Generell støymodell for forsterkere

(Mot Kap.2)

Når en foretar støyanalyser av store systemer vil det være upraktisk å analysere med detaljerte støymodeller for alle mulige støykilder. En velger i stedet å bruke forenklede modeller som representerer flere mulige støykilder.

En populær modell er *En*-*In*-modellen som består av bare to parametere: støyspenningen *En* og støystrømmen *In*.

En-In modellen

Generelt kan støy i en modul representeres av fire støykilder: to på inngangen og to på utgangen. En av de to på inngangen og en av de to på utgangen er støyspenning mens de andre er støystrøm. Med disse støykildene så betraktes resten av modulen som støyfri.

Støyen i forsterkere kan ofte representeres av en støyspenning og støystrøm på inngangen og en kompleks korrelasjonskoeffisient (pluss selve modulen).

Støyspenningen *En* og støystrømmen *In* varierer med frekvens, operasjonspunkt og forsterkerens elementer og arkitektur. Når det gjelder forsterkeren så vil det først og fremst være inngangselementet (vanligvis en transistor) som har størst innflytelse.

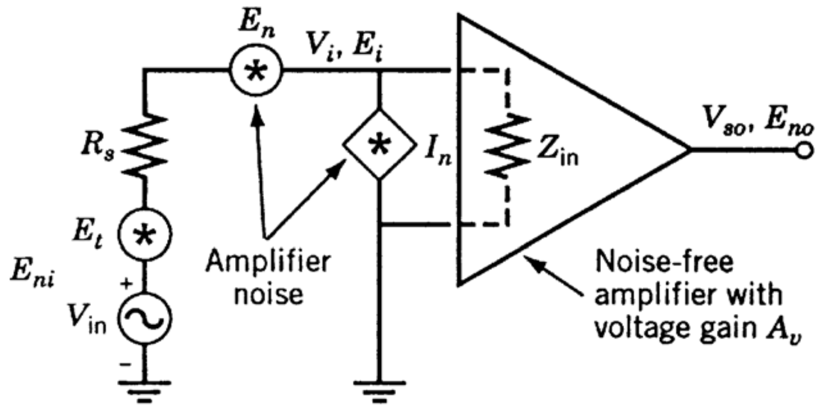

Figure 2-1 Amplifier noise and signal source.

Modellen (slik som på figuren) kan brukes for alle typer forsterkere. (Figuren viser også en signalkilde *Vin*, en støykilde *Et* og en kildemotstand *Rs*. Korrelasjonkoeffisienten er ikke angitt/tegnet.)

Måle støy på utgang eller inngang?

Vanligvis er det på utganger vi måler signalet og også opplever den samlede støyen til systemet. Men av flere grunner kan det under konstruksjon være praktisk å regne støy fremover mot inngang.

- Ved stor forsterkning i forforsterker vil støybidraget fra elektronikken i hovedsak komme fra forforsterkeren. Regnes støy mot inngang behøver en bare regne på et begrenset antall ledd.
- Ofte vil det være interessant å sammenligne med støybidraget fra selve kilden. Det vil f.eks. være lite å hente på å redusere støybidraget fra elektronikken vesentlig under det kilden selv bidrar med.
- Regner vi mot inngangen kan vi gjøre oss uavhengig av forsterkerenes spenningsforsterkning og inngangsimpedans.

Ekvivalent inngangsstøy

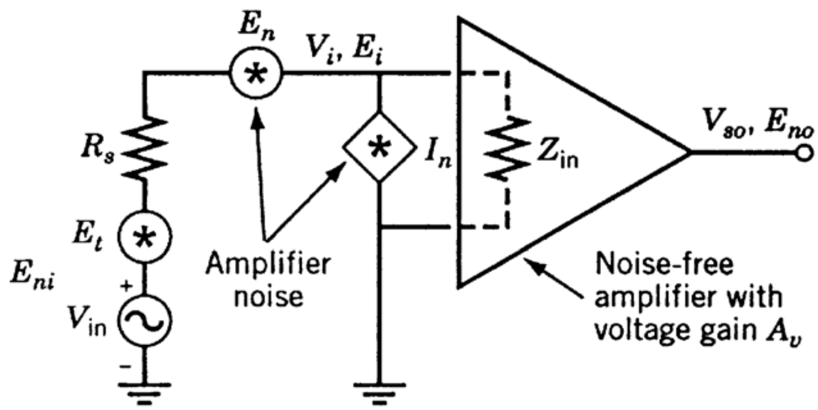

Figure 2-1 Amplifier noise and signal source.

Metode: Vi vil finne en ekvivalent støy E_{ni} som kan erstatte alle tre støykilder (E_t, E_n, og I_n) og plasseres i serie med V_{in}. Vi vil da lett kunne beregne *S/N*-forholdet.

Fremgangsmåte:

1. Først finner vi <u>systems</u> spenningsforsterkning
2. Så finner vi støyen på utgangen
3. Så deler vi utgangsstøyen på systems spenningsforsterkning og får da ekvivalent støy på inngangen.

Systems spenningsforsterkning:

$$K_t = V_{SO} / V_{in}$$

K_t : systems spenningsforsterkning, V_{so} : Signalspenning utgang, V_{in} : Signalspenning kilde (Ikke inngang på forsterker !!)

$$V_{SO} = \left| \frac{A_v V_{in} Z_{in}}{R_S + Z_{in}} \right|$$

Av : Spenningsforsterkning i forsterker, (Signalspenning på forsterkerinngang er: $V_{in}\, Z_{in}/(R_S + Z_{in})$.)

Setter inn det siste uttrykket inn i det nest siste og får:

$$K_t = \left| \frac{A_v Z_{in}}{R_S + Z_{in}} \right|$$

Støy på utgang:

(Bruker rms beregning).

$$E_{no}^2 = A_v^2 E_i^2$$

E_{no} : Støy på utgang, E_i : Støy på inngang av forsterker.

$$E_i^2 = \left(E_t^2 + E_n^2\right)\left|\frac{Z_{in}}{Z_{in} + R_S}\right|^2 + I_n^2 \left|Z_{in} \| R_s\right|^2$$

Støyen på forsterkerinngangen er her uttrykt ved de tre støykildene. NB: Det siste kvadratet er kvadratet av Z_{in} og R_s i parallell.

Setter vi siste uttrykk inn i det nest siste så får vi:

$$E_{no}^2 = \left(E_n^2 + E_t^2\right)\left|A_v\right|^2 \left|\frac{Z_{in}}{Z_{in} + R_s}\right|^2 + I_n^2 \left|A_v\right|^2 \left|Z_{in} \parallel R_s\right|^2$$

Ekvivalent inngangsstøy.

Ut fra uttrykkene for E_{no} og K_t så finner vi E_{ni} :

$$E_{ni}^2 = \frac{E_{no}^2}{K_t^2} = E_t^2 + E_n^2 + I_n^2 R_s^2$$

Dette er et viktig uttrykk !!

E_{ni} plasseres ved (i serie) med *Vin*.

E_{ni} erstatter alle støykildene.

Uttrykket er uavhengig av *Av* og *Zin* !!

Men forsterkerens *In* og *En* er kanskje ikke helt uavhengige av hverandre. Har de en viss korrelasjon så må vi utvide uttrykket slik at vi får.

$$E_{ni}^2 = E_t^2 + E_n^2 + I_n^2 R_s^2 + 2CE_n I_n R_s$$

Måling av *In* og *En*.

En annen årsak til *In* og *En* modellens popularitet er at det er enkelt å finne størrelsene ved måling:

$$E_{ni}^2 = \frac{E_{no}^2}{K_t^2} = E_t^2 + E_n^2 + I_n^2 R_s^2$$

- *Et* : Finnes ved utregning:

$$E_t = \sqrt{4kTR_S \Delta f}$$

- E_n : Finnes ved å la R_s gå mot null. (E_t regner vi ut og virkningen av I_n vil gå mot null.)
  - I_n : Finnes til slutt ved å la R_s gå mot uendelig.

Eksempler på inngangsstøy:

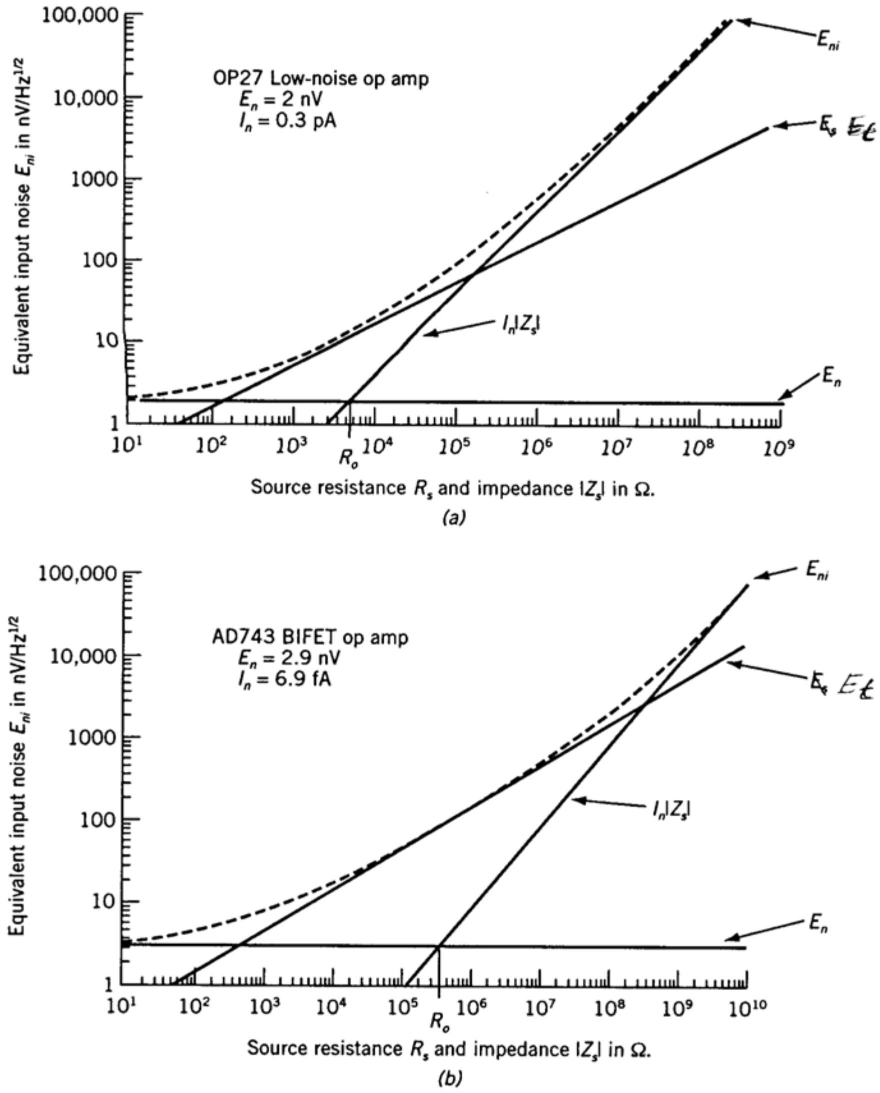

Figure 2-2 Plots of E_{ni} versus R_s.

NB ! *Es* i figuren er hva vi har kalt *Et* i det foregående.

(NB! Kurvene er frekvensavhengige.)

Støytall (NF) og Signal-til-Støy forhold (SNR)

IEEE-standardene:

The noise factor of a two-port device is the ratio of the available output noise power per unit bandwidth to the portion of that noise caused by the actual source connected to the input terminals of the device, measured at the standard temperature of 290°K.

Eller:

$$F = \frac{S_i / N_i}{S_o / N_o} = \frac{N_o / S_o}{N_i / S_i} = \frac{N_o / N_i}{S_o / S_i}$$

Hvor *F* er støyfaktoren.
Hvis elementet ikke bidrar med noe støy så vil:

$$N_o / N_i = S_o / S_i = A$$

D.v.s. forholdet mellom støy på utgang og inngang vil være lik forholdet mellom signal på utgang og inngang. Her er *A* forsterkningen til elementet. Når så er tilfelle vil *F* være lik *1*. Bidrar elementet med støy vil *F* være større enn *1*.

Støytall

Støy<u>faktoren</u> kan uttrykkes i decibel og kalles da støy<u>tall</u> (Engelsk: *NF* : Noise Figure).

$$NF = 10 \log F$$

Når støytillegget er minimum (d.v.s. 0) så er *F=1* og *NF=0dB.*

Eksempel:
For støymodellen vi gikk i gjennom tidligere så kan vi sette opp støytallet som følger:

$$NF = 10 \log \frac{E_{ni}^2}{E_t^2} = 10 \log \frac{E_t^2 + E_n^2 + I_n^2 R_s^2}{E_t^2}$$

Hva har vi gjort her ? I telleren har vi støyen på utgangen regnet tilbake til inngangen.d.v.s. støyen på utgang delt på systemforsterkning. Systemforsterkningen er *So/Si*. D.v.s. at telleren består av *No/(So/Si)* mens nevneren består av *Ni*.

(Bemerk at vi har 10 foran log-funksjonen d.v.s. effekt: $P=V^2/R$. Spenningen er kvadratisk d.v.s. OK. Men motstanden ? For å kunne eliminere motstanden må det være samme motstand for uttrykket i teller som i nevner.)

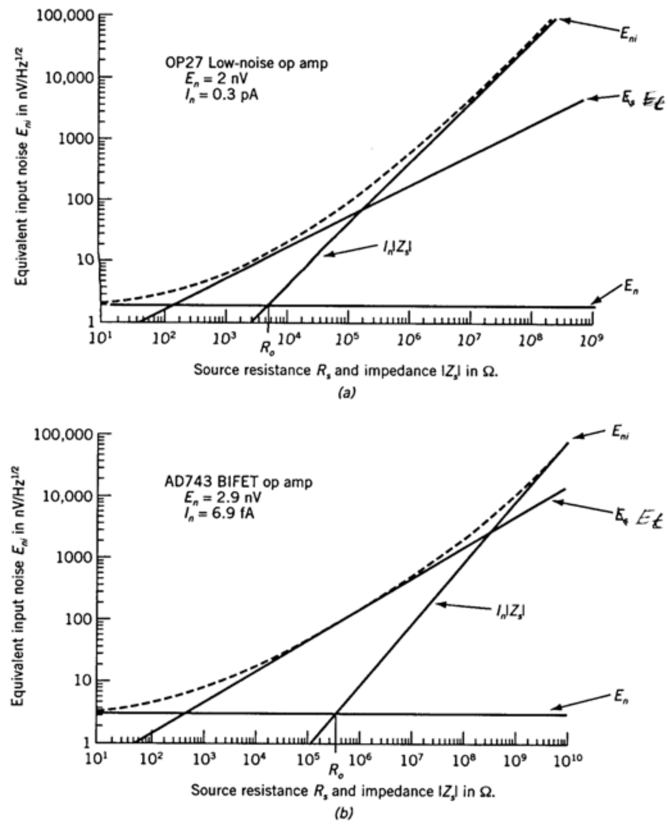

Figure 2-2 Plots of E_{ni} versus R_s.

Støytallet er forholdet mellom den stiplede kurven og inngangstøyspenningen *Et*. Forholdet vil være størst for liten *Rs*, nærmest *1* på midten, og noe i mellom for store *Rs*.
Støytallet er nærmest *1* når *En=In Rs*. D.v.s. elektronikkes bidrag er minst her relativt til inngangsstøyen.

Men det er også verdt å merke seg at minimum totalstøy oppnås med minimum inngangsmotstand. Men det kommer andre krav inn som setter en begrensning på den muligheten…

Definisjonen av *NF* som angitt over baserer seg på en temperatur på 290ºK≈17ºC. Når denne definisjonen brukes på sensorer som er kjølet ned så kan en få negative verdier på *NF*.

”Spot Noise Factor” er støyfaktoren som en funksjon av frekvens. Som oftest angir den støyen i en båndbredde på 1Hz. F_o brukes gjerne som en betegnelse for 1Hz bredde rundt 1000Hz. Ellers så brukes *F(f)* for å angi en variabel frekvens (men fortsatt med 1Hz bredde).

Støyfaktoren er først og fremst nyttig for å sammenligne forsterkere. For å optimaliser for minimum støy så kan den være direkte missvisende. F.eks. kan en økning av R_s gi mindre støyfaktor mens i virkelighet øker både bidraget fra forsterker og kilde. For minimalisering av støy er E_{ni} og S_o/N_o bedre egnet som mål.

Optimal kildemotstand.

Når kurven for ekvivalent inngangsstøy er nærmest kurven for den termiske støyen så er støytallet minst og det relative bidraget fra elektronikken minst. Motstanden ved dette punktet kalles *Ropt* eller *Ro*. Vi har da:

$$R_o = E_n / I_n \qquad where \qquad E_n = I_n R_s$$

Støyfaktoren ved denne motstanden kan vi kalle *Fopt*. Den kan uttrykkes som:

$$F_{opt} = 1 + \left(E_n I_n / 2kT\Delta f \right)$$

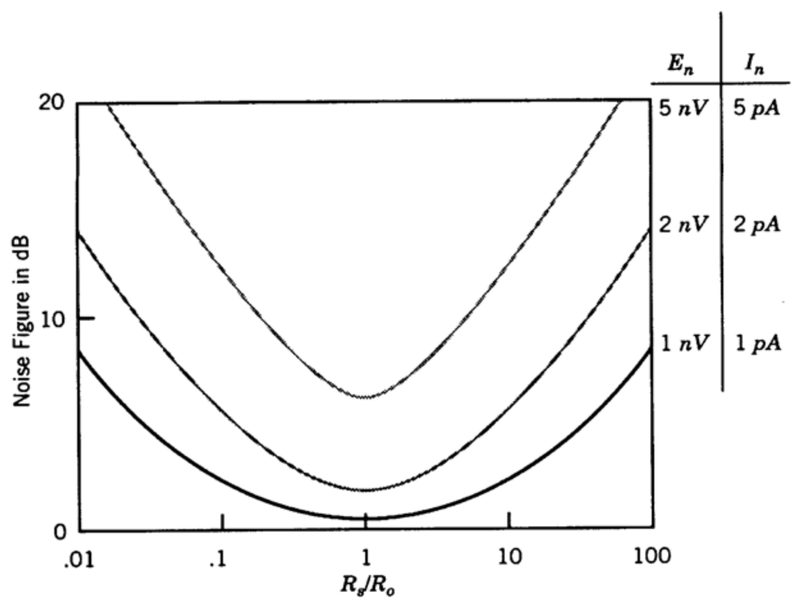

Figure 2-3 Noise figure versus source resistance.

Det er ikke bare viktig hvor lavt støytall en kan oppnå men også hvordan støytallet forandrer seg med variasjoner i *Rs*.

Støymotstand og støytemperatur

Noen ganger snakker en om en teoretisk støymotstand som representerer all støyen i en modul. Størrelsen på støyen blir modelert enten ved motstandens

- ohmske størrelse eller ved
- motstandens temperatur.

Utregning motstand:

$$4kTR_n\Delta f = E_n^2 + I_n^2 R_s^2$$

og

$$R_n = \left(E_n^2 + I_n^2 R_s^2\right) / 4kT\Delta f$$

Utregning temperatur:

$$4kT_s R_s \Delta f = E_n^2 + I_n^2 R_s^2$$

og

$$T_s = \left(E_n^2 + I_n^2 R_s^2\right) / 4kR_s \Delta f$$

Støy i kaskadekoblede nettverk

Vi vil se på hvordan en kan identifisere de viktige støybidragsyterene i systemet. For å gjøre det deler vi systemet opp i moduler og identifiserer bidraget fra de forskjellige modulene.

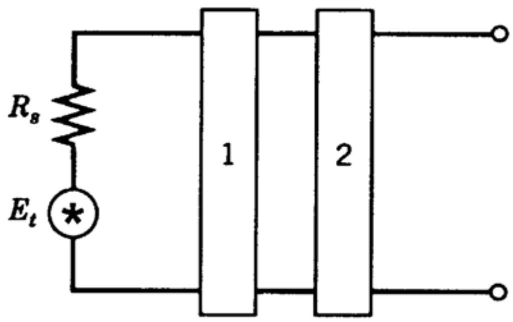

Figure 2-4 Cascaded networks.

Repetisjon (Eq. 1-5) kilde støy:

$$N_t = kT\Delta f$$

$$N_t = \frac{E_0^2}{R_L} = \frac{(E_t/2)^2}{R_L} = \frac{E_t^2}{4R_S} = kT\Delta f$$

Repetisjon definisjon støyfaktor:

$$F = \frac{N_o/S_o}{N_i/S_i} = \frac{N_o/(S_i G)}{N_i/S_i} = \frac{N_o}{GkT\Delta f}$$

$$\Rightarrow N_o = FGkT\Delta f$$

Utgang trinn *1*:

$$N_{i2} = N_{o1} = F_1 G_1 kT\Delta f$$

Støyen over er summen av kildestøyen og bidraget fra første trinn.

Utgang generelt trinn *j* *(j≠1)*:

$$F_j = N'_{oj} \big/ G_j \, kT\Delta f$$

Her er $kT\Delta f$ støy i en hypotetisk inngangslast for trinn *j*. Støyen N'_{oj} er den støyen vi ville hatt på utgangen hvis inngangsstøyen bare var denne hypotetiske inngangsstøyen.

Bidraget fra trinn *j* alene kan beregnes som følger:

$$N'_{oj} - G_j kT\Delta f = F_j G_j kT\Delta f - G_j kT\Delta f = (F_j - 1) G_j kT\Delta f$$

Subtrahenden er den hypotetiske inngangslasten alene slik den vil være på utgangen.

Utgang trinn 2:

Vi setter opp et uttrykk for totalstøyen på utgangen av trinn 2:

$$N_{o\_Total} = G_2\left(F_1 G_1 kT\Delta f\right) + \left(F_2 - 1\right)G_2 kT\Delta f = \left(G_2 G_1 F_1 + G_2 F_2 - G_2\right)kT\Delta f$$

Første ledd er støy i trinn 1 og støy i kilde, andre ledd er bidraget fra trinn 2.

Men vi kan også sette opp et uttrykk for hele slik:

$$F_{12} = \frac{N_{O\_Total}}{G_1 G_2 kT\Delta f} = \frac{\left(F_1 G_2 G_1 + F_2 G_2 - G_2\right)kT\Delta f}{G_2 G_1 kT\Delta f} = F_1 + \frac{\left(F_2 - 1\right)}{G_1}$$

Her har vi etter hvert satt inn nevneren uttrykket for totalstøyen vi fant over.

Utgang trinn 3:

$$N_{O\_Total} = G_3 G_2\left(F_1 G_1 kT\Delta f\right) + G_3\left(F_2 - 1\right)G_2 kT\Delta f + \left(F_3 - 1\right)G_3 kT\Delta f$$
$$= \left(G_3 G_2 G_1 F_1 + G_3 G_2 F_2 - G_3 G_2 + G_3 F_3 - G_3\right)kT\Delta f$$

Vi setter uttrykket for totalstøyen inn i følgende uttrykk til venstre og får resultatet til høyre:

$$F_{123} = \frac{N_{O\_Total}}{G_3 G_2 G_1 kT\Delta f} = F_1 + \frac{\left(F_2 - 1\right)}{G_1} + \frac{\left(F_3 - 1\right)}{G_2 G_1}$$

Generelt:

$$F_{1\ldots j} = F_1 + \frac{\left(F_2 - 1\right)}{G_1} + \ldots\ldots + \frac{\left(F_j - 1\right)}{G_1 G_2 \cdots G_{j-1}}$$