Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

Takaisinkytketty vahvistin I

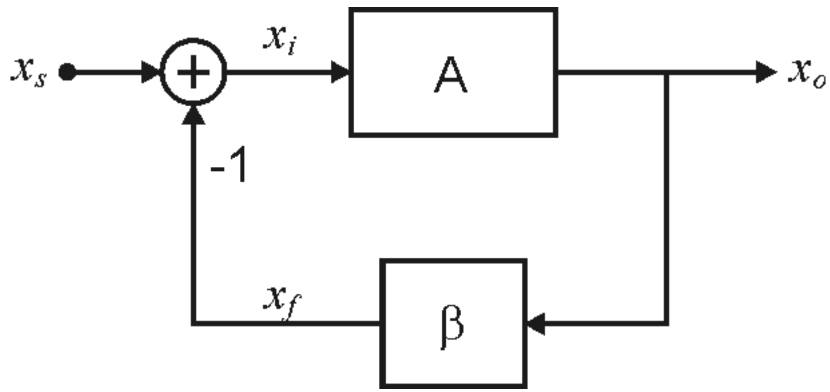
ELEC-C3230 Elektroniikka I (Ryynänen Kosunen)

Luennon pääkohdat

- **Takaisinkytkennän periaate**
  - Peruskäsitteitä ja termejä.
- **Takaisinkytkennän vaikutus:**
  - Vahvistukseen.
  - Vahvistukseen vakauteen.
  - Ylärajataajuuteen.
  - Kohinaan.
  - Lineaarisuuteen.
- **Neljä takaisinkytkentälajia**
  - Muutamia esimerkkejä

Takaisinkytketty vahvistin

- **Lohko A esittää vahvistinta, jonka avoimen silmukan vahvistus on A.**
  - Kuva on signaalivuokaavio, joten vahvistintyypillä ei ole väliä.
- **Lähtösignaali on** $x_o = Ax_i$
- **Lohko β esittää takaisinkytkentäverkkoa.**
  - β on takaisinkytkentäkerroin.
- **Takaisinkytkentäsignaali on** $x_f = \beta x_o$



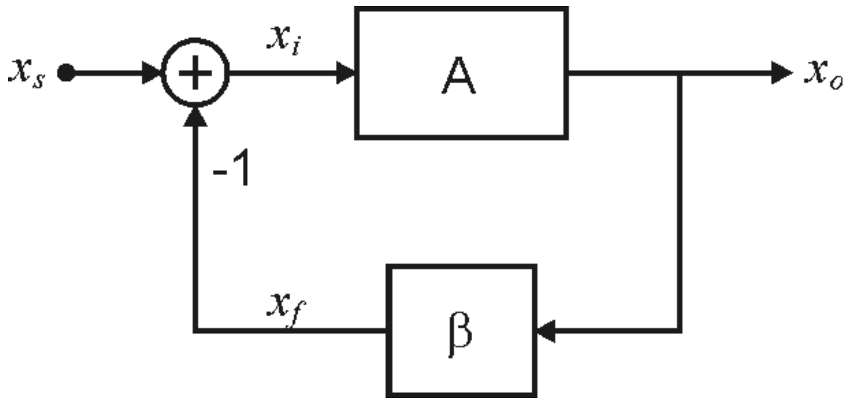
Takaisinkytkennän tyyppi

- **Takaisinkytkentä voi olla joko positiivinen tai negatiiivinen.**
  - Negatiivinen takaisinkytkentä on paljon tavallisempi.
  - Stabiilius rajoittaa positiivisen takaisinkytkennän käyttöä.
  - Yleensä β on passiivikomponenteista koostuva verkko.

β>0: Negatiivinen takaisinkytkentä

β<0: Positiivinen takaisinkytkentä

Tässä oletetaan A>0. Näin ei aina ole.



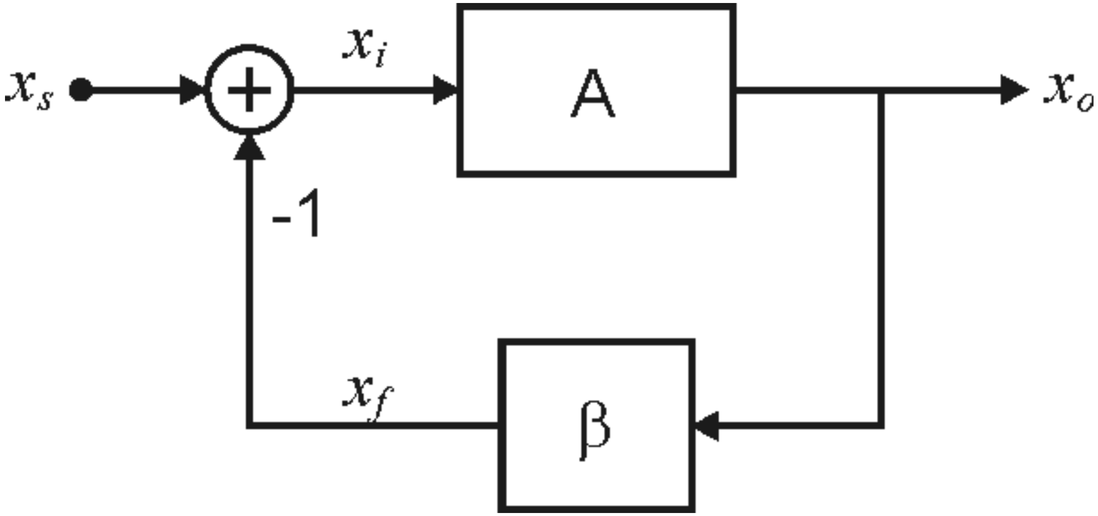
Suljetun silmukan vahvistus

- **Ratkaistaan suljetun silmukan vahvistus $A_f=x_o/x_s$:**

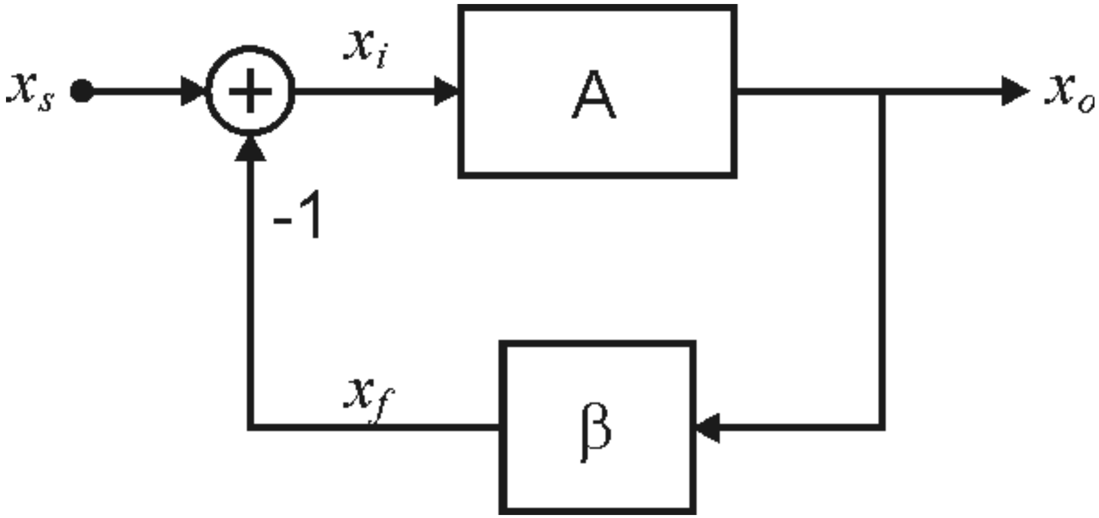
$$x_o = Ax_i = A\left(x_s - x_f\right) = A\left(x_s - \beta x_o\right)$$

$$\Rightarrow (1+\beta A)x_o = Ax_s$$

$$\boxed{\Rightarrow A_f = \frac{A}{1+\beta A}}$$



Suljetun silmukan vahvistus



$$A_f = \frac{A}{1+\beta A} \approx \frac{1}{\beta}$$

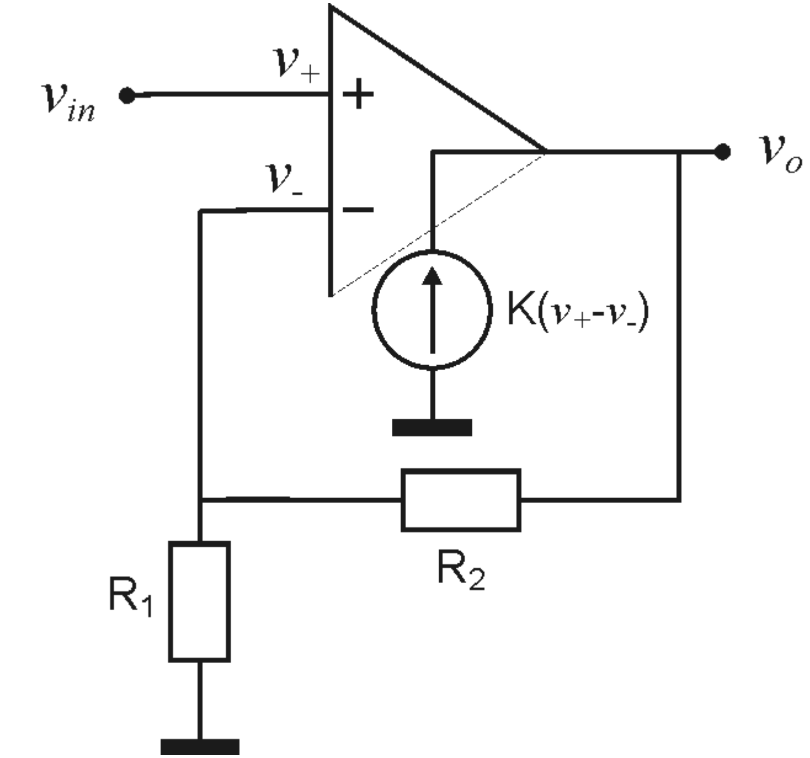
βA on silmukkavahvistus.

Jos βA>>1 on suljetun silmukan vahvistus A_f~1/ β.

Jos A_f>1 täytyy olla β<1, eli takaisinkytkentäverkko vaimentaa.

Jos silmukkavahvistus on suuri, A_f ei riipu itse vahvistimesta vaan takaisinkytkentäverkosta.

Esimerkki 1



Lasketaan oheisen operaatio-vahvistinkytkennän vahvistus takaisinkytkentäteorian avulla.

x_i=v_+-v_-, joten

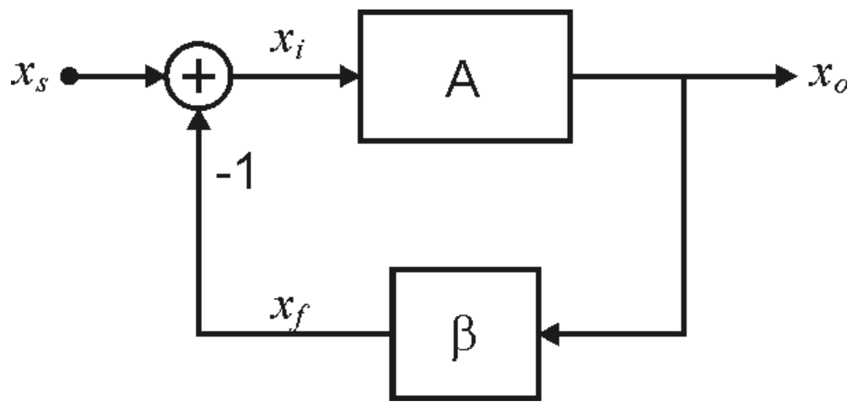
$$A = K$$

v_-=R_1/(R_1+R_2)v_o, joten

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$A_f = \frac{K}{1 + \frac{KR_1}{R_1 + R_2}} = \frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{R_1}{R_1 + R_2}}$$

$$A_f \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



A_f:n herkkyys A:n suhteen

- **Y:n herkyys X:n suhteen määritellään**
- **Derivoidaan A_f A:n suhteen:**

$$S_X^Y = \frac{dY/Y}{dX/X}$$

$$\frac{dA_f}{dA} = \frac{1}{1+\beta A} - \frac{\beta A}{(1+\beta A)^2} = \frac{1}{(1+\beta A)^2} \qquad \Rightarrow dA_f = \frac{dA}{(1+\beta A)^2}$$

- **Jaetaan A_f:n lausekkeella:**

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{dA}{(1+\beta A)^2} \cdot \frac{1+\beta A}{A}$$

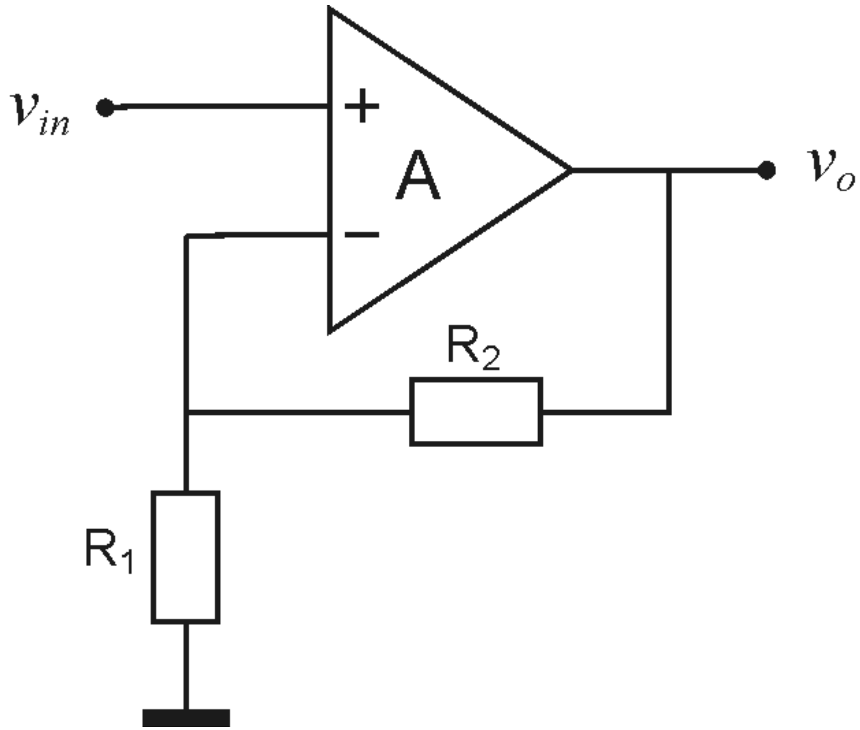
$$\boxed{\Rightarrow S_A^{A_f} = \frac{dA_f}{A_f} \cdot \frac{A}{dA} = \frac{1}{1+\beta A}}$$

$1+\beta A$:ta kutsutaan <u>paluuerotukseksi</u>. Monet takaisinkytketyn vahvistimen ominaisuuksista riippuvat sen suuruudesta.

Esimerkki 2

- **Operaatiovahvistimen nimellinen vahvistus A on 70dB. Tiedetään kuitenkin, että se vaihtelee ±3dB:ä.**
- **Miten paljon suljetun silmukan vahvistus A_f vaihtelee 20dB:n nimellisarvostaan?**

Lasketaan A_f:n herkkyys A:n suhteen:



$$A_f = \frac{A}{1+\beta A} \quad \Rightarrow \frac{A_f}{A} = \frac{1}{1+\beta A}$$

$$S_A^{A_f} = \frac{A_f}{A} = \frac{10^{20dB/20}}{10^{70dB/20}} \approx 0.0032$$

Esimerkki 2 jatkuu

Lasketaan A_f:n suhteellinen vaihtelu eri tapauksissa:

+3dB:

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{10^{73dB/20} - 10^{70dB/20}}{10^{70dB/20}} = 0.41 \qquad \frac{\Delta A_f}{A_f} = 0.0032 \cdot 0.41 = 1.3 \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta A_f[dB] = 20\lg(1.0013) = \underline{0.01dB}$$

-3dB:

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{10^{67dB/20} - 10^{70dB/20}}{10^{70dB/20}} = -0.29 \quad \frac{\Delta A_f}{A_f} = 0.0032 \cdot -0.29 = -0.9 \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta A_f[dB] = 20\lg(0.9991) = \underline{-0.008dB}$$

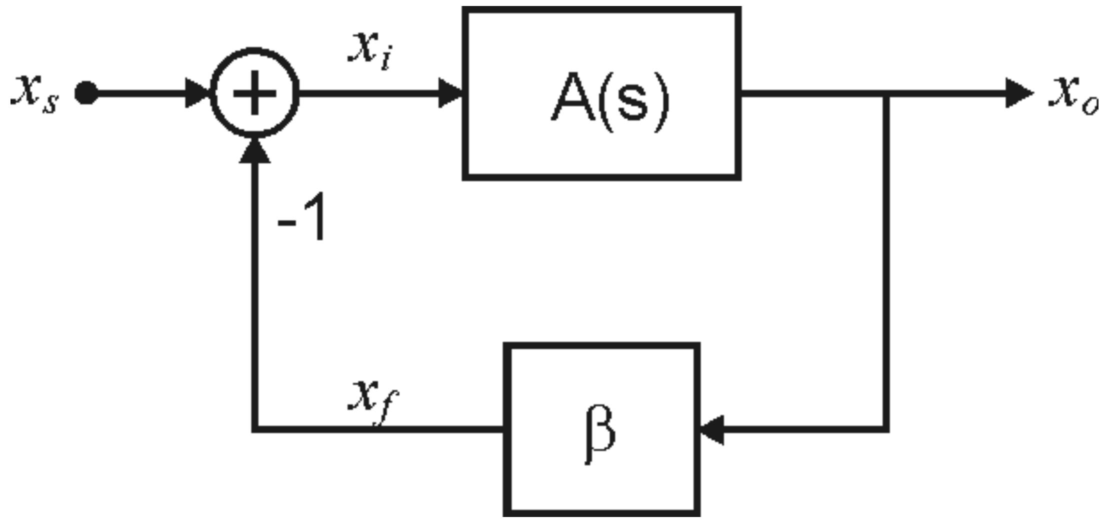
Suljetun silmukan vahvistuksen ylärajataajuus

Lasketaan A_f, kun avoimen silmukan vahvistuksessa on yksi napa:

$$A(s) = \frac{K}{1+s/\omega_H} \qquad A_f(s) = \frac{K}{1+s/\omega_H}\frac{1}{1+\beta\dfrac{K}{1+s/\omega_H}}$$

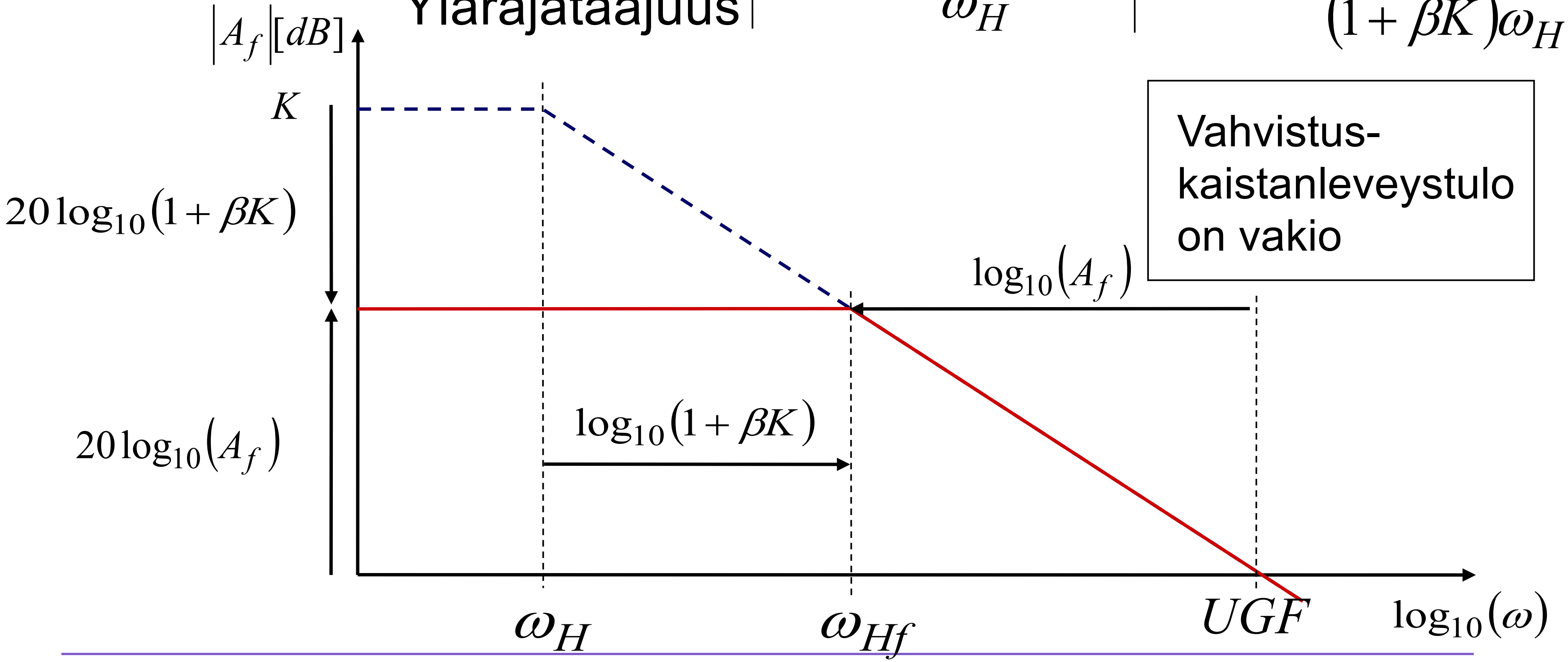
$$\Rightarrow A_f(s) = \frac{K/(1+\beta K)}{1+\dfrac{s}{(1+\beta K)\omega_H}}$$

$$\boxed{\omega_{Hf} = (1+\beta K)\omega_H}$$



Af(s):n ylärajataajuuden graafinen tulkinta

	Avoin silmukka	Suljettu silmukka
DC-vahvistus	K	$K/(1+\beta K)$
Ylärajataajuus	ω_H	$(1+\beta K)\omega_H$



Esimerkki 3

- **LM124 operaatiovahvistimen taajuusvaste on oheisessa kuvassa lämpötila-alueen ääripäissä.**
- **Kuvasta katsottuna UGF vaihtelee välillä 0.45...1.25MHz.**
- **Mitä saadaan ylärajataajuudeksi, kun Af=30dB?**

Ylärajataajuus on juuri A_f:n verran UGF:n alapuolella:

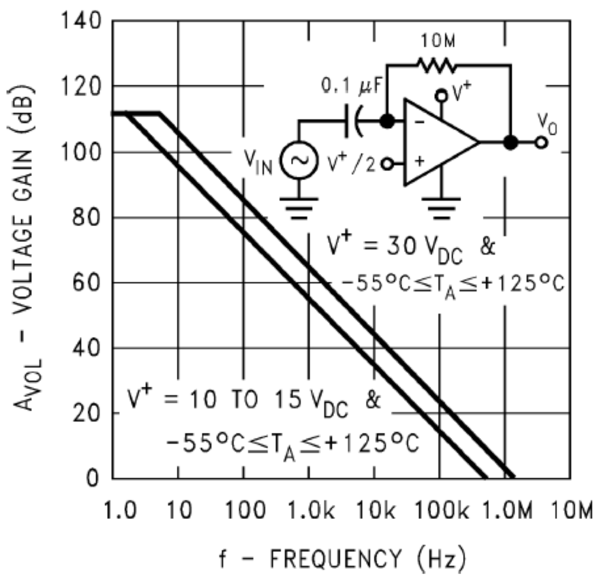
$$10^{-30dB/20} \approx 0.03$$

$$f_H = 0.45MHz \cdot 0.03 \ldots 1.25MHz \cdot 0.03$$

$$f_H = \underline{13.5kHz \ldots 37.5kHz}$$

Laskussa ei tarvitse tietää DC-vahvistusta tai dominoivan navan taajuutta.

Open Loop Frequency Response



Takaisinkytkennän vaikutus kohinaan

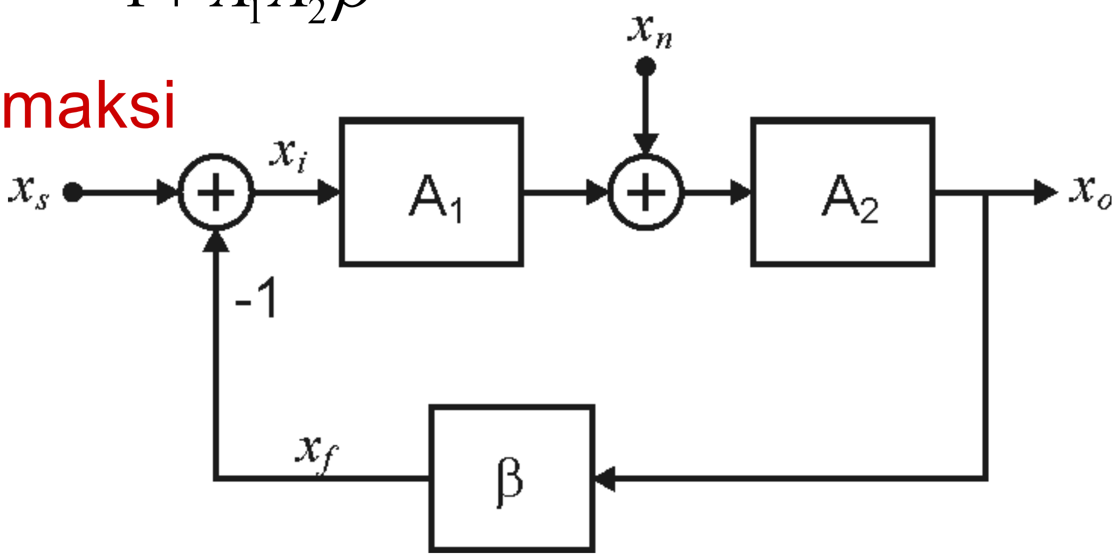
- **Tutkitaan systeemiä, jossa on kaksi vahvistinlohkoa.**
- **Toisen asteen tuloon kytketään ”häiriö” x_n.**

$$x_o = A_2(x_n + A_1 x_i) = A_2\left[x_n + A_1(-\beta x_o)\right]$$

$$(1 + A_1 A_2 \beta)x_o = A_2 x_n \Rightarrow x_o = \frac{A_2}{1 + A_1 A_2 \beta} x_n$$

x_s ei tässä ole heräte, joten se on nolla.

x_n tulee A_1:n vaimentamaksi verrattuna x_s:än

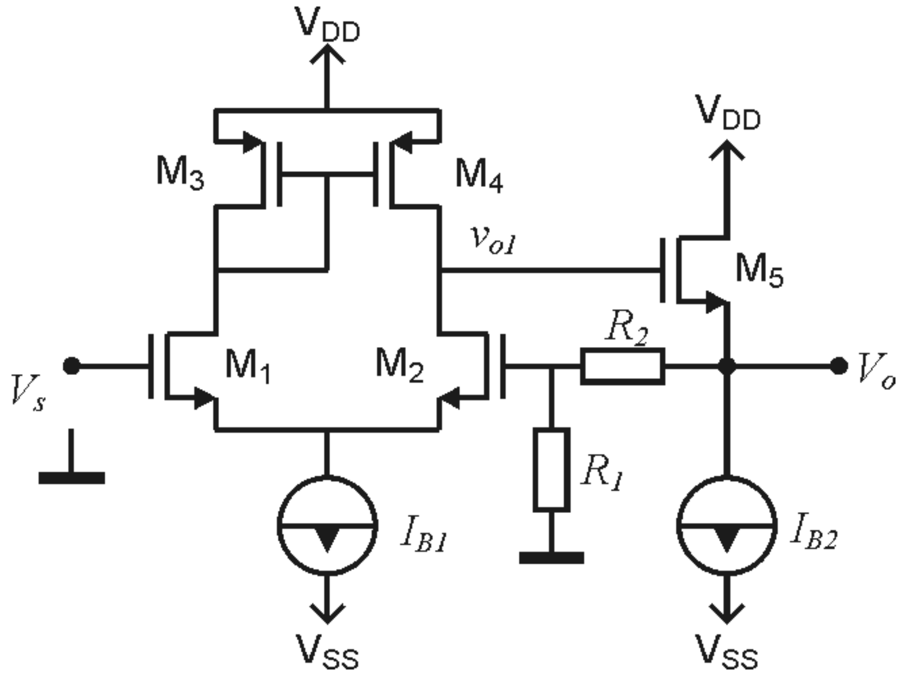


Sama tuloon redusoituna:

$$x_{ni} = \frac{x_n}{A_1}$$

Esimerkki 4

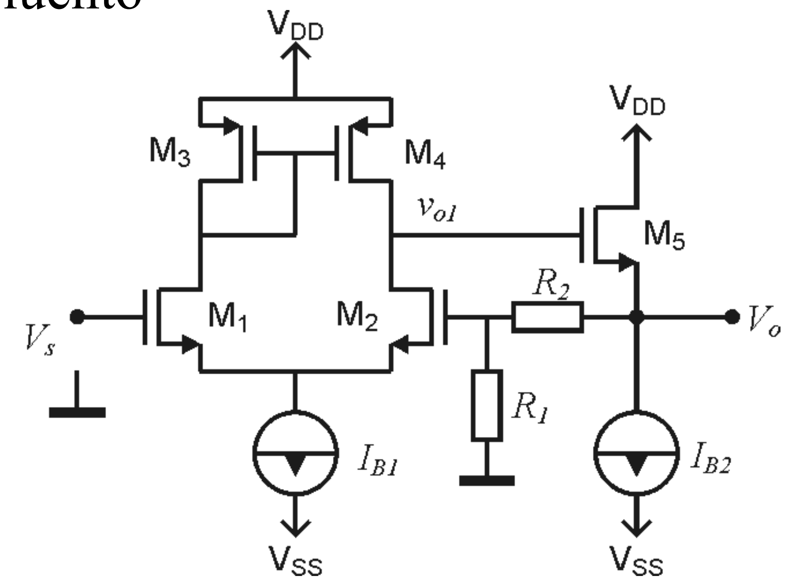
- Kuvan vahvistimessa M_5:n muodostama CD-asteella on huomattava siirrosjännite. Lasketaan sen vaikutus tulossa ja lähtöön redusoituna, kun $M_{1\text{-}4}$:n $k_n'W/L=0.25mA/V^2$,M_5:n $k_n'W/L=2.5mA/V^2$, $\lambda_n= \lambda_p=0.01V^{-1}$, $I_{B1}=0.2mA$ ja $I_{B2}=1mA$.
- $R_1/(R_1+R_2)\sim0.5$, jos vastukset ovat paljon suurempia kuin $1/g_{m5}$.
- Lasketaan CD-asteen offset:



$$V_{GS5}=\sqrt{\frac{2LI_{B2}}{k_n'W}}+V_t\approx\underline{1.89V}$$

Esimerkki 4 jatkuu

kts. Ele 1 viimeinen luento



- **Lasketaan lohkojen arvot:**

$$A_1 = \frac{g_{m1|2}}{g_{ds2} + g_{ds4}} = 110$$

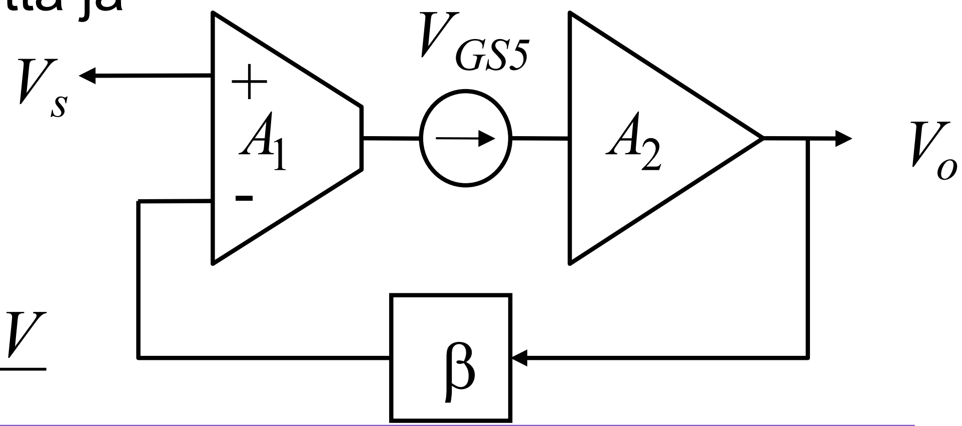
$$V_{GS5i} = \frac{V_{GS5}}{110} = \underline{17mV}$$

$$A_2 \approx 1$$

R_1 ja R_2 vaimentavat lähtöjännitettä ja kytkevät sen takaisin tuloon:

$$\beta = R_1/(R_1 + R_2) = 0.5$$

$$V_{GS5o} = \frac{A_1 A_2}{1 + A_1 A_2 \beta} 17mV = \underline{34mV}$$



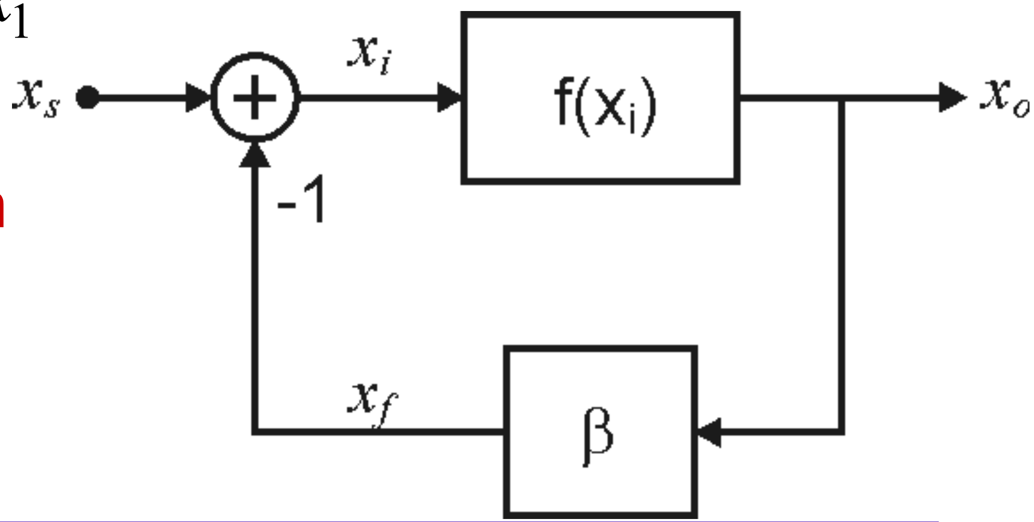
Epälineaarinen vahvistin takaisinkytkennässä

- **Negatiivisella takaisinkytkennällä on myös vahvistimia linearisoiva vaikutus.**
- **Tämä on helppo nähdä ajattelemalla vahvistimen näkemää tulosignaalia x_i takaisinkytkennässä:**

$$x_i \approx x_s - \beta k_1 x_i \Rightarrow x_i = \frac{x_s}{1+\beta k_1}$$

$$f(x_i) = k_1 x_i + k_2 x_i^2 \ldots$$

Vahvistimen näkemä tulosignaali pienenee, jolloin se toimii lineaarisemmin.



2:n asteen epälineaarinen vahvistin

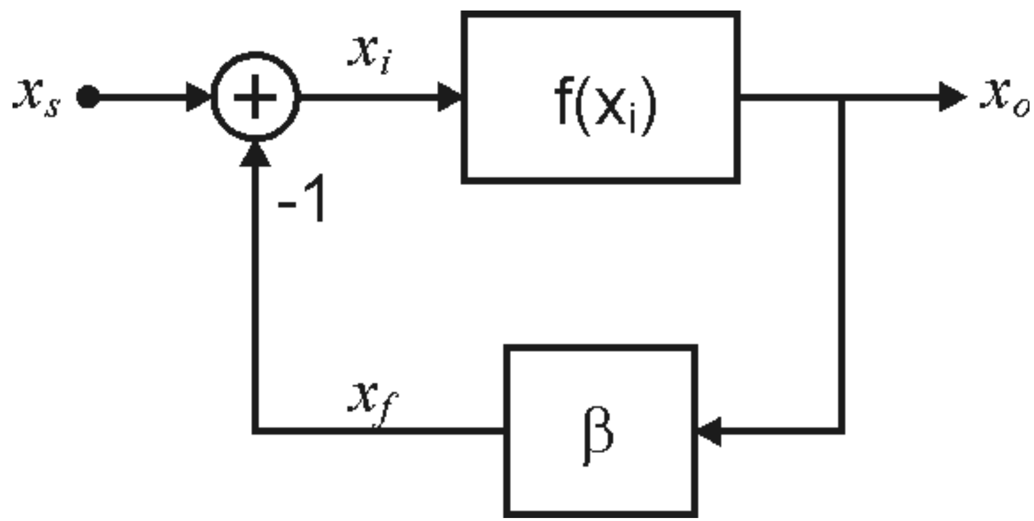
- **Tarkastellaan vahvistinta, jota voidaan esittää toisen asteen polynomilla ja lasketaan epälineaarisuuden aiheuttama harmoninen särökomponentti lähdössä**

Oletetaan aluksi, että lähdössä näkyvä särö on mitätöntä.

Vahvistimen tulosignaaliksi saadaan likimain:

$$f(x_i) = k_1 x_i + k_2 x_i^2$$

$$x_i \approx x_s - \beta k_1 x_i \Rightarrow x_i \approx \frac{x_s}{1+\beta k_1}$$



Jos x_s on sinimuotoinen syntyy vahvistimessa toinen harmoninen komponentti:

$$\hat{x}_2 = \frac{k_2}{2}\hat{x}_i^2 = \frac{k_2}{2}\frac{\hat{x}_s^2}{(1+\beta k_1)^2}$$

½ tulee sinin neliöimisestä (käsiteltiin luennolla 1)

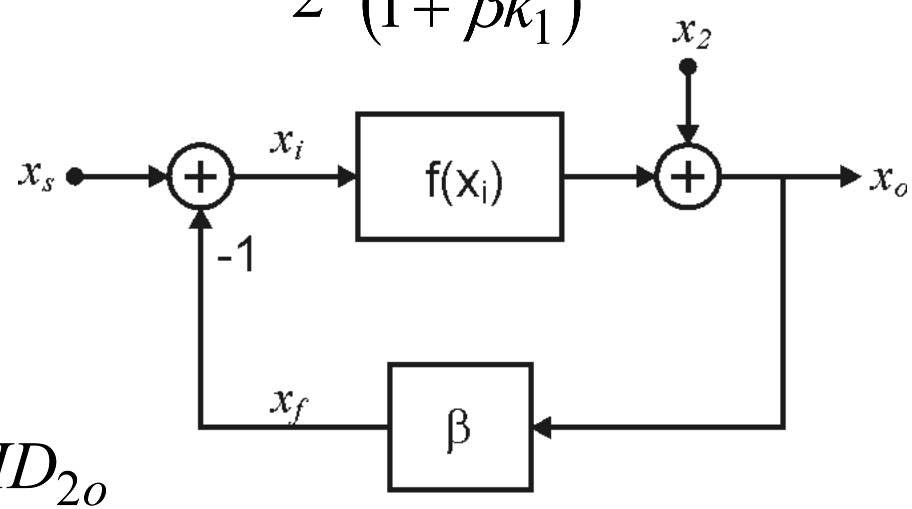
2:n asteen epälineaarinen vahvistin

- **Toinen harmoninen komponentti ei näy lähdössä sellaisenaan, koska takaisinkytkentä vaimentaa sitä.**
- **Lisätään x_2 vahvistimen lähtöön ja lasketaan sen suuruus ulostulossa.**

$$x_o \approx k_1\left(x_s - \beta x_o\right) + x_2$$

$$\hat{x}_2 = \frac{k_2}{2}\frac{\hat{x}_s^2}{\left(1+\beta k_1\right)^2}$$

$$\left(1+\beta k_1\right)x_o \approx k_1 x_s + x_2$$



$$x_o \approx \underbrace{\frac{k_1}{1+\beta k_1}x_s}_{x_{o1}} + \underbrace{\frac{x_2}{1+\beta k_1}}_{x_{o2}}$$

$$HD_{2f} = \frac{\hat{x}_{o2}}{\hat{x}_{o1}} = \frac{k_2}{2k_1}\frac{\hat{x}_s}{\left(1+\beta k_1\right)^2} = \frac{HD_{2o}}{\left(1+\beta k_1\right)^2}$$

Epälineaarisen tk.-vahvistimen muunnos

- **Epälineaarinen takaisinkytketty vahvistin voidaan palauttaa yksinkertaiseksi polynomimalliksi muuntamalla eri astelukujen kertoimet.**

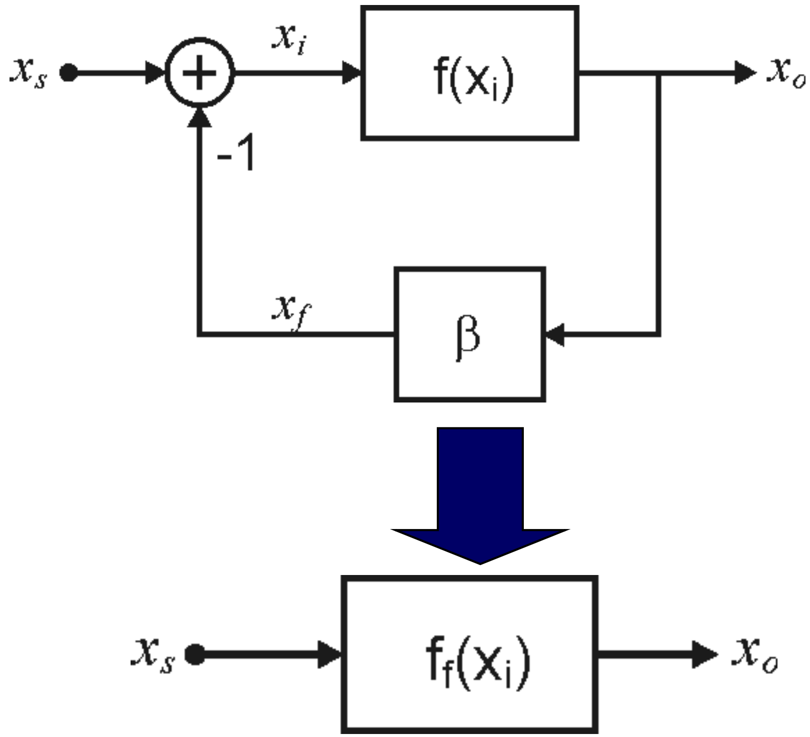
$$f(x_i) = k_1 x_i + k_2 x_i^2 + k_3 x_s^3$$

$$\Downarrow$$

$$f_f(x_s) = t_1 x_s + t_2 x_s^2 + t_3 x_s^3$$

$$t_1 = \frac{k_1}{1+\beta k_1} \qquad t_2 = \frac{k_2}{(1+\beta k_1)^3}$$

$$t_3 = \frac{k_3(1+\beta k_1) - 2\beta k_2^2}{(1+\beta k_1)^5}$$



Esimerkki 5

- **Jännitevahvistinta voidaan kuvata toisen asteen polynomilla**

$$v_o = 100 v_i + 2 v_i^2$$

- **Lasketaan HD_2 1V:n sinimuotoiselle tulosignaalille, kun vahvistin on avoimessa silmukassa ja kytkettynä 20dB:n suljetun silmukan vahvistukseen.**

Avoimessa silmukassa: $$HD_2 = \left|\frac{D_2}{A_1}\right| \approx \frac{k_2}{2k_1}\hat{v} = \underline{10^{-2}}$$

$$A_f = \frac{k_1}{1+\beta k_1} \Rightarrow 1+\beta k_1 = \frac{k_1}{A_f} = 10$$

Muunnetaan kertoimet ja lasketaan HD_2 uudelleen:

$$t_1 = \frac{k_1}{1+\beta k_1} = 10 \quad t_2 = \frac{k_2}{(1+\beta k_1)^3} = 2\cdot 10^{-3} \quad HD_{2f} = \frac{t_2}{2t_1}\hat{v} = \frac{10^{-3}}{10} = \underline{10^{-4}}$$

Takaisinkytkentälajit

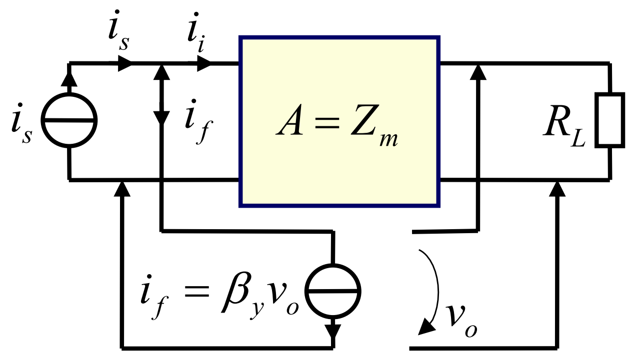
- **Tähän asti on analysoitu (etupäässä) yleisiä signaaleja.**
- **Mielekkäitä sähköisiä suureita on kuitenkin (ainakin) kaksi: jännite ja virta.**
- **Kun otetaan huomioon, että takaisinkytkennässä täytyy signaalia käsitellä sekä tulossa että lähdössä saadaan neljä mahdollista kombinaatiota:**

Tulo	Lähtö
Jännite	Jännite
Virta	Virta
Virta	Jännite
Jännite	Virta

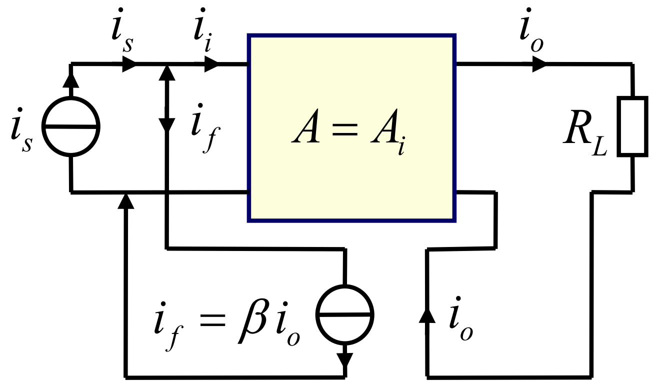
Lähtöpuolellä puhutaan näytteenotosta ja tulopuolella summauksesta.

Esim. virtasummaus- jännitenäyte.

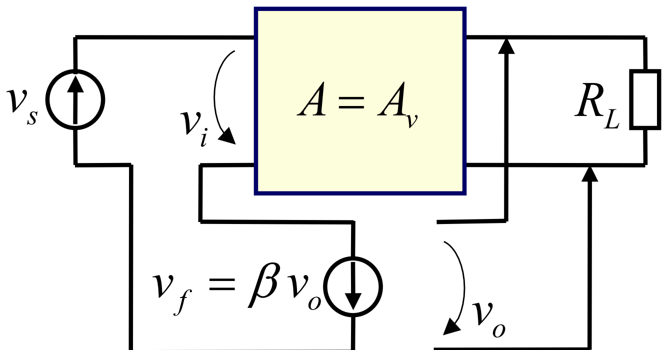
Neljä takaisinkytkentälajia



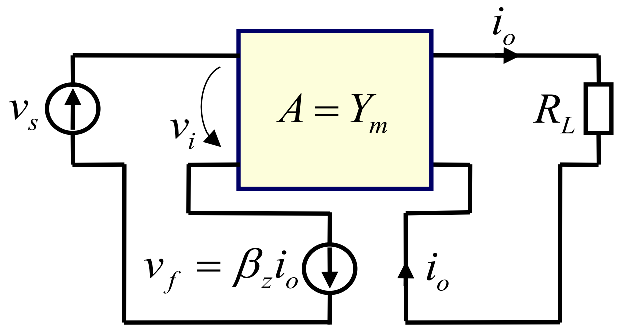
virtasummaus - jännitenäyte
rinnan-rinnan (*y*-parametrit)



virtasummaus - virtanäyte
rinnan-sarja (*g*-parametrit)



jännitesummaus - jännitenäyte
sarja-rinnan (*h*-parametrit)

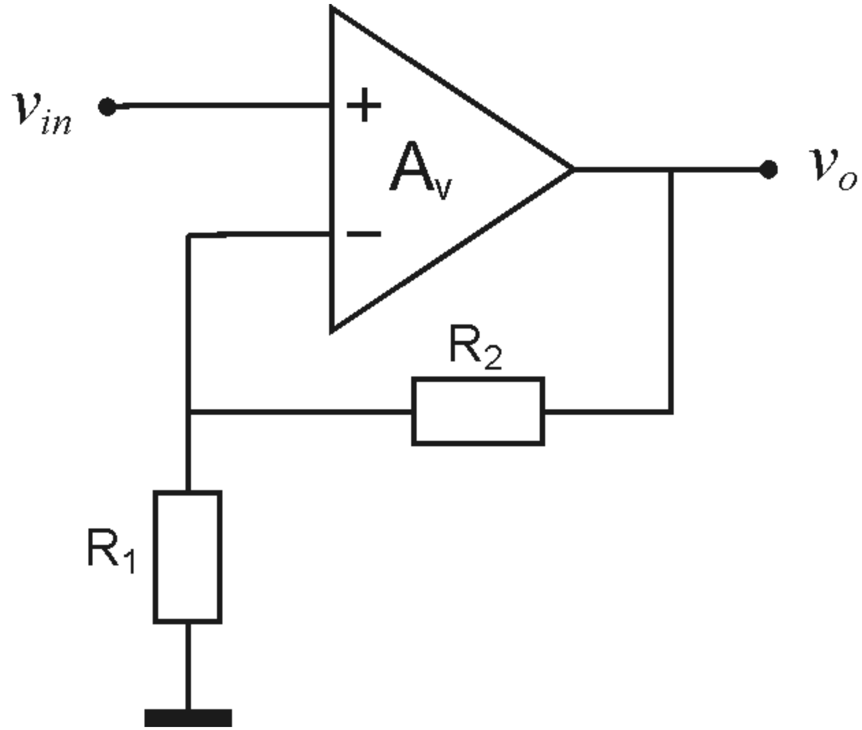


jännitesummaus - virtanäyte
sarja-sarja (*z*-parametrit)

Ei-invertoiva operaatiovahvistinkytkentä

- **Vastusverkko ottaa näytteen lähtöjännitteestä.**
- **Tulossa ei varsinaisesti ole mitään sarjassa.**
- **Jännitteet kuitenkin summataan mikä on toiminnallisesti sama kuin sarjaankytkentä.**

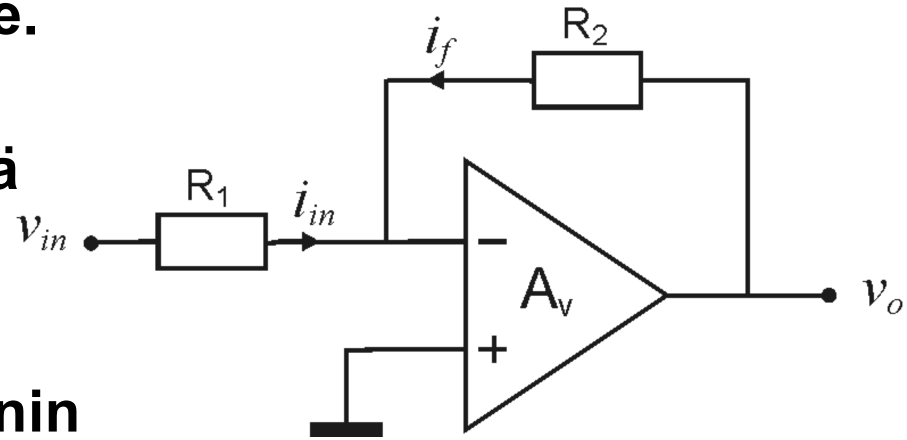
$\rightarrow$jännitesummaus-jännitenäyte
$\rightarrow$sarja-rinnan topologia



$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \qquad A = A_v \qquad A_f \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Invertoiva operaatiovahvistinkytkentä

- **Lähtöjännitteestä otetaan näyte.**
- **Tulopuolella summaus ei kuitenkaan tapahdu jännitteenä vaan virtana.**



- **Tehdään tulovastukselle Nortonin muunnos.**

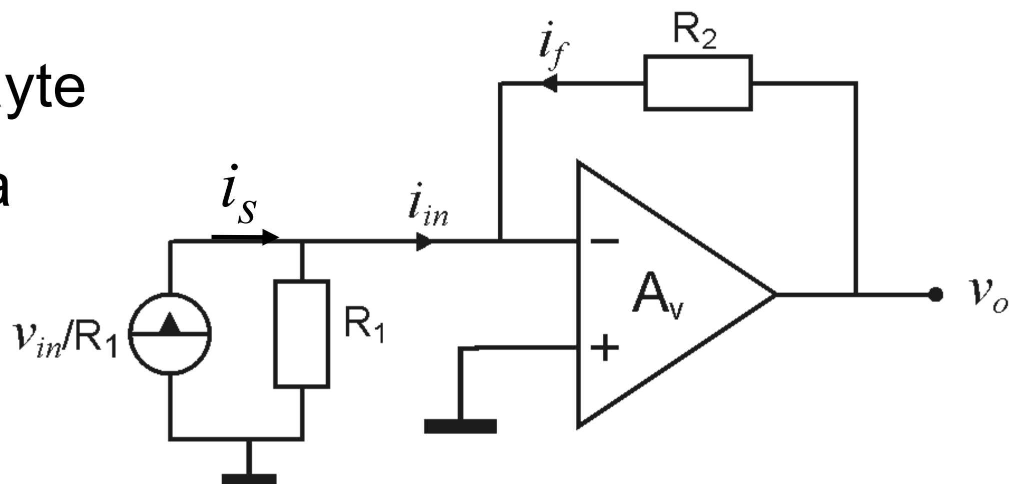
→Virtasummaus-jännitenäyte

→ Rinnan-rinnan topologia

$$\beta = -1/R_2$$

$$A = Z_m = -(R_1 \parallel R_2)A_v$$

$$A_f \approx -R_2$$



Tarkistus

- **Jos lasketaan lähtöjännite tulojännitteen funktiona pitäisi saada sama tulos kuin suoraan kytkennästä laskemalla.**

$$v_o = A_f i_s = -R_2 \frac{v_{in}}{R_1} \Rightarrow \frac{v_0}{v_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

eli tulos on sellainen kuin pitääkin.

Viikon kuluttua

- **Takaisinkytketty vahvistin II**

- **Sovelletaan osassa I opittua.**
- **Takaisinkytkennän vaikutus tulo- ja lähtöimpedansseihin.**
- **Opitaan määrittelemään β ja A epäideaalisissakin tapauksissa.**
- **Takaisinkytkennän vaikutus taajuusvasteeseen useamman navan tapauksessa.**
- **Stabiilisuusanalyysi.**

Tavoitteet, osa I

- **Tietää**
  - Takaisinkytkentään liittyvät tärkeimmät käsitteet
  - Avoimen ja suljetun silmukan vahvistus
  - Takaisinkytkentäkerroin β.
  - Paluuerotus ja silmukkavahvistus
  - Takaisinkytkentälajit
- **Ymmärtää**
  - Takaisinkytkennän vaikutus vahvistimen ominaisuuksiin.
  - Vahvistuksen herkkyyys
  - Kaistanleveys
  - Lineaarisuus
- **Soveltaa**
  - Analysoida idealisoitujen t.k. systeemien ominaisuuksia.