

Menetelmiä signaali/kohina-suhteen parantamiseksi

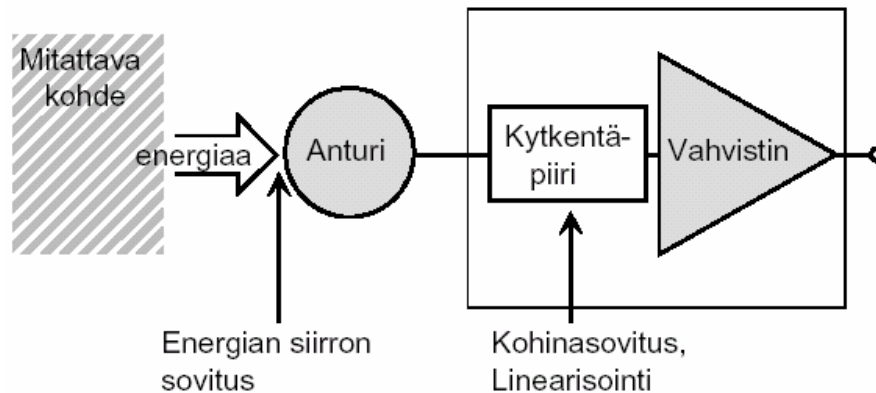
- Vahvistinten epäideaalisuudet
- Anturin kohinasovitus vahvistimeen
- Suodatus
- Choppervahvistimet
- Lock-in vahvistin (Vaiheherkkävahvistin, PSD)
- Keskiarvoistus
- (Auto- ja ristikorrelaatio)

Vahvistinten epäideaalisuudet

- Kohinavirta, kohinajännite
- Offset jännite
 - Sisääntulon diff. Jännite kun ulostulo on nolla.
- Bias virrat
 - Sisäänmenoissa esiintyvät virrat
- Lineaarisuus
- *CMRR* = Common Mode Rejection Ratio
 - Yhteismuotoisen signaalin vaimennus

Mittausvahvistimeksi (1. vahvistinaste) valittava hyvälaatuinen vahvistin, jossa nämä tekijät on optimoitu

Anturin ja vahvistimen kohinasovitus



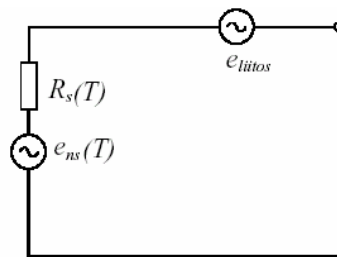
- Mitattavan ilmiön ja anturin välillä pyrittävä maksimoimaan siirtyvä teho
- Kytkentäpiirissä / vahvistimessa kohinasovitus, maksimoitava signaali-kohina suhde

Anturin kohinamalli

- Anturin kohina-analyysin lähtökohta on sähköinen sijaiskytkentä

- Passiiviset anturit:

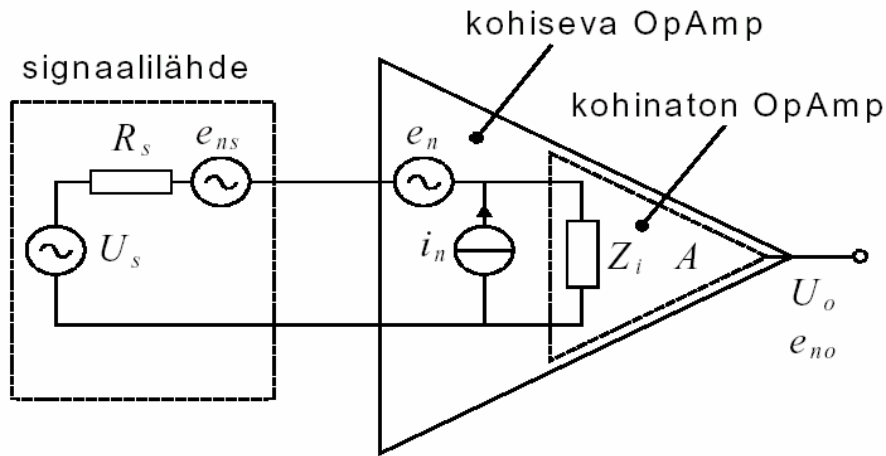
- Passiivisten komponenttien sijaiskytkentä
- esim. lämpöanturi:



- Aktiiviset anturit:

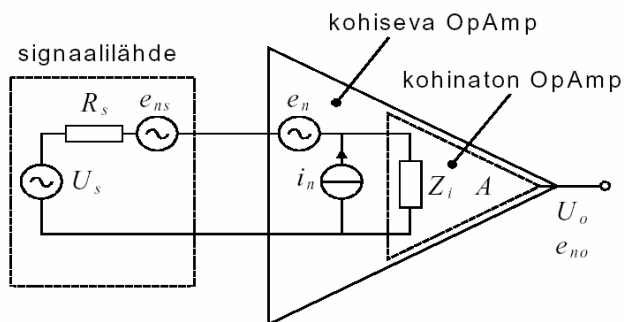
- Passiivisten komponenttien sijaiskytkennän lisäksi kohinalähteitä tuovat fysiikan ilmiöistä johtuvat muut kohinamekanismit.

Operaatiovahvistimen kohinamalli



- OpAmp:n kohina voidaan kuvata otopuolen jännite- ja virtakohinalähteillä e_n ja i_n

Operaatiovahvistimen kohinamalli



$$e_{ns} = \sqrt{4kTRB}$$

Ulostulokohina:
$$e_{n0}^2 = A^2 \cdot \left((e_n^2 + e_{ns}^2) \cdot \frac{Z_i^2}{(Z_i + R_s)^2} + i_n^2 \cdot \frac{Z_i^2 R_s^2}{(Z_i + R_s)^2} \right)$$

$$\frac{Z_i^2}{(Z_i + R_s)^2} \approx 1 \quad \boxed{e_{nin}^2 = e_{n0}^2 / A^2 = (e_n^2 + e_{ns}^2 + i_n^2 R_s^2)}$$

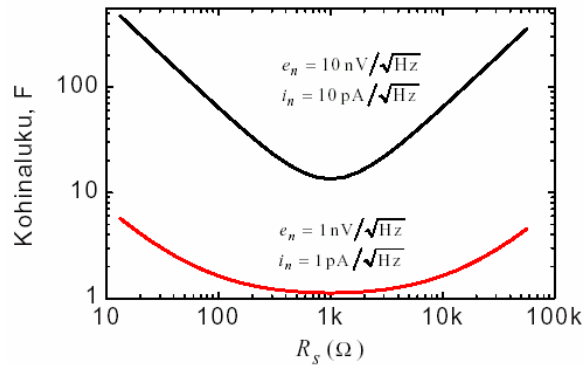
Kohinasovitus

Kohinaluku $F = \frac{SNR_{IN}}{SNR_{OUT}} = \frac{e_n^2 + e_{ns}^2 + i_n^2 R_s^2}{e_{ns}^2}$

Optimi $\frac{d}{dR} F = \frac{d}{dR} \frac{e_n^2 + 4kTR_s B + i_n^2 R_s^2}{4kTR_s B} = 0$

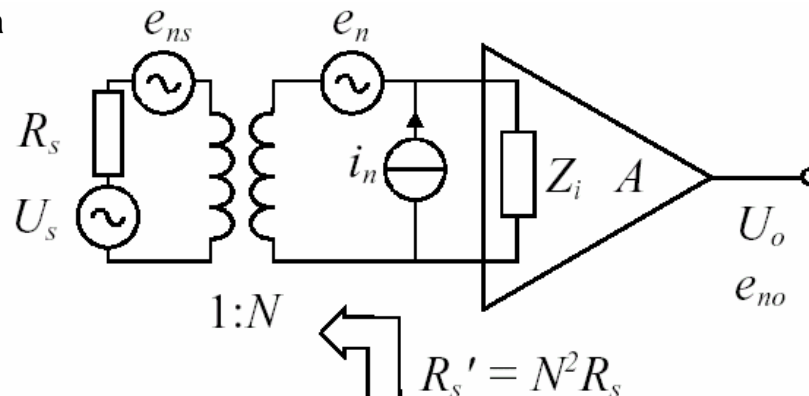
$$R_s = \frac{e_n}{i_n}$$

$$F_{MIN} = 1 + \frac{e_n \cdot i_n}{2kTB}$$



Kohinasovitus muuntajalla

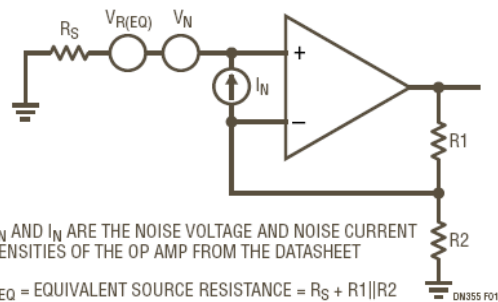
- Vaihtosignaalia antavilla antureilla Kohinasovitus voidaan suorittaa sijoittamalla muuntaja anturiasteen ja vahvistinasteen väliin.
- Vahvistimen näkemä vastus muuttuu muuntajan muuntosuhteen funktiona



Kohinamalli jännitevahvistimelle

•Huomioitavat kohinalähteet:

- Vahvistimen sisäänmenossa näkyvän resistanssin R_{EQ} kohina. R_{EQ} muodostuu Anturin ja sillan muodostamasta vastuksesta R_s sekä vahvistinkytkennän sisäänmenoimpedanssista $R_1 || R_2$.
- OpAmpin sisäänmenoon redusoidusta virtakohinanasta I_N (muuttuu jännitteeksi vastuksessa R_{EQ})
- OpAmpin sisäänmenoon redusoidusta jännitekohinasta V_N
- Yhteisvaikutus saadaan summaamalla kohinalähteet neliöllisesti
- Vaikutus ulostulossa saadaan kertomalla vahvistuksella $(1+R_1/R_2)$



V_N AND I_N ARE THE NOISE VOLTAGE AND NOISE CURRENT DENSITIES OF THE OP AMP FROM THE DATASHEET

$R_{EQ} = \text{EQUIVALENT SOURCE RESISTANCE} = R_S + R_1 || R_2$

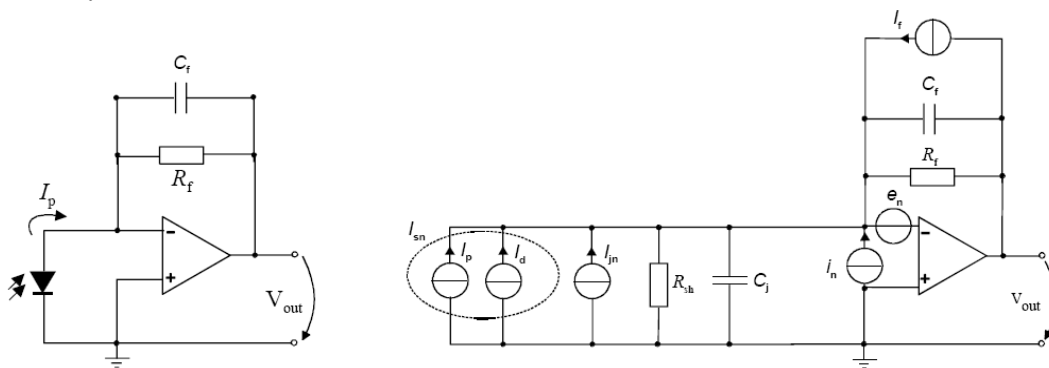
$V_{R(EQ)} = 0.13 \sqrt{R_{EQ}}$ IS RESISTOR THERMAL NOISE IN nV/\sqrt{Hz}

EXPRESS V_N , $V_{R(EQ)}$ AND $I_N \cdot R_{EQ}$ IN nV/\sqrt{Hz}

$V_{N(TOTAL)} = \sqrt{V_N^2 + V_{R(EQ)}^2 + (I_N \cdot R_{EQ})^2}$
= THE TOTAL INPUT REFERRED NOISE IN nV/\sqrt{Hz}

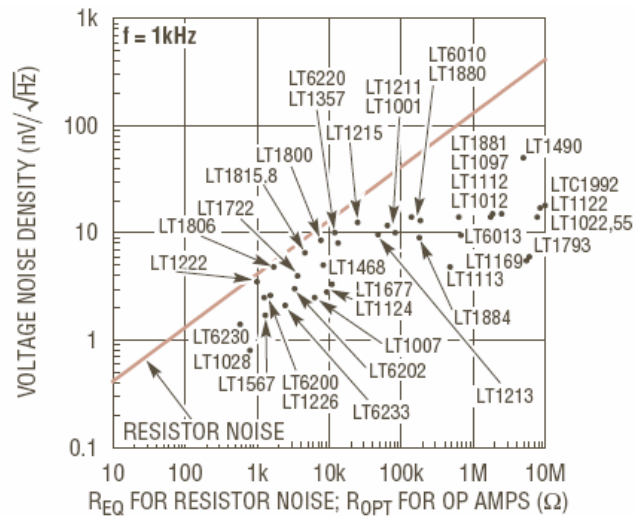
Virtajännitemuuntimen kohinamalli

- Kohinalähteet: OpAmpin virtakohina, OpAmpin jännitekohina, takaisinkytkentävastus, detektorin (tässä fotiodi) rinnakkaisvastus tai impedanssi
- Kaikki lähteet kannattaa redusoida sisäänmenoon virtoina!
- Jännite ulostulossa saadaan kertomalla kohinavirta piirin vahvistuksella R_f



Vahvistimen valinta

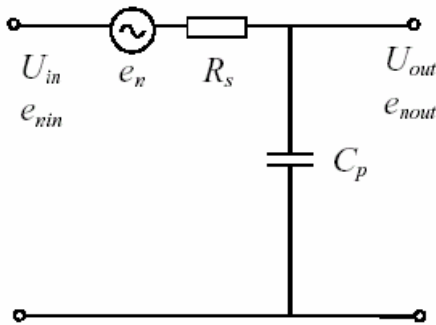
- Anturin impedanssitaso määrää millainen vahvistin antaa parhaan signaalikohinasuhteen
- Saattaa riippua halutusta taajuusalueesta ($1/f$ kohina aiheuttaa sen ettei e_n/i_n pysy vakiona)



Suodattimen vaikutus kohinaan

- Suodattimen tehtävä on parantaa signaali-kohina suhdetta (kohinaluku pienempi kuin 1)
- Suodatin on myös kohinan lähde
- Suodattimen kohinat minimoitava-> oikea suodatinsuunnittelu
- Aktiiviset suodattimet kohisevat usein enemmän kuin passiiviset, jolloin erittäin kohinaherkissä sovellutuksissa käytetään passiivisia ratkaisuja
- Suodattimen asteen kasvaessa suodattimen oma kohina kasvaa mutta toisaalta läpi pääsevä kohina pienenee

Suodattimen vaikutus kohinaan



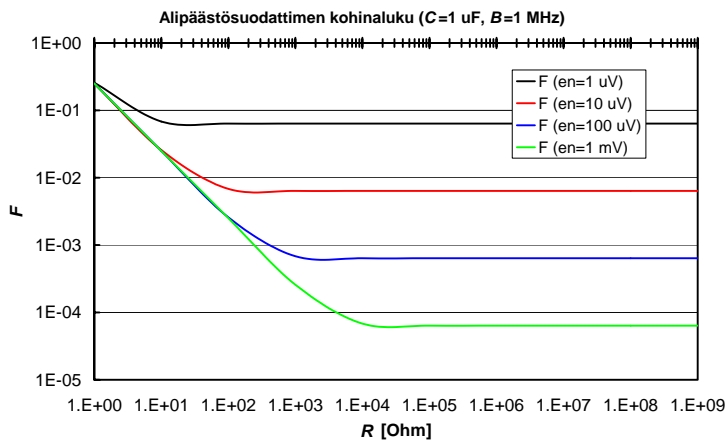
$$F = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} = \frac{U_{in}/e_{n,in}(B)}{U_{out}/\sqrt{e_{n,in}^2\left(\frac{1,57}{2\pi RC}\right) + 4kTR\frac{1,57}{2\pi RC}}}$$

$$= \sqrt{\frac{e_{n,in}^2\left(\frac{1,57}{2\pi RC}\right)}{e_{n,in}^2(B)} + \frac{4kTR}{e_{n,in}^2(B)}\frac{1,57}{2\pi RC}}$$

$$\approx \sqrt{\left(\frac{1,57}{2\pi RCB}\right)^2 + \frac{4kTR}{e_{n,in}^2(B)}\frac{1,57}{2\pi RC}}$$

- Esimerkkinä alipäästösuodatin
- Oletetaan, että signaali kulkee vääristymättä suodattimen läpi ($U_{out}=U_{in}$)
- Kun sisään kytkeytyvä kohina on luonteeltaan valkoista, saadaan suodatuksen vaikutus likimain kaistojen suhteena.

Alipäästösuodattimen kohinaluku

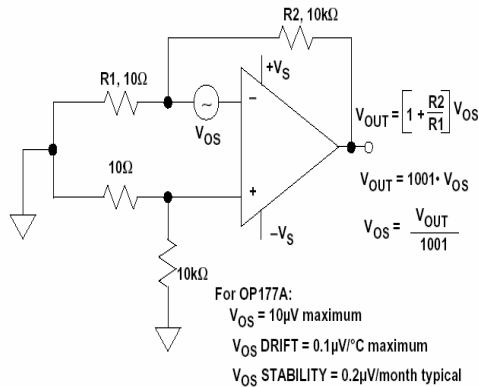


Kuvaan on Simuloitu alipäästösuodattimen kohinalukua R :n funktiona neljällä eri e_n arvolla. $B=1\ \text{MHz}$, $C=1\ \mu\text{F}$.

Havaitaan, että suodatin parantaa SNR :ää. F pienenee vastuksen kasvaessa, koska kaista kapenee. Tietyn raja-arvon jälkeen F ei enää pienene, koska vastuksen lämpökohina alkaa vaikuttaa.

Operaatiovahvistimen offset jännite

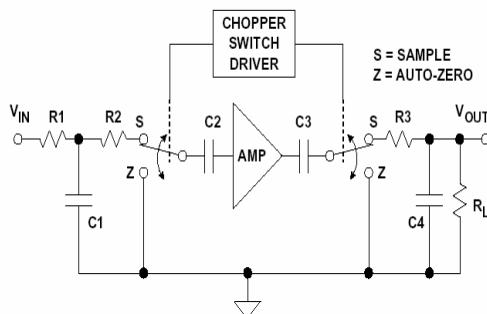
MEASURING INPUT OFFSET VOLTAGE



- Pienten jännitteiden mittaussvahvistimia rajoittaa erityisesti offset-jännitteet ja $1/f$ -kohina
- Offset-jännite U_{OS} luokkaa $10\ \mu\text{V}$ parhaimmillekin vahvistimille
- U_{OS} on lämpötilariippuva ja muuttuu ajan funktiona
- Voidaan vähentää chopper-vahvistimella

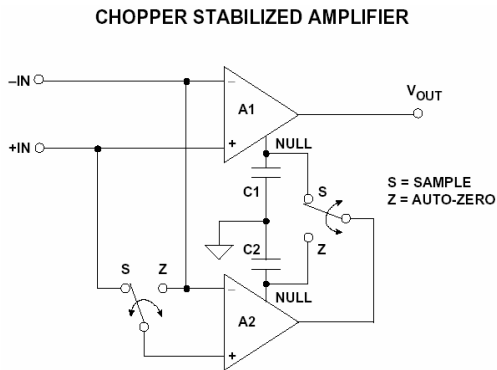
Chopper-vahvistin

CLASSIC CHOPPER AMPLIFIER



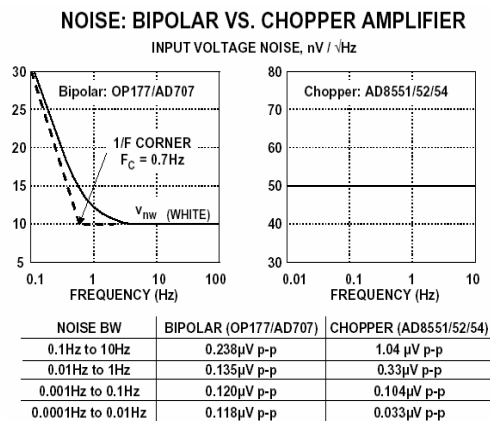
- Kytkimien asennossa Z (zero) kapasitanssit C_2 ja C_3 varautuvat operaatiovahvistimen input- ja output-offset-jännitteisiin
- Kytkimien asennossa S signaali kulkee reittiä R_1, R_2, C_2 , vahvistin, C_3, R_3 ,
- Choppaus-taajuus tyypillisesti luokkaa sadoista hertseistä kilohertzeihin
- R_1 , ja C_1 muodostavat anti-alias suodatuksen (Tarvitaan!)
- C_4 mitoitetaan pitämään ulostulo vakaana nollauksen aikana

Chopper-vahvistin korkeammille taajuuksille



- PeruskytKentä toimiiainoastaan matalilla taajuuksilla
- Viereinen kytkentä toimii korkeammille taajuuksille
- Nollaus-vahvistin A_2 korjaa päävahvistimen A_1 offsetin reaaliajassa nollauspinnan avulla
- Nollausvahvistimen nollaus tehdään kytkimen asennolla Z
- Kapasitanssit C_1 ja C_2 varastoivat nollausjännitteet
- A_1 on jatkuvasti kytkettynä ulostuloon -> ei taajuusrajoitusta laskostumisesta

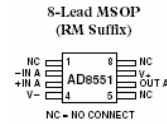
1/f kohina bipolaarisessa ja chopper-vahvistimessa



- Choppaus aiheuttaa vahvistimen ulostuloon laajakaistaista kohinaa
- Suurilla kohinakaistanleveyksillä kohinaominaisuudet voivat olla jopa huonompia kuin ilman choppausta
- Kohinakaistanleveyden pienentäminen (integrointiajan kasvattaminen) kääntää tilanteen chopper-vahvistimen eduksi

Chopper-vahvistin

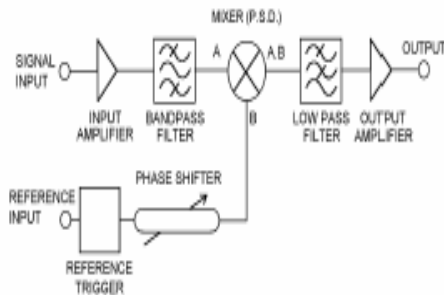
- Integroitu operaatiovahvistin tarkkuusmittauksiin, esim.
 - TC7650 (TelCom Semiconductor Inc.)
 - AD8551/AD8552/AD8554 (Analog Devices Inc.)
- Erittäin pieni offset-jännite
 - Taso $\leq 1 \mu\text{V}$
 - Lämpötilariippuvuus $0.005 - 0.05 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- Käytetään normaalien operaatiovahvistinten tapaan, esim.
 - Lämpötilasensoreissa
 - Painesensoreissa
 - Pienten virtojen tarkkuusmittauksissa
 - Venymäliuska-anturien vahvistimissa



Lock-in vahvistin

- Mittaa AC-signaalia tietyllä (säädettävällä) taajuudella. Ulostulona on DC-jännite, joka on suhteessa AC-signaalin amplitudiin
- Tunteeton muille taajuuskomponenteille
- Vahvistin koostuu neljästä osasta
 - Esivahvistin (differentiaali- ja/tai virtasisäänmeno)
 - Vaihesiirtäjä (referenssisignaali)
 - Sekoittaja (demodulator, mixer, phase-sensitive detector, PSD)
 - Alipäästösuodatin

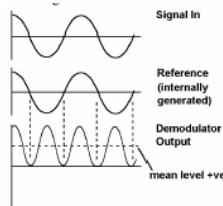
Peruskytkentä



- Alkuperäinen signaali vahvistetaan ja suodatetaan
 - Signaali sekoitetaan referenssisignaaliin sekoittajassa
 - Alipäästösuodattimen jälkeen saatava DC-jännite riippuu vain signaalien välisestä vaihe-erosta ja mitattavan signaalin taajuuskomponentin amplitudista
 - Vaiheensiirtimellä (phase-shifter) maksimoidaan signaali
- ⇒ Erittäin kapeakaistainen, hyvälaatuinen kaistanpäästösuodatin

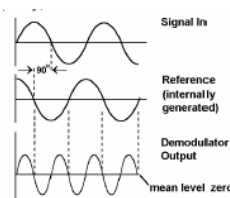
Vaiheherkkä ilmaisu

Signaalit samassa vaiheessa



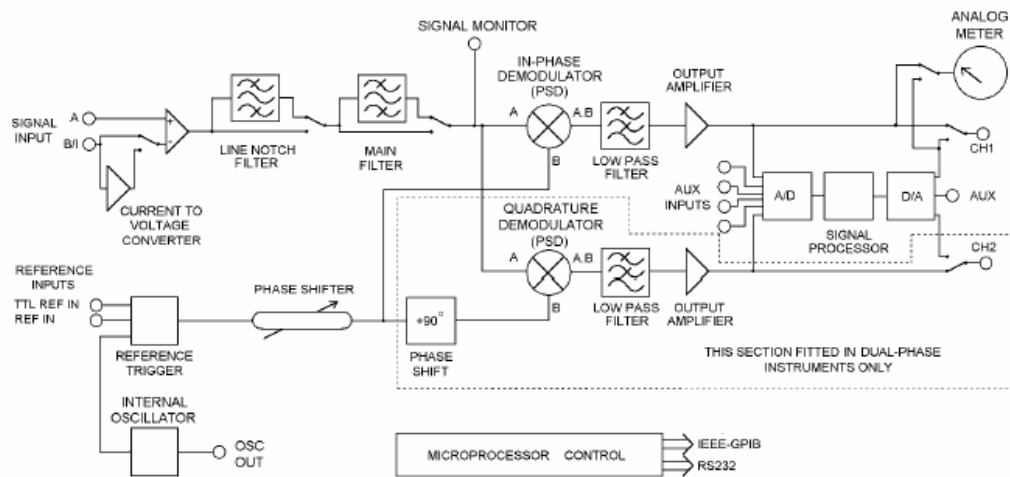
- Mikäli referenssisignaali ja mitattava signaali ovat samassa vaiheessa, saadaan maksimaalinen signaali
- 90 asteen vaihesiirrolla ei saada lainkaan signaalia

90 asteen vaihesiirto

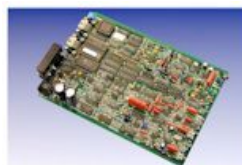


- Signaali maksimoidaan manuaalisesti vaihesiirrolla
- Vektori-lockin-vahvistimessa mitataan kahdella kanavalla (vaihesiirto 90 astetta) ja ilmaistaan kanavien tehollinen summa ja vaihe-ero

Analoginen lock-in vahvistin

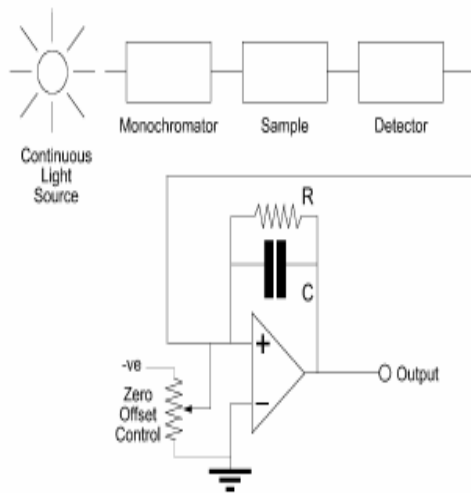


Sovelluksia



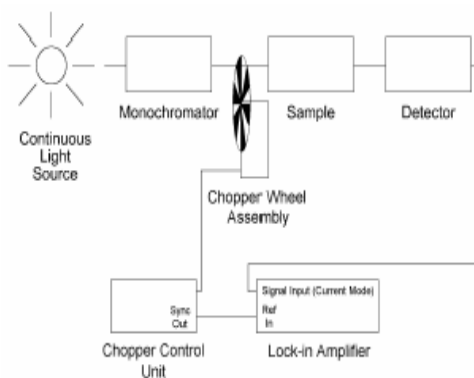
- Sisäisellä oskillaattorilla (referenssisignaali) käytettynä lock-in vahvistin toimii signaalianalysaattorina
- Ulkoiseksi referenssiksi voidaan kytkeä alkuperäinen signaali (esim. laserin modulointitajuus) jonka kulkua vaimentavassa järjestelmässä halutaan tutkia (esim. spektroskopia). Alkuperäisen signaalin jäänteet voidaan kaivaa hyvinkin kohinaisesta ympäristöstä
- Lukuisia käyttökohteita optisissa mittauksissa

Esimerkki: Optisen transmittanssin mittaus



- Valolähteestä suodatetaan kapea aallonpituuskaista monokromaattorin avulla
- Monokromaattorin valo etenee vaimentavan aineen läpi
- Vaimentunut signaali ilmaistaan perinteisin keinoin
- Laitteistolla voi mitata noin 0.001% transmittansseja, minkä jälkeen signaali hukkuu kohinaan ja taustavaloon

Transmittanssin mittaus lock-in vahvistimella



- Katkotaan signaalia katkojalla (chopper)
- Katkojasta saadaan referenssisignaali lock-in vahvistimelle heikon signaalin ilmaisua varten.
- Transmittanssimittauksia voidaan laajentaa noin kolmella dekadilla tasolle 0.000 001%
- Kuvan katkoja ei muuten välttämättä ole optimaalisessa paikassa. Mihin se pitäisi laittaa?

Keskiarvoistus

- DC-signaalien tai toistuvien AC-signaalien SNR :ää voi parantaa keskiarvoistamalla
- Keskiarvoistuksessa signaali summautuu aritmeettisesti, kohina summautuu neliöllisesti
- m kertaa keskiarvoistetulle signaalille

$$SNR_m = \frac{S_1 + S_2 + \dots + S_m}{\sqrt{N_1^2 + N_2^2 + \dots + N_m^2}} = \sqrt{m} SNR_i$$

- SNR paranee siis suhteessa toistokertojen neliöjuureen