

Fazno občutljivi ojačevalnik

Uvod

Fazno občutljivi ojačevalnik (FOO) je merilni instrumenti, ki se uporablja za merjenje majhnih izmeničnih napetosti in njihove faze. S sodobnim FOO lahko merimo signale katerih amplituda je le nekaj nV in to celo v prisotnosti šuma, katerega amplituda je 100x ali 1000x večja od samega signala. Seveda FOO ni čarobna naprava, s katero bi lahko merili poljubne izmenične signale v prisotnosti poljubnega šuma. Tako signal kot šum morata izpolnjevati določene zahteve. Kot bomo videli mora biti frekvenčni spekter signala dovolj ozek, da je nivo šuma v tem delu spektra manjši od signala. Ta pogoj je v praksi velikokrat izpolnjen in takrat postane FOO nepogrešljiv merilni instrument.

Opis problema

Za začetek si na praktičnem primeru oglejmo, kje se pojavijo težave, kadar želimo meriti majhne izmenične signale. Vzemimo, da želimo izmeriti sinusni signal s frekvenco 10 kHz in amplitudo 10 μV . Na prvi pogled je zadeva preprosta. Vzamemo ojačevalnik z ojačanjem 1000 in njegov izhod priklopimo na osciloskop. Na izhodu iz ojačevalnika bomo dobili sinusni signal z amplitudo 10 mV, kar z malo boljšim osciloskopom z lahkoto vidimo. V resnici se takšna meritev ne "posreči". Pozabili smo namreč upoštevati, da je v realni pogojih merjenja vedno prisoten šum. Tudi če je signal na začetku merilne verige (v našem primeru na vhodu ojačevalnika) mnogo večji od šuma je lahko na koncu merilne verige (zaslon osciloskopa) situacija ravno obratna. Poskusimo oceniti, kolikšna bi bila amplituda šuma na izhodu ojačevalnika v našem primeru. Zelo dober nizkošumni napetostni ojačevalnik ima okoli 1 $\mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ vhodnega šuma. Privzemimo, da ima naš ojačevalnik pasovno širino okoli 20 kHz. Amplitudo šuma na izhodu ojačevalnika izračunamo kot produkt šuma na vhodu ojačevalnika, korena pasovne širine ojačevalnika in faktorja ojačanja:

$$U_N = 1 \frac{\mu\text{V}}{\sqrt{\text{Hz}}} \sqrt{20\text{kHz}} 1000 \approx 140\text{mV}$$

Izračunana amplituda šuma na izhodu je približno štirinajstkrat večja od velikosti signala. Očitno je, da bomo na osciloskopu videli le šum. Z analizo zgornjega primera lahko ugotovimo, kje se skriva možna rešitev problema. Zmanjšanje ojačanja nam ne pomaga, ker bi s tem zmanjšal tudi signal in bi razmerje signal šum (S/N) ostalo nespremenjeno. Lahko bi izbrali ojačevalnik z manj vhodnega šuma vendar tudi tukaj prej ali slej naletimo na spodnjo mejo, ki jo postavlja narava in pod katero ne moremo (npr. termični šum na uporu). Ostane nam le še zmanjšanje pasovne širine. pasovno širito naredimo in kakšnim pogojem morata zadočati signal in šum bomo videli v naslednjem poglavju.

Princip delovanja FOO

Predstavljajmo si, da smo na majhni ladji, ki nima posebnih navigacijskih pripomočkov in želimo ponoči pristati v pristanišču velikega mesta. Najprej poskušamo poiskati svetilnik na pomolu. Običajno ga hitro opazimo saj njegova luč utripa. Če svetilnik na pomolu nebi utripal bi ga bilo zelo težko ločiti od ozadja mestnih luči in naloga bi postala precej težja. Pri meritvah se zelo pogosto srečujemo s podobno situacijo. Svetilnikovi luči ustreza signal, ki ga želimo meriti, ozadju mestnih luči pa šum, ki nam merjenje otežuje.

Iz zgoraj opisanega primera lahko sklepamo, da bomo signale bistveno lažje ločili od šuma, če so izmenični in če poznamo njihovo frekvenco. Pri meritvah, kjer je signala malo v primerjavi s šumom zato najprej poskrbimo, da je signal izmeničen. To lahko dosežemo na različne načine odvisno od konkretne eksperimentalne postavitve. Kot primer vzemimo meritev z Weatstonovim mostičkom. Če mostiček priklopimo na izmenično napetost z izbrano frekvenco bo tudi signal iz mostička nihal z isto frekvenco. Shema takšne meritve je narisana na Sliki?

Naprava, ki je sposobna ločiti izmenični signal pri določeni frekvenci od šuma je FOO katerega shema je prikazana na Sliki?. FOO ima dva vhoda, prvega za signal drugega pa za referenčni signal ali referenco. Referenca je praviloma signal z veliko amplitudo in malo šuma, ki niha z isto frekvenco kot signal, ki ga želimo meriti. Naloga reference je da pove FOO pri kateri frekvenci se nahaja signal.

FOO na osnovi reference generira v vezju, ki se imenuje PLL (Phase Locked Loop), čisti sinusni signal s konstantno amplitudo. Frekvenca in faza tega signala se ujemata s frekvenco in fazo reference. Sinusni signal iz PLLja se vodi v en vhod množilnika, signal, ki ga želimo meriti, pa v drugi vhod množilnika. Spektralna analiza izhoda iz množilnika bi pokazala, da sta v izhodu prisotni dve komponenti: prva pri frekvenci 0 torej DC, druga pa pri dvojni frekvenci. Da je temu tako se lahko hitro prepričamo s kratkim računom. Uporabimo formulo za produkt dveh sinusov

$$\begin{aligned} A_{Sig} \sin(2\pi f_{Sig} t) A_{Ref} \sin(2\pi f_{Ref} t) &= \\ &= \frac{1}{2} A_{Sig} A_{Ref} (\cos(2\pi (f_{Sig} - f_{Ref}) t) - \cos(2\pi (f_{Sig} + f_{Ref}) t)) \end{aligned}$$

kjer so A_{Sig} , A_{Ref} , f_{Sig} in f_{Ref} amplitude in frekvence signala in reference. V primeru, da sta frekvenci signala in reference enaki $f_{Sig} = f_{Ref} = f$ se enačba ?? poenostavi v

$$A_{Sig} \sin(2\pi f t) A_{Ref} \sin(2\pi f t) = \frac{1}{2} A_{Sig} A_{Ref} (1 - \cos(4\pi f t))$$

Ko signal iz množilnika vodimo skozi filter, ki prepusti nizke frekvence se komponenta pri dvojni frekvenci (drugi člen na desni strani enačbe ??) zaduši in ostane le še istosmerna komponenta. Če bi bila frekvenca signala različna od referenčne frekvence bi nizkopasovni filter zadušil obe komponenti. Izjema so le komponente, katerih frekvenca se od referenčne razlikuje za manj kot je prepustna širina filtra. Šum si lahko predstavljamo kot signal (sicer nezaželen), katerega spekter

vsebuje množico komponent z najrazličnejšimi frekvencami. Iz zgoraj povedanega sledi, da bo FOO odstranil večino šuma. Ostal bo le tisti del, katerega frekvenčne komponente so zelo blizu frekvence signala, katerega želimo meriti. Teoretično je učinek enak, kot če bi uporabili ozkopasovni prepustni filter. V praksi se izkaže, da klasičnega filtra, ki bi imel tako ozek prepustni pas in bi mu lahko za povrh še spreminjali centralno frekvenco ni mogoče narediti zato je FOO v takšnih primerih nepogrešljiv.

Kot vidimo je izbira referenčne frekvence za optimalno izvedbo meritve zelo pomembna. Vedno moramo paziti, da referenčno frekvenco izberemo tako, da leži v tistem predelu spektra, kjer je šuma najmanj. Klasična napaka, ki se pogosto pojavlja je, da si za delovno napetost izberemo 50Hz ali katerega izmed njenih mnogokratnikov. Šum je pri teh frekvencah vedno zelo velik in se ga z uporabo FOO ne moremo znebiti!

Do sedaj smo se ukvarjali samo z velikostjo signala nič pa še nismo povedali, kako vpliva njegova faza na rezultat meritve. Kot že samo ime naprave pove je FOO občutljiv tudi na fazo. Če je faza signala zamaknjena glede na referenco za 90 bo izhod iz FOO enak nič. V to se lahko hitro prepričamo z uporabo podobne trigonometrijske enakosti kot v enačbi ?? (to naj za vajo naredi študent sam doma). FOO v zgoraj opisani izvedbi meri le del signala, ki je v fazi z referenco. Komerercialni FOO imajo zato vgrajeno še dodatno vezje, s katerim lahko nastavljamo fazo referenčnega signala. To nam omogoča, da lahko pomerimo tudi komponento signala, ki je iz faze in s tem v celoti rekonstruiramo prvotni signal. Takšni FOO so znani kot enokanalni. Obstajajo tudi dvokanalni FOO, ki generirajo dve referenci, ki sta medsebojno zamaknjeni za 90. Referenci vodijo vsako zase na dva ločena množilnika kjer se pomnožijo z vhodnim signalom. Na izhodih množilnikov tako hkrati dobimo obe komponenti vhodnega signala. Shema takšnega FOO je prikazana na sliki??

Opis opreme

Za izvedbo vaje bomo potrebovali sledečo opremo:

- 1.) digitalni dvokanalni FOO SR830
- 2.) digitalni osciloskop Textronix
- 3.) izvor šuma in analogni seštevalnik (vse v eni škatli)
- 4.) funkcijski generator

Dvokanalni FOO SR830 je eden moderen FOO, ki za razliko od analognih FOO opravlja večino funkcij digitalno. V njem se generiranje reference, množenje signalov in filtriranje izvaja s pomočjo vgrajenega računalnika. Zaradi tega je SR830 bistveno natančnejši od analognih FOO in lahko meri signale v prisotnosti močnejšega šuma. V praktikumski vaji bomo preizkušali različne možnosti meritev, ki jih lahko izvajamo s tem instrumentom.

Digitalni osciloskop Textronix bomo uporabljali za opazovanje analognih signalov, ki jih bomo vodili na vhod FOO.

Izvor šuma in analogni seštevalnik bosta omogočala kontrolirano dodajanje in odvzemanje šuma signalu in s tem simulacijo različnih pogojev merjenja.

Funkcijski generator bomo uporabljali za generiranje sinusnega, žagastega in pravokotnega signala.

Naloge

1. Opazuj signal na osciloskopu in FOO pri različnih amplitudah šuma. Izmeri velikost šuma pri različnih nastavitvah časovne konstante in strmine nizkopasovnega filtra
2. Izmeri časovni odziv FOO
3. Izmeri harmonsko strukturo različnih signalov

Potek dela

Ad 1.) Sestavi eksperimentalno postavitvev, kot je narisano na sliki ??

Nastavi amplitudo sinusnega signala iz FOO (referenca) na okoli 50 mV. Amplitudo šuma nastavi na najmanjšo vrednost. Opazuj signal na osciloskopu in FOO in povečuj amplitudo šuma. Oцени pri kateri jakosti šuma na moreš več ločiti signala od šuma na osciloskopu. Pri katerem razmerju signal šum postane odčitek na FOO nestabilen (se spreminja za več kot 10%). Izmeri, kako vpliva nastavitvev časovne konstante in strmina nizkopasovnega filtra na stabilnost odčitka na FOO.

Ad 2.) Na vhod FOO napelji čisti sinusni signal iz reference. Amplituda signala naj bo 10 mV. Časovno konstanto nastavi na 30 s. Počakaj, da postaneta amplituda, ki jo kaže FOO in amplituda sinusnega signala enaki. Nato amplitudo sinusnega signala naglo povečaj na okoli 50 mV. Beleži amplitudo signala, ki jo kaže FOO vsakih 10s.

Ad 3.) Na vhod FOO priklopi funkcijski generator. Izberi sinusni signal in nastavi amplitudo na okoli 200 mV. Hkrati napelji signal iz funkcijskega generatorja v referenčni vhod FOO. Izmeri amplitudo harmonikov od 1 do 10. Enako meritev ponovi še za žagast in pravokoten signal. Primerjaj relativne vrednosti izmerjenih amplitud harmonikov z izračunanimi.

Definicije pojmov

Razmerje signal šum

Razmerje signal šum (angl. *Signal to Noise ratio*, oznaka S/N) je definirano z enačbo

$$\frac{S}{N} = 20 \text{ Log} \frac{U_{sig}}{U_N}$$

kjer je U_{sig} RMS napetost signala in U_N RMS napetost šuma. Enota za razmerje signal šum je decibel (dB). Pozitiven S/N pomeni, da je amplituda signala večja od amplitude šuma, negativen pa ravno obratno. Primer: $S/N = -40\text{dB}$ pomeni, da je šum 100x močnejši od signala.

Kvaliteta

Kvaliteta (angl. *Quality*, oznaka Q) ozkopasovnega filtra ali nihajnega kroga je razmerje med frekvenčno širino na polovični višini frekvenčne karakteristike filtra (nihajnega kroga) in centralno frekvenco.

Literatura

1. Stanford Research Systems, 1996-1997 Scientific and Engineering Instruments, str. 169 - 179 (katalog Stanford Research Systems priložen vaji. NE ODNAŠAJ!)
- 2.