iznosi $S - a_t$. Ako su gubici trase vrlo veliki, odnos $(S/\bar{S})''$ neće biti više



Sl. 30. Odnos S/\bar{S} za ukupni osnovni šum u govornom ili TV kanalu u ovisnosti o gubicima na trasi. $(S/\bar{S})'$ osnovni odnos, $(S/\bar{S})''$ odnos ovisan o gubicima na trasi

prikazan pravcem, kako je pokazano u području c dijagrama, nego on opada brže po krivulji S/\bar{S} . U području a dijagrama, oblik krivulje S/\bar{S} određen je zbrojem konstantne snage termičkog šuma predajnika i snage termičkog šuma koja ovisi o gubicima.

Prvi primjer. Za vrijednosti ucrtane u dijagram (točka A , sl. 30) proizlazi da je, prema (17),

$$S = a_t + \left(\frac{S}{\bar{S}} \right)'' = 94 \text{ dB} + 52,5 \text{ dB} = 146,5 \text{ dB}.$$

Drugi primjer. Radio-relejni predajnik s faktorom šuma $F_s = 10$ dB (=10) i širinom međufrekvencijskog opsega $B = 40$ MHz, ima prema (16) i (8) snagu šuma na izlazu predajnika pri temperaturi 27°C (~ 300 K)

$$P_s = F_s k T B = 10 \times 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \times 300 \text{ K} \times 40 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1} = 1,66 \cdot 10^{-12} \text{ W}$$

Odnos signala prema šumu na izlazu tog predajnika iznosi prema (11)

$$S/\bar{S} = 10 \log \frac{P_s}{P_{s_{ul}}} = 10 \log \frac{1 \text{ W}}{1,66 \cdot 10^{-12} \text{ W}} \text{ dB} = 118 \text{ dB}$$

uz pretpostavljenu izlaznu snagu odašiljača $P_e = 1$ W. Karakteristična vrijednost sustava bit će u tom slučaju prema (17),

$$S = S/\bar{S} + a_t = 118 \text{ dB} - 10 \text{ dB} = 108 \text{ dB},$$

ako je gušenje na trasi $a_t = 10$ dB.

Šum niza radio-relejnih sustava. U kompleksnim komunikacijskim sustavima često se radi o vezi niza radio-relejnih sustava. Ukupna snaga šuma na kraju veze dobiva se zbrajanjem pojedinih snaga šuma dionica, tako da je odnos S/\bar{S} koji određuje kvalitet veze jednak

$$\frac{S}{\bar{S}} = 10 \log \frac{P_s}{\sum P_{s_i}}.$$

Ukupna snaga vlastitog šuma cijele veze bit će

$$P_s = \sum_{i=1}^n P_{s_i} = \frac{P_s}{S} (a_1 + a_2 + \dots + a_n),$$

gdje su a_1, a_2, \dots, a_n gušenja pojedinih dionica u slobodnom prostoru. Odnos S/\bar{S} određuje se za najnepovoljnije slučajeve, tj. kad nastupa feding. To predstavlja pri projektiranju radio-relejnih sustava najdelikatnije pitanje. Feding se određuje mjerenjem ili statističkom obradom dobivenih rezultata na dotičnoj trasi.

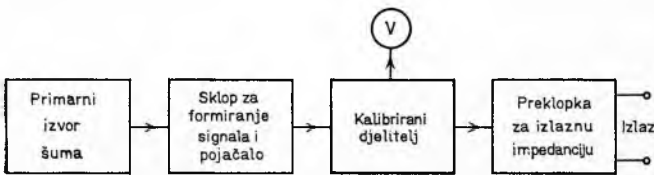
Generatori šuma

Generatori šuma (zovu se i generatori slučajnih fluktuacija) nalaze veliku primjenu pri različitim električnim mjerenjima u laboratorijima i tvornicama. Tome pridonosi cijeli niz vrijednih svojstava koje oni imaju. Tako je, npr., spektar šuma na izlazu iz generatora šuma po pravilu ravnomjeran u širokom frekvencijskom opsegu, od niskih frekvencija pa do vrlo visokih.

Podjela generatora šuma. Po obliku signala generatori šuma dijele se u dvije grupe: u generatore kontinuiranih (analognih) slučajnih signala i generatore diskretnih (impulsnih) slučajnih signala. Po frekvencijskom opsegu generatori se šuma dijele na infraniskofrekvencijske, niskofrekvencijske, visokofrekvencijske i ultravisokofrekvencijske. Po širini pojasa frekvencija oni se dijele na uskopojasne (srednja frekvencija pojasa znatno je viša nego što je širina cijelog spektra) i širokopojasne (širina je spektra otprilike jednaka polovini srednje frekvencije). Širokopojasni generatori šuma zovu se još i generatori bijelog šuma. Prema zakonu raspodjele amplitude ili napona šuma generatori mogu biti normalne ili Gaussove raspodjele (u kojima se raspodjela vrijednosti amplitude šuma u svakom danom trenutku pokorava Gaussovom zakonu raspodjele) i Rayleighove raspodjele (u kojima se trenutna vrijednost izlaznog napona šuma pokorava Rayleighovom zakonu).

Podjele generatora šuma jedne su od drugih neovisne. Tako npr. generator šuma koji nazivaju širokopojasnim može raditi i u režimu normalne raspodjele šuma i u režimu Rayleighove raspodjele šuma; generator s normalnom raspodjelom šuma može biti uskopojasan ili širokopojasan.

Opis generatora šuma. U svakom generatoru šuma važan je primarni izvor šuma. Za tu svrhu mogu dobro služiti naprave u kojima dolazi do izbijanja u plinu (tiratroni, neonske sijalice i sl.) jer one imaju najviši nivo šuma u širokom frekvencijskom opsegu. Kao primarni izvori također se primjenjuju otpori, šumne diode, širokopojasne pentode, fotomultiplikatori, i sl. Pomoću sklopa za formiranje izdvaja se potrebni spektar frekvencija sa zadanom raspodjelom spektra snage šuma, ili se pretvara jedan oblik šuma u drugi, npr. uskopojasni Gaussov šum u šum s Rayleighovom raspodjelom. Za tu svrhu upotrebljavaju se filtri i neki drugi sklopovi. Kalibrirani djelitelji (atenuator) služi za podešavanje izlaznog napona šuma na željeni iznos. Preklopnikom za izbor izlazne impedancije može se birati izlazna impedancija koja je potrebna u svrhu mjerenja. Na sl. 31 prikazana je poopćena blok-shema generatora šuma.



Sl. 31. Općenita blok-shema generatora šuma

Upotreba generatora šuma. Zbog mogućnosti da se izlazna snaga šuma varira ugrađenim attenuatorom i zbog mogućnosti odabiranja nekoliko frekvencijskih područja, generatori su šuma pogodni za mjerenja različitih vrsta. U daljem izlaganju istaknut će se nekoliko mogućnosti primjene generatora šuma.

Da bi se izmjerilo nelinearno izobličenje pojačala i transmisionih sistema, upotrebljava se spektar šuma iz kojeg se pomoću pojasnog filtra izdvoji uski frekvencijski pojas i primijeni na sklop koji se ispituje. Selektivnim mjerilom vrši se mjerenje jedanput na izlazu iz sklopa, a drugi put na izlazu iz filtra, i iz dobivenih podataka određuje se iznos nelinearnosti. Suprotno uobičajenom mjerenju izobličenja (v. Električna mjerenja, TE 3, str. 634), ova metoda ne daje samo utjecaj harmonika nego i utjecaj svih produkata dobivenih intermodulacijom unutar tog područja. Stoga je generator šuma djelomično pogodan i za određivanje *preslušavanja* u prenosnim sistemima i pri prenosu signala pomoću prenosnih frekvencija preko radio-relejnih uređaja u kojima se spektar generatora može upotrijebiti da modulira odašiljač.

U akustici upotrebljavaju se mnoge metode pri mjerenju spektra šuma. Ako se za mjerenje frekvencijskog odziva i izobličenja upotrijebe obični signalni generator čija se frekvencija može kontinuirano mijenjati, moraju i voltmetar za indikaciju ili neki drugi instrumenti biti širokopojasni. Nasuprot tome, kad se za takvo mjerenje upotrebljava generator šuma, potreban je za indikaciju selektivni voltmetar ili analizator. Ta metoda ima prednost da se njome zahvaća i dio pojava koje dolaze od nelinearnosti u transmisijskim sistemima, transijente u zvučniku, i sl., jer je šum

što ga proizvodi generator šuma znatno bliži prirodnom šumu nego što je sinusoidan ton signalnog generatora.

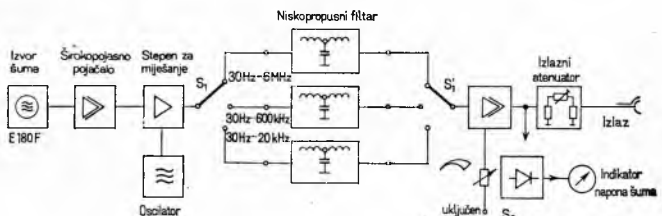
U televiziji se generator šuma upotrebljava za mjerenje *frekvencijskog odziva* i za proučavanje smetnji koje se pojavljuju na televizijskom ekranu, a uvjetovane su odnosom signal/šum. Slična istraživanja sa šumom vršena su na polju radarske tehnike. Dalja važna primjena generatora šuma je primjena na eksperimentalno proučavanje statističkih pojava.

Generator šuma s diodom koja radi u području zasićenja.

Takva se elektronka ponaša unutar velikog frekvencijskog područja kao strujni izvor šuma s velikim unutarnjim otporom. Fluktuacije anodne struje zbog efekta sačme (v. str. 630) izvor su šuma. Srednja kvadratna vrijednost tih fluktuacija anodne struje dana je u području zasićenja Schottkyjevom formulom (10). Struja zasićenja I_a ovisi o temperaturi žarenja katode, pa se promjenom struje grijanja može mijenjati struja šuma.

Radi ilustracije daju se još i podaci za diodni generator šuma tvornice Hewlett Packard model 343A. On ima impedanciju izvora 50Ω , radi u frekvencijskom opsegu od 10 do 600 MHz i uz anodnu struju zasićenja $I_a = 3,33 \text{ mA}$ daje nivo šuma od $\sim 5,2 \text{ dB}$ na izlazu.

Generator šuma s pentodom. Kao primjer generatora šuma s pentodom bit će ukratko opisan generator šuma tvornice Rhode & Schwarz tipa SUF (sl. 32). Kontinuirani spektar šuma proizvodi širokopojasna pentoda (E180F) od 3 W.



Sl. 32. Blok-shema generatora šuma Rhode & Schwarz tipa SUF

Iza te pentode dolaze tri stupnja širokopojasnog pojačanja, kojima širina pojasa iznosi $\sim 12 \text{ MHz}$ s centralnom frekvencijom od $\sim 60 \text{ MHz}$. Pojačani signal šuma se pomoću oscilatora i stepena za miješanje transponira u frekvencijski opseg od 30 Hz do 6 MHz. Oscilator je podešen na sredinu pojasnog propusta širokopojasnog pojačala. Niskopropusni filtri ograničavaju gornju frekvenciju pojasa, kako bi se frekvencijsko područje moglo prilagoditi različitim primjenama. Preklopkama S_1, S_2 mogu se uvrstiti filtri za tri različita frekvencijska opsega. Oni su konstruirani tako da je izlazni napon konstantan u svim predviđenim frekvencijskim područjima. Trostepeno pojačalo s katodnim sledilom na izlazu pojačava opet šum u području od 30 Hz do 6 MHz. Kao rezultat dobije se kontinuirano promjenljivo pojačanje na izlazu naponskog regulatora. Sklopka S_2 služi za prekidanje anodnog napona pojačavačkog stupnja radi isključenja šuma na izlazu iz generatora.

Ispravljen napon s katode izlazne cijevi služi za indikaciju napona šuma na instrumentu koji je kalibriran u efektivnim vrijednostima. Izlaznim attenuatorom provodi se oslabljenje napona šuma s faktorom 10^{-6} u koracima po 10 dB. Smanjenjem pojačanja u širokopojasnom izlaznom pojačalu omogućena je dalja redukcija izlaznog napona u odnosu 10 : 1. Time se može dobiti minimum izlaznog napona šuma od $1 \mu\text{V}$ u frekvencijskom pojasu od 30 Hz do 20 kHz i od 30 Hz do 600 kHz. U području od 30 Hz do 6 MHz minimalni izlazni napon postavljen na $1 \mu\text{V}$ niži je od napona šuma proizvedenog u otporu attenuatora na sobnoj temperaturi. Napon šuma na tom otporu iznosi u području od 30 Hz do 6 MHz $1,34 \mu\text{V}$ kad je generator šuma isključen i zaključen otporom od 75 Ω .

Na 75-omski izlaz priključuju se ostali uređaji pomoću pogodnog koaksijalnog kabela. Postupak upotrijebljen u generatoru šuma za generiranje i pojačanje napona šuma u širem frekvencijskom opsegu zaštićuje amplitudu spektra šuma od povećanja uslijed efekta treperenja na frekvencijama ispod 10^6 Hz . Šum na ulazu u niskofrekvencijsko širokopojasno pojačalo tako je visok da je odnos između njega i vlastitog šuma cijevi (efekta treperenja) dovoljno velik, a amplitudna raspodjela u opsegu od 30 Hz do 6 MHz može biti konstantna unutar $\pm 10\%$. Konstrukcija pojačala osigurava točno dobivanje vršnih vrijednosti napona šuma, koje mogu biti 5 puta veće od efektivnih vrijednosti napona. Kako spektar šuma podliježe Gaussovoj amplitudnoj raspodjeli, vršni amplitude koji su 5 puta veći od efektivne vrijednosti pojavljuju se u manje od 0,01% vremena i zbog toga su varijacije u spektru zanemarljive.

LIT.: V. L. Granovskij, Электрические флуктуации, Москва-Ленинград 1936. — A. Hund, Frequency modulation, New York 1942. — S. Goldman, Frequency analysis, modulation and noise, Cambridge, Mass. 1948. — K. S. Sturley, Frequency modulation, Brooklyn 1950. — В. И. Бунимович, Флуктуационные процессы в радиоприемных устройствах, Москва 1951. — A. Nowak, Das Empfängerrauschen bei AM- und FM-Empfängern, München 1953. — H. S. Black, Modulation theory, Princeton 1953. — С. М. Рылов, Теория электрических флуктуаций и теплового излучения, Москва 1953. — А. Д. Кузьмин, Измерение коэффициента шума приемноусилительных устройств, Москва-Ленинград 1955. — A. van der Ziel, Noise, London 1956. — E. Hölzler, H. Holzwarth, Theorie und Technik der Pulsmodulation, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1957. — W. B. Davenport, Jr., W. L. Root, Introduction to the theory of random signals and noise, New York 1958. — J. J. Freeman, Principles of noise, New York 1958. — M. Schwartz, Information transmission, modulation and noise, New York 1959. — D. Smullin, H. Haus, Noise in electron devices, New York 1959. — J. Fagot, Ph. Magne, La modulation de fréquence, Paris 1959. — W. R. Bennet, Electrical noise, New York 1960. — H. M. Темуч, Генераторы шума, Москва-Ленинград

1961. — P. A. Valitov, K. I. Palatov, A. E. Černyj, Методы измерения основных характеристик флуктуационных сигналов, Харьков 1961. — A. A. Харкевич, Борьба с помехами, Москва 1963. — P. F. Panter, Modulation, noise, and spectral analysis, New York 1965. — N. M. Blachman, Noise and its effects on communication, New York 1966. — R. King, Electrical noise, London 1966. — J. J. Downing, Modulation systems and noise, Englewood Cliffs, N. J. 1968. — C. Montebello, Il rumore d'antenna, Roma 1968. — A. van der Ziel, Noise: sources, characterization, measurement, New York 1970. — H. Bittel, L. Storm, Rauschen, Berlin-Heidelberg-New York 1971. — M. L. Волин, Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре, Москва 1972. — K. B. Катермолле, Принципы импульсно-кодовой модуляции, Москва 1973.

B. Zovko-Cihlar

ELEKTRONIČKI UREĐAJI U RADIO-VEZAMA

Radio-veze služe za prijenos informacija s pomoću elektromagnetskih radio-valova. Te valove stvaraju i zrače radio-odašiljači svojim odašiljačkim antenskim sistemima, a primaju ih prijemne antene i radio-prijemnici. Radio-veze su jedno od najvažnijih područja elektronike. Upravo na tom području počeli su se elektronički sastavni dijelovi, sklopovi i uređaji po prvi put primjenjivati pred više od pola vijeka. Tek znatno kasnije elektronički su uređaji ušli u upotrebu u većoj mjeri i u drugim granama. Radio-veze dijele se s obzirom na način svoje primjene na stalne radio-veze, na pokretne radio-veze i na usmjerene radio-veze. U ovom će članku biti govora samo o stalnim i pokretnim radio-vezama, a usmjerene radio-veze obrađene su u okviru članka *Telekomunikacije, Telefonija, Telegrafija*.

Radio-valovi su elektromagnetski valovi koji se iskorišćavaju za radio-veze. Radio-valovi označavaju se bilo valnom duljinom bilo frekvencijom. Odnos između valne duljine λ i frekvencije f dan je relacijama

$$\lambda = c/f \text{ i } f = c/\lambda,$$

gdje je c brzina širenja radio-valova ($c \approx 300\,000$ km/s). Za radio-veze primjenjuju se elektromagnetski valovi frekvencija 3 kHz...3000 GHz (v. tabl. 1, str. 646), tj. valne duljine 100 km...0,1 mm.

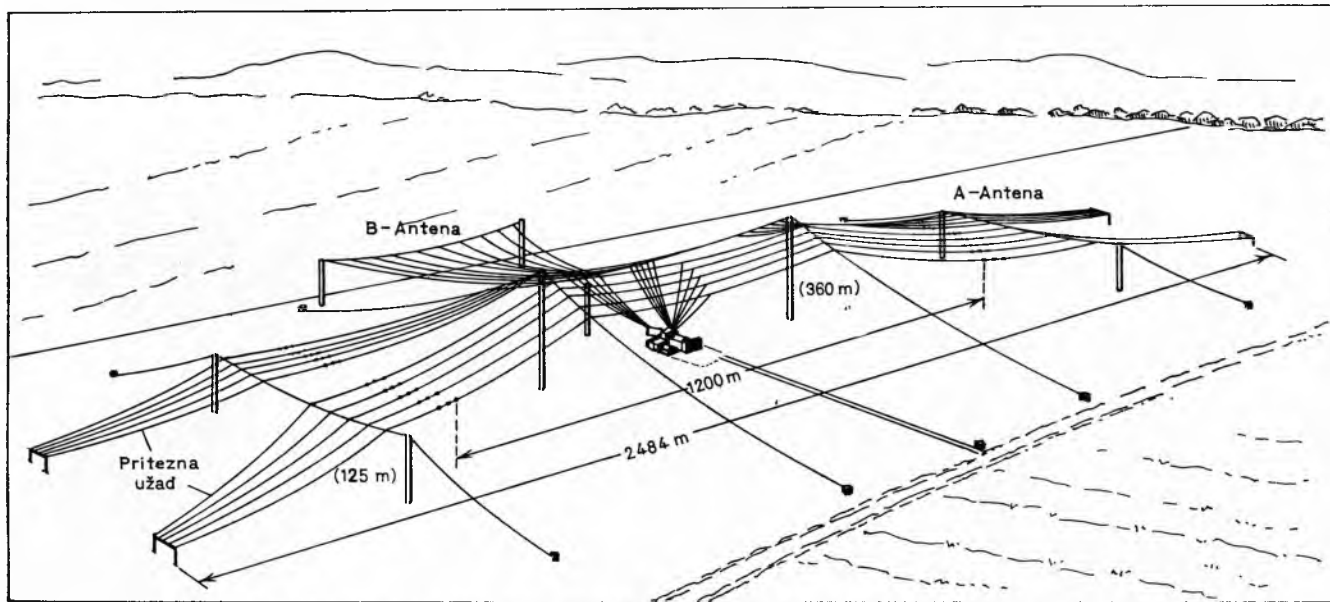
znakova telegrafskog koda, ili tastovanje modulirajuće niske frekvencije. — A2J: telegrafija s tastovanjem modulirajuće niske frekvencije i prenosom samo jednog bočnog pojasa, a potisnutim drugim bočnim pojasom i potisnutim prenosnim valom. — A2H: telegrafija s tastovanjem modulirajuće frekvencije i prenosom jednog bočnog pojasa i prenosnog vala, a s potisnutim drugim bočnim pojasom. — F1: telegrafija pomicanjem frekvencije prenosnog vala između dvije vrijednosti (npr. za 400 Hz) u ritmu znakova telegrafskog koda (engl. frequency shift). Primjenjuje se za teleprinterski simpleksni rad. — F6: telegrafija promjenom frekvencije prenosnog vala između četiri frekvencije (pomaci iznose npr. -600, -200, +200, +600 Hz). Upotrebljava se za duopleksni (dupleksni) rad pri teleprinterskom prenosu.

Za prenos telefonije primjenjuju se ove vrste modulacije:

A3: telefonija s prenosom obaju bočnih pojasa i prenosnog vala. Primjenjuje se danas još u pokretnim službama. — A3A telefonija s jednim bočnim pojasom i djelomično potisnutim prenosnim valom. Drugi je bočni pojas potpuno potisnut. — A3B: telefonija s djelomično potisnutim prenosnim valom i dva bočna pojasa koji su jedan od drugog neovisni. — A3J: telefonija s prenosom samo jednog bočnog pojasa, a s potisnutim drugim bočnim pojasom i potisnutim prenosnim valom. — A3H: telefonija s prenosom prenosnog vala i jednog bočnog pojasa, a s potisnutim drugim bočnim pojasom.

Nakon eksperimentalnog perioda od nekoliko godina pristupilo se početkom ovog stoljeća uspostavljanju prvih pokretnih (prvenstveno brodskih) i stalnih radio-veza. U razvoju i proizvodnji radio-uređaja prednjačila je tada u Engleskoj i u svijetu tvrtka Marconi, a nešto kasnije u Njemačkoj tvrtka Telefunken. Od 1904 pa nadalje postavljaju se radio-stanice s odašiljačima na iskrene brodove i podižu takve stanice za stalne radio-veze na kopnu. Domet tih radio-stanica bio je u početku malen. U našoj zemlji montirana je prva radio-stanica u blizini Bara za stalnu vezu između Crne Gore i Italije, a prvi je saobraćaj uspostavljen 23. VIII 1906.

Čim su se pojavile prve radio-veze, naročito pokretne na brodovima, iskrsli su u vezi s time i različiti pravni, organizacijski i tehnički problemi. Stoga je već 1906 sazvana prva međunarodna konferencija u Berlinu, a druga 1912 u Londonu, radi zajedničkog rješavanja svih tih problema. Tako su, među



Sl. 1 Antenski sistem stare radio-stanice Nauen (Njemačka) (kote u zagradama su visine stupova)

Vrste modulacije. Prenosni se radio-val radi prenosa informacije mora modulirati. Pri amplitudnoj modulaciji (kratica A) mijenja mu se amplituda, a pri frekvencijskoj i faznoj modulaciji (kratica F), frekvencija odn. faza (v. poglavlja Odašiljači, str. 588, Prijemnici, str. 591 i Šum, str. 632). Modulacija se može provesti na više načina. Danas se u stalnim i pokretnim vezama upotrebljavaju za prenos telegrafije ove vrste modulacije:

A1: telegrafija bez upotrebe modulirajuće tonske frekvencije, tastovanje (uključivanje i isključivanje) prenosnog vala u ritmu znakova telegrafskog koda. Primjenjuje se obično samo za tastovanje Morseovih znakova. — A2: telegrafija sa tastovanjem prenosnog vala moduliranog jednim tonom ili više njih u ritmu

inim, već tada utvrđene radne valne duljine i radni postupci za pokretne (brodske) i stalne radio-službe.

Prvi odašiljači radili su iskrama i zračili prigušene valove. Primjena tzv. gašenih iskrišta (rotirajućih, Wienovih) i primjena detektora umjesto ranijeg koherera omogućila je rad i na veće udaljenosti. S gradnjom takvih stanica za stalne veze otpočelo se već 1909, ali stanice veće snage, više stotina kilovata, građene su tek u razdoblju 1912...1923. U tim se stanicama, koje su imale goleme antenske sisteme (sl. 1), ponegdje primjenjuju i odašiljači s Poulsonovim lukom i s visokofrekvencijskim rotirajućim generatorima. Stanice tih tipova zračile su već neprigušene valove. Odašiljači na iskrene, međutim, i dalje se upotrebljavaju u pokretnim i stalnim vezama sve do kraja dvadesetih godina. Od radio-stanica koje su u to vrijeme održavale radio-vezu na velike udaljenosti treba spomenuti Nauen kod Berlina (1913), St. Assise kod Pariza, Rocky Point kod New Yorka i Rugby u Engleskoj (1923).

Po završetku prvog svjetskog rata počele su se u odašiljačima manjih snaga upotrebljavati i elektronke. Oscilator služio je u početku i kao izlazni stepen snage, pa stoga stabilnost frekvencije nije bila na visini.