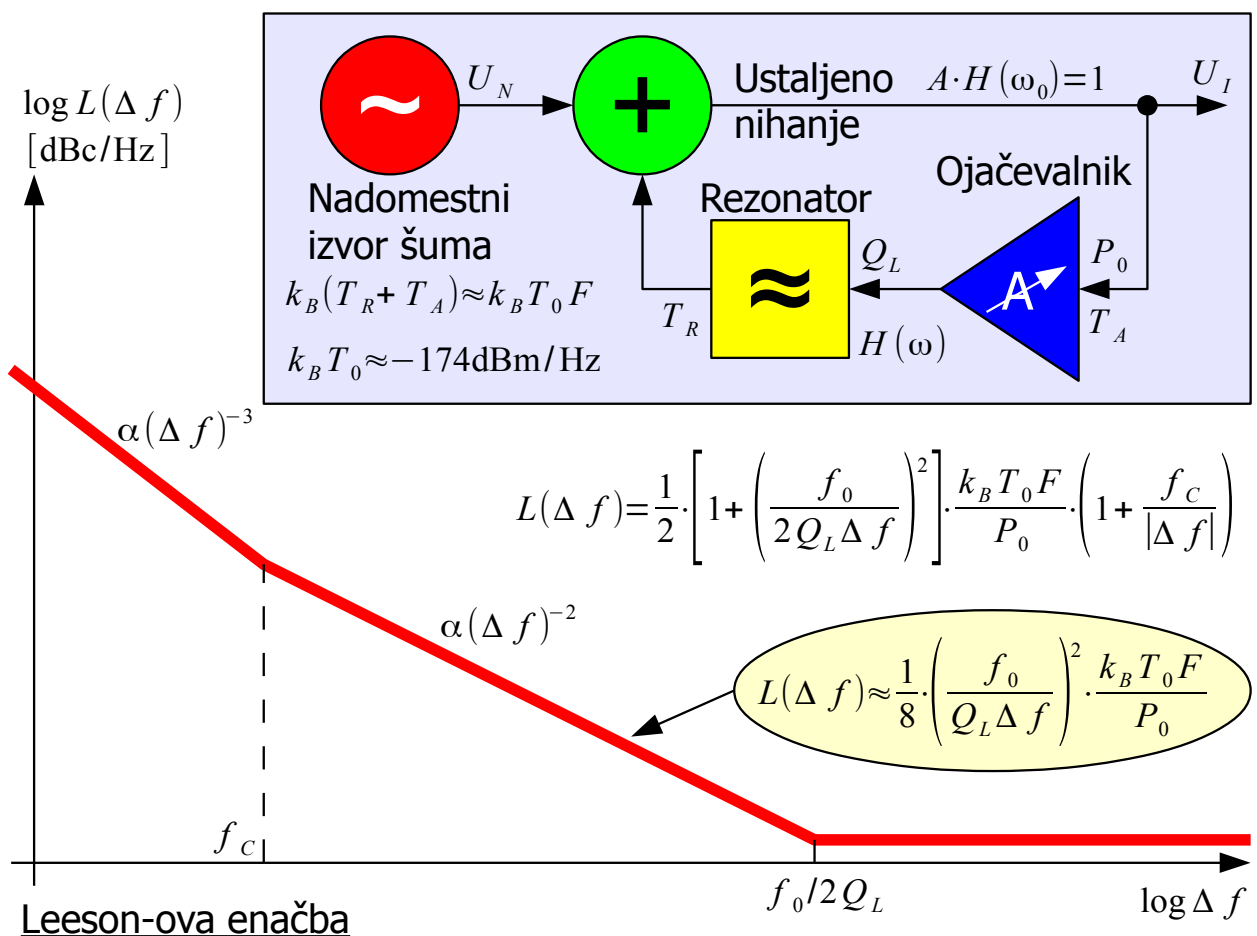


23. Fazni šum visokofrekvenčnega oscilatorja

Osnovni visokofrekvenčni gradnik je oscilator, ki pretvarja enosmerno moč napajalnega vira v visokofrekvenčni signal. Frekvenčni spekter oscilatorja v veliki meri določa pasovno sito oziroma rezonator v povratni vezavi iz izhoda ojačevalnika nazaj na njegov vhod. Dolgoročno opletanje frekvence oscilatorja povzroča staranje gradnikov in zunanji vplivi: napajalna napetost, temperatura, spremembe bremena. Kratkoročne pojave v spektru oscilatorja imenujemo fazni šum.

Presežek ojačanja A ojačevalnika omogoča eksponentno rast nihanja oscilatorja iz toplotnega šuma. Nihanje se ustali pri frekvenci ω_0 , ko je fazni zasuk zanke enak nič oziroma celoštevilskemu mnogokratniku polnega kota in nasičenje ojačevalnika zniža ojačanje A do takšne mere, da velja $A \cdot H(\omega_0) = 1$. Amplituda izhodnega signala oscilatorja se pri ustaljenem nihanju ne spreminja. Toplotni šum se pri ustaljenem nihanju preslika v fazni šum izhodnega signala oscilatorja, kot to opisuje Leeson-ova enačba:



Leeson-ova enačba daje spektralno gostoto faznega šuma $L(\Delta f)$ na odmiku Δf od frekvence nihanja oscilatorja f_0 , normirano na izhodno moč

oscilatorja P_0 . $L(\Delta f)$ običajno navajamo v logaritemskih enotah dBc/Hz, kjer črka "c" pomeni "carrier", to se pravi normirano na moč P_0 čistega nosilca na frekvenci f_0 . Spektralna gostota faznega šuma $L(\Delta f)$ je zrcalno simetrična okoli osrednje frekvence f_0 . Leeson-ova enačba velja, ko je fazni šum majhen $L(\Delta f) \cdot B \ll 1$, kjer je B pasovna širina opazovanja.

Poleg toplotnega šuma gradnikov določa fazni šum oscilatorja obremenjena kvaliteta rezonatorja Q_L . Fazni šum oscilatorja se poveča nad raven toplotnega šuma šele pri majhnih odstopanjih $\Delta f < f_0/2Q_L$ od osrednje frekvence f_0 . V najzanimivejšem področju odmikov Δf , ko je spektralna gostota faznega šuma $L(\Delta f)$ obratno sorazmerna kvadratu odmika Δf , pogosto uporabljamo poenostavljeno Leeson-ovo enačbo.

Spektralna gostota šuma aktivnih gradnikov (tranzistorjev) je pri visokih frekvencah skoraj frekvenčno neodvisna. Pri zelo nizkih frekvencah se šum tranzistorjev začne večati kot šum $1/f$. Mejna frekvenca f_c (kjer "C" pomeni "corner" oziroma $1/f$ prelom) je v velikostnem razredu $f_c \approx 1\text{kHz}$ za bipolarne tranzistorje (Si BJT, SiGe HBT, InGaP HBT) oziroma $f_c \approx 1\text{MHz}$ za poljske tranzistorje (GaAs FET, GaAlAs HEMT itd).

Nasičenje ojačevalnika pri ustaljenem nihanju oscilatorja je nelinearen pojav, ki nizkofrekvenčni šum aktivnega polprevodnika preslika v neposredno okolico osrednje frekvence nihanja oscilatorja f_0 in dodatno poveča fazni šum oscilatorja. V neposredni okolici $\Delta f < f_c$ osrednje frekvence f_0 postane fazni šum obratno sorazmeren kubu (tretji potenci) odmika Δf . Ker je šum $1/f$ večji pri poljskih tranzistorjih, visokofrekvenčne oscilatorje običajno gradimo z bipolarnimi tranzistorji.

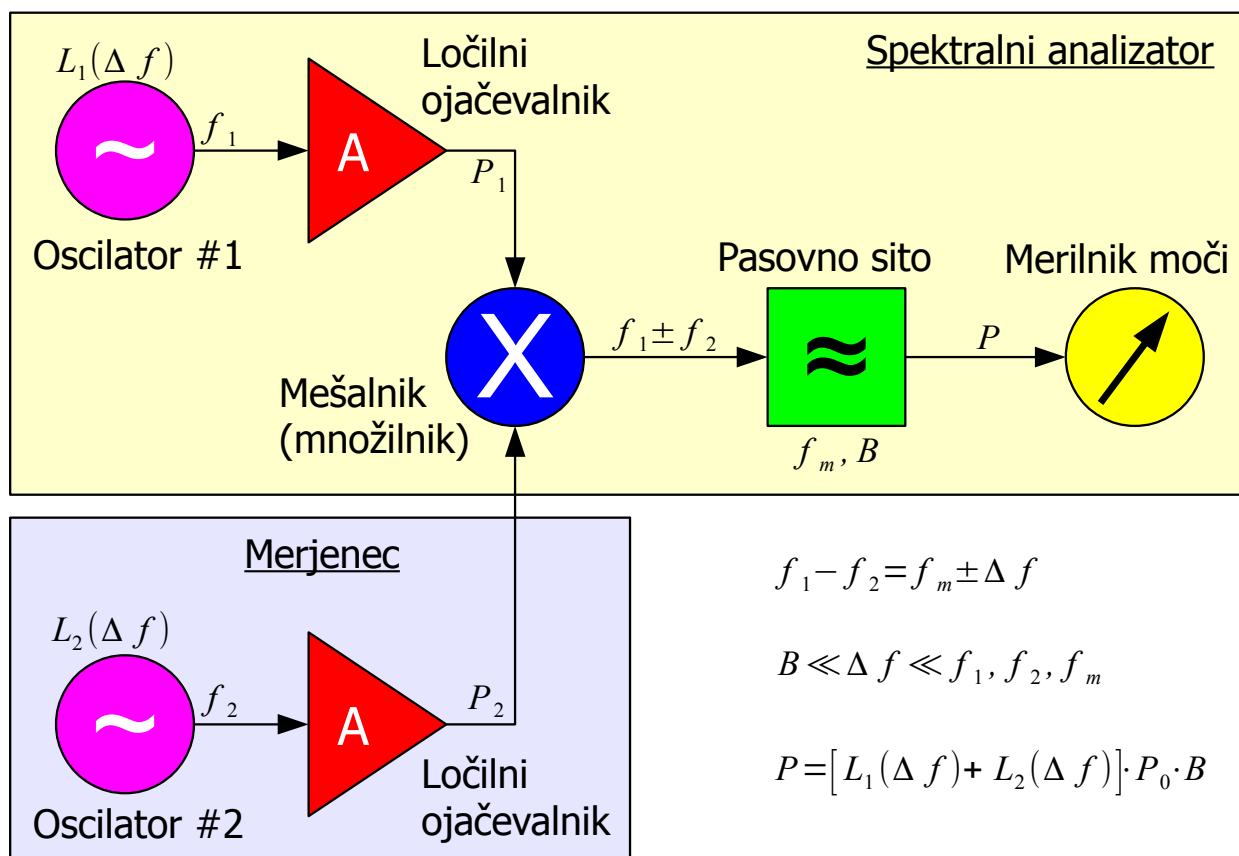
Leeson-ova enačba velja za dobro načrtovan oscilator, kjer nasičenje ojačevalnika povsem pravilno ustali nihanje oscilatorja. Nasičenje lahko obravnavamo tudi kot amplitudno povratno vezavo in vsaka povratna vezava lahko postane nestabilna. Nestabilna delovna točka tranzistorja pomeni spreminjanje impedanc v vezju, torej dodatno fazno modulacijo in močno povečan fazni šum. Skrajni primer je super-regenerativni sprejemnik, kjer nasičenje ojačevalnika oziroma nastavitev delovne točke tranzistorja namenoma naredimo nestabilno tako, da se oscilator periodično ugaša (quenching) in ponovno zaganja iz toplotnega šuma.

Ker so impedance bipolarnega tranzistorja odvisne predvsem od enosmernih tokov skozi tranzistor, uporablja dobro načrtovan oscilator za majhen fazni šum takšno nastavitev delovne točke, da se enosmerni tokovi skozi tranzistor tudi v nasičenju čim manj spreminjajo. V napetostno nastavljenem oscilatorju (VCO) dodajajo fazni šum varikap diode, ki toplotni

šum preslikajo v frekvenčno modulacijo oscilatorja. Kakršnekoli motnje na napajanju oscilatorja, na njegovem izhodu oziroma kakorkoli sklopljene v vezje oscilatorja prav tako poslabšajo fazni šum nad Leeson-ovo teoretsko mejo.

Meritev faznega šuma oscilatorja je svojevrstna in pravzaprav zelo zahtevna meritev jakosti frekvenčnega spektra. Jakost spektra lahko načeloma izmerimo s primernim frekvenčnim sitom in merilnikom moči. Za meritev faznega šuma bi potrebovali sito, ki ima vsaj tisočkrat višjo kvaliteto Q_{SITA} od kvalitete rezonatorja Q_L v oscilatorju. Takšno sito tehnično ni izvedljivo, saj že sam oscilator izdelamo z najboljšim rezonatorjem, ki nam je na voljo.

V visokofrekvenčnem spektralnem analizatorju si pomagamo z mešanjem (oziroma več mešanji) na primernejšo medfrekvenco f_m , kjer lahko izdelamo sito z zahtevanimi lastnostmi. Visokofrekvenčni spektralni analizator povsem jasno meri vsoto moči faznih šumov obeh (vseh) oscilatorjev $L_1(\Delta f) + L_2(\Delta f)$ v merilniku in v merjencu:



Meritev faznega šuma s spektralnim analizatorjem

Meritev faznega šuma s spektralnim analizatorjem je lahko povsem

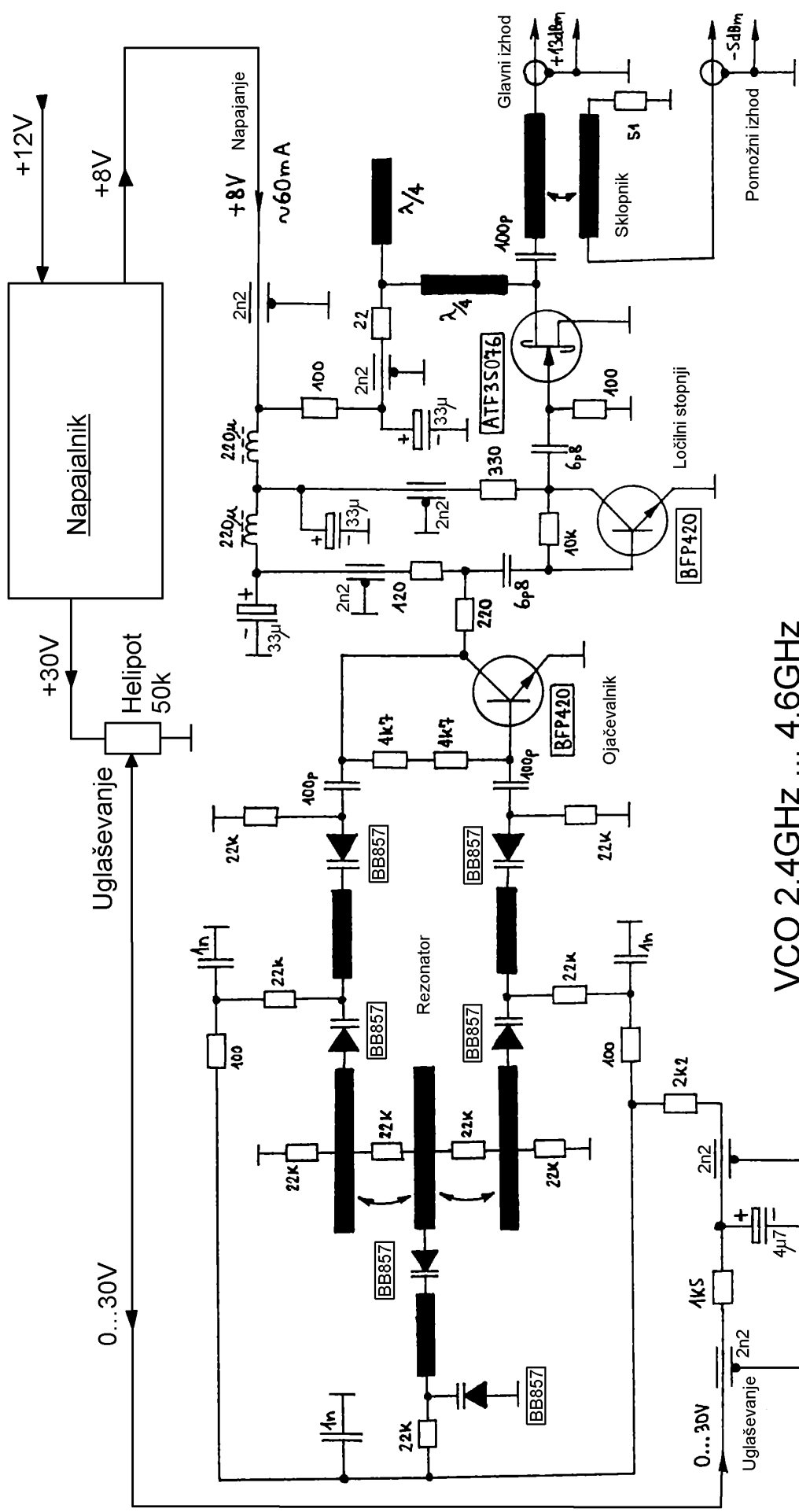
smiselna ali tudi povsem nesmiselna, odvisno od merjenca in postavitve meritve. Sodoben visokofrekvenčni spektralni analizator vsebuje frekvenčno nastavljiv YIG rezonator (Yttrium-Iron Garnet ali $Y_3Fe_5O_{12}$), ki na frekvenci $f_1 \approx 3\text{GHz}$ dosega kvaliteto $Q_{L1} \approx 300$. Če s spektralnim analizatorjem merimo LC oscilator, ki na podobni frekvenci $f_2 \approx 3\text{GHz}$ dosega kvaliteto komaj $Q_{L2} \approx 30$, bo pričakovani fazni šum merjenca stokrat večji od faznega šuma merilnika in je rezultat meritve povsem smiseln: $L_1(\Delta f) \ll L_2(\Delta f)$.

Obratno je fazni šum LC oscilatorja merjenca pri znatno nižji $f_2 \approx 30\text{MHz}$ in $Q_{L2} \approx 30$ stokrat manjši od faznega šuma merilnika, torej bi bila takšna meritev povsem nesmiselna: $L_1(\Delta f) \gg L_2(\Delta f)$. Vse, kar lahko storimo, je to, da frekvenco merjenca najprej pomnožimo v gigaherčno področje. Vsako podvojevanje frekvence pomeni tudi podvojevanje faznih kotov, torej vsakokrat +6dB višji fazni šum.

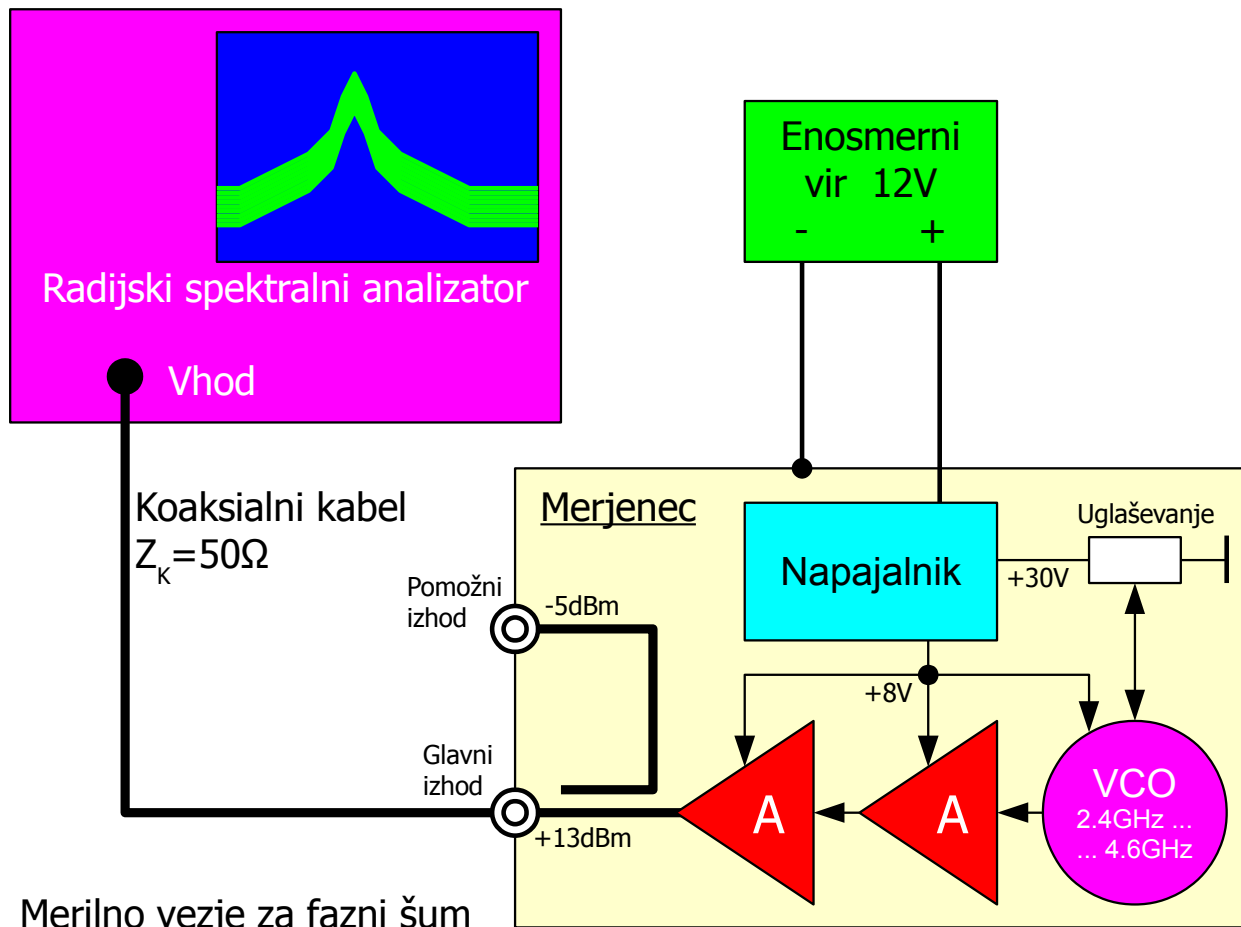
Faznega šuma kristalnih oscilatorjev s $Q_L > 3000$ z običajnim spektralnim analizatorjem ne moremo meriti! Za zahtevnejše meritve faznega šuma potrebujemo opremo, ki vsebuje oscilator, pasivni rezonator ali kasnilni vod z dosti višjo ali kvečjemu podobno kvaliteto Q_L kot merjenec. Če sta kvaliteti merilnika in merjenca $Q_{L1} \approx Q_{L2}$ oziroma fazna šuma $L_1(\Delta f) \approx L_2(\Delta f)$ v istem velikostnem razredu, mora merilni postopek vključevati določanje lastnega faznega šuma merilnika.

Ne glede na merilni postopek moramo pri meritvah faznega šuma vedno zagotoviti, da med posameznimi oscilatorji, pasivnimi rezonatorji oziroma kasnilnimi vodi ni medsebojnih vplivov. Če se merjeni oscilator uklene na referenčni oscilator, na pasivni rezonator ali na kasnilni vod merilnika, je rezultat meritve popolnoma nesmiseln, običajno bistveno boljši od resničnega faznega šuma. Medsebojne vplive izločimo z ločilnimi ojačevalniki, slabilci, cirkulatorji in seveda primernim oklapljanjem merilnika in merjenca, da ne pride do sklopa preko sevanja.

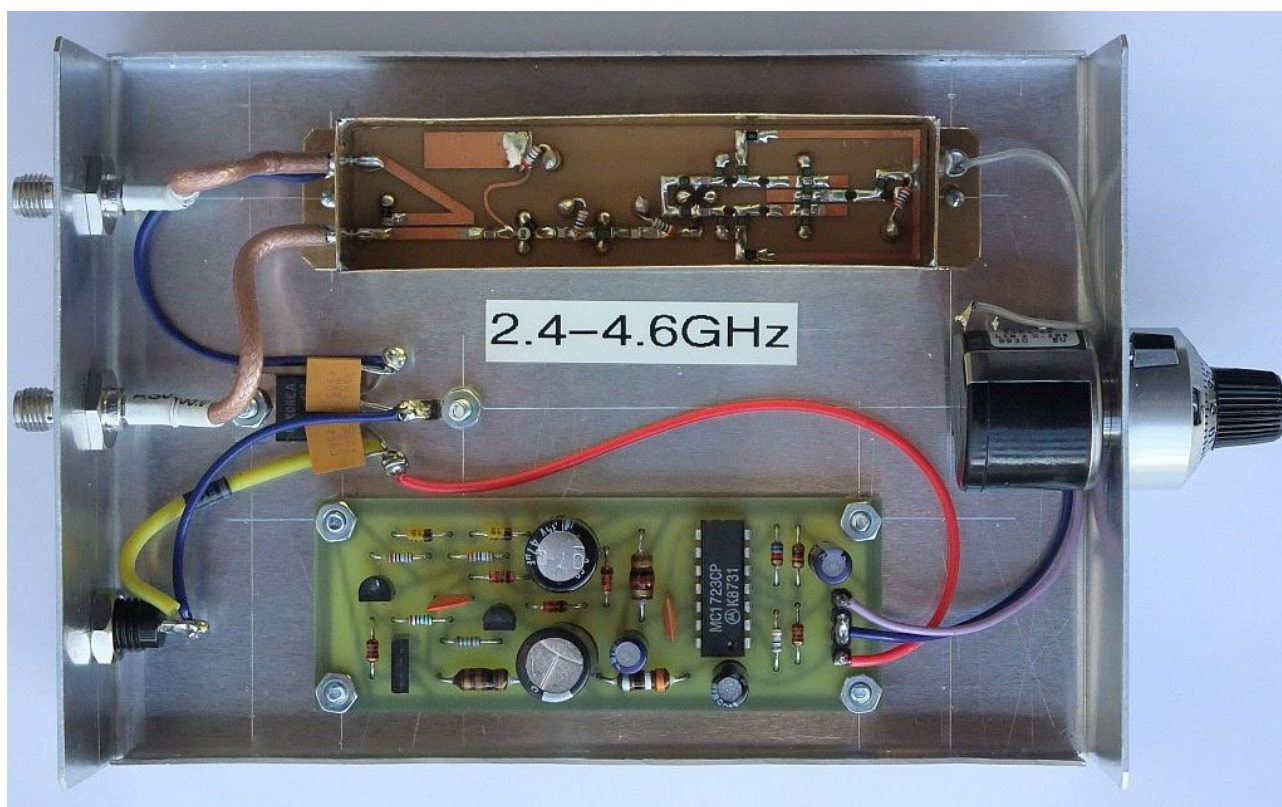
Za vajo izmerimo fazni šum visokofrekvenčnega oscilatorja. Merjenec je VCO s silicijevim bipolarnim tranzistorjem BFP420 in rezonatorjem v tehniki mikrotrakastih vodov, ki se uglašuje s šestimi varikap diodami. Obremenjena kvaliteta takšnega rezonatorja je v velikostnem razredu $Q_L \approx 10$. VCO pokriva frekvenčni pas 2.4GHz do 4.6GHz, podobno kot YIG oscilator v spektralnem analizatorju. Ker delujeta oba oscilatorja v istem frekvenčnem pasu in je kvaliteta YIG oscilatorja bistveno višja od kvalitete mikrotrakastega oscilatorja, je v tem primeru meritev faznega šuma z visokofrekvenčnim spektralnim analizatorjem povsem upravičena.



VCO 2.4GHZ ... 4.6GHZ

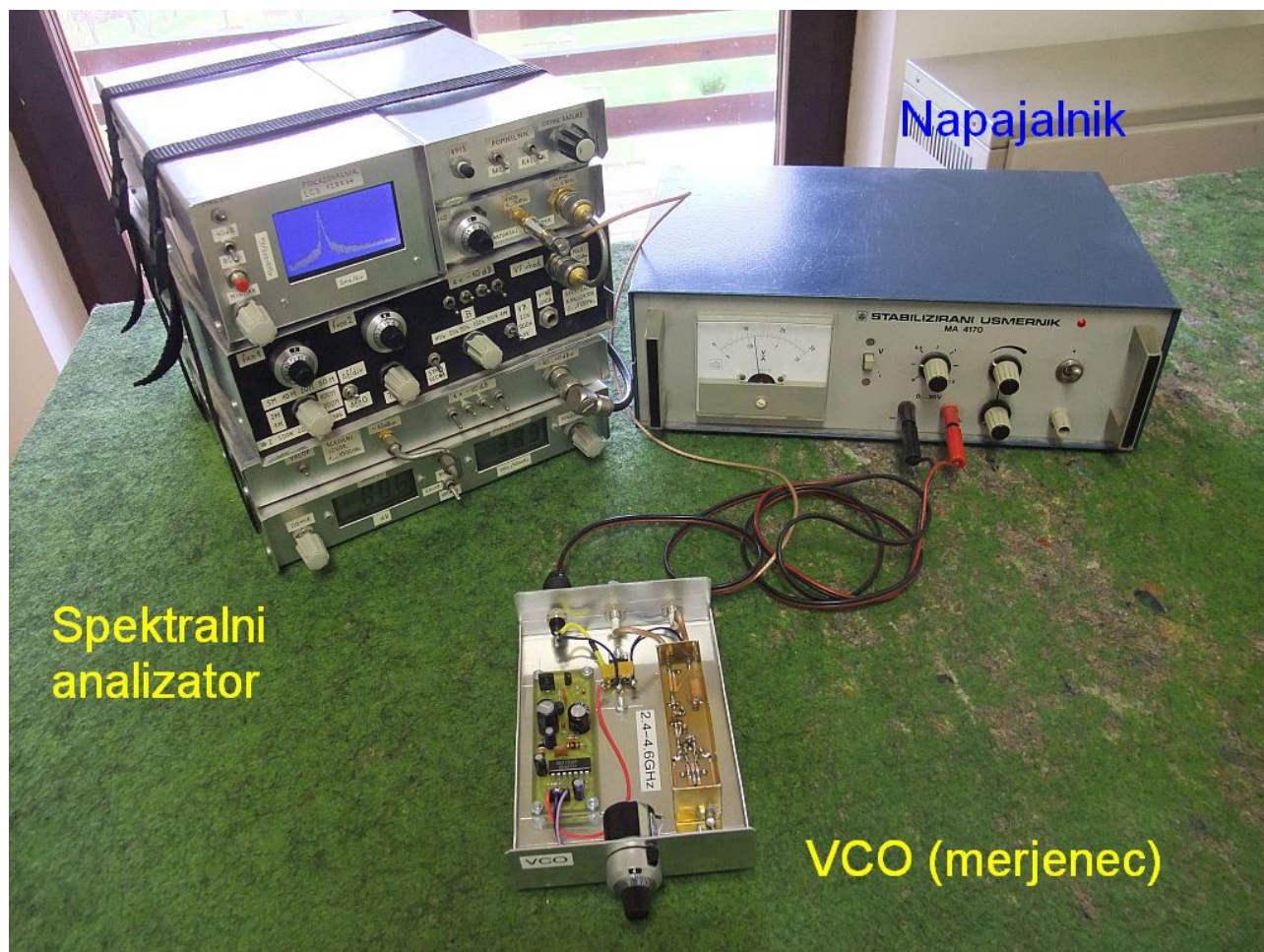


Merilno vezje za fazni šum



VCO merjenec je že opremljen z dvema ločilnima stopnjama. VCO je tudi primerno oklopljen pred motnjami iz okolice. V isto ohišje sta vgrajena tudi napajalnika za +8V (VCO in ločilne stopnje) ter +30V za varikap diode, da je motenj iz okolice čim manj. Napetost na varikap diodah nastavimo z natančnim potenciometrom Helipot na 10 obratov.

Razporeditev in vezava vseh merilnih pripomočkov je prikazana na spodnji sliki:



Pri meritvi faznega šuma pazimo, da je ločljivost spektralnega analizatorja B vsaj desetkrat (boljše tridesetkrat) manjša od frekvenčnega odmika Δf . Pri premajhen odmiku Δf oziroma preveliki pasovni širini B bomo namesto faznega šuma merili odziv pasovnega sita v spektralnem analizatorju!

Ker je šum naključen signal, moramo meritev jakosti šuma povprečiti. V spektralnem analizatorju vključimo oziroma nastavimo video sito tako, da je $B_{\text{VIDEO}} \ll B$. Očitnemu povprečju v dBm moramo prišteti faktor povprečenja logaritma signala, ki je za Gauss-ov šum 2.51dB.

Primer: na spektralnem analizatorju odčitamo jakost nosilca +9dBm in jakost povprečenega faznega šuma -64dBm. Razmerje nosilec/šum znaša:

$$+9\text{dBm} - (-64\text{dBm}) + 2.51\text{dB} = 75.5\text{dB}$$

Ta rezultat preračunamo v dBc/Hz tako, da upoštevamo pasovno širino B spektralnega analizatorja. Primer:

$$B = 10\text{kHz} = 40\text{dB} \cdot \text{Hz}, \quad L = -(75.5\text{dB}) - (40\text{dB} \cdot \text{Hz}) = -115.5\text{dBc/Hz}.$$

Končno spektralni analizator omogoča, da ocenimo njegov lastni fazni šum. Pri enosmerni dobimo na zaslonu spektralnega analizatorja visok enosmerni špic, ki ga obdaja le fazni šum oscilatorja (oziroma oscilatorjev) znotraj spektralnega analizatorja.

Fazni šum VCOja merimo pri frekvenčnih odmikih od $\Delta f = 10\text{kHz}$ do $\Delta f = 10\text{MHz}$. V tem področju frekvenčnih odmikov velja poenostavljena Leeson-ova enačba: fazni šum je sorazmeren kvadratu odmika frekvence Δf . Bližje od 10kHz niti celotna Leeson-ova enačba ne velja več, ker fazni šum ni več zadosti majhen v primerjavi z močjo nosilca. Dlje od 10MHz prevlada toplotni šum ločilnih stopenj oziroma spektralnega analizatorja.

Meritve opravimo tako, da VCO nastavimo na željeno frekvenco in najprej merimo pri največjem odmiku $\Delta f = 10\text{MHz}$. Odmik nato znižujemo hkrati s preletom in ločljivostjo spektralnega analizatorja. Izmerjene vrednosti faznega šuma si zapišemo v tabelo:

Odmik Δf [MHz ali kHz]	VCO 2.5GHz [dBc/Hz]	VCO 3.5GHz [dBc/Hz]	VCO 4.5GHz [dBc/Hz]	Samo SA [dBc/Hz]
10MHz				
3MHz				
1MHz				
300kHz				
100kHz				
30kHz				
10kHz				

Končno narišemo vse štiri krivulje faznega šuma v graf in pri vsaki krivulji natančno označimo, kateri meritvi pripada:

