



Aalto-yliopisto  
Sähkötekniikan  
korkeakoulu

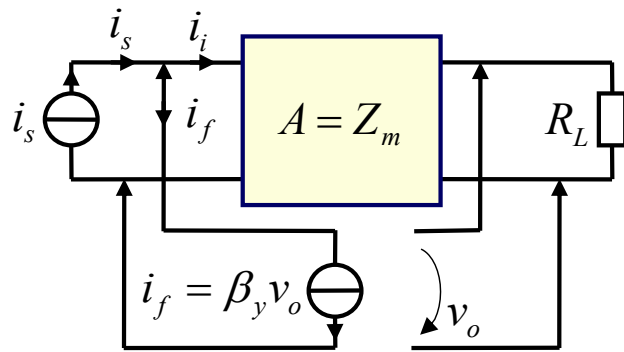
# Takaisinkytketty vahvistin II

*ELEC-C3230 Elektronikka I (Ryynänen Kosunen)*

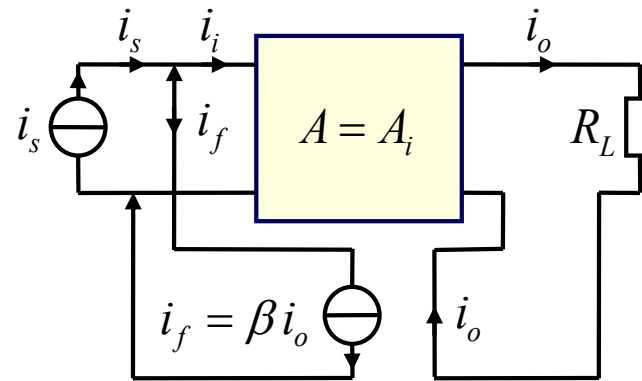
# Luennon pääkohdat

- **Takaisinkytkennän vaikutus tulo- ja lähtöimpedansseihin.**
- **Epäideaalisuuksien käsittely takaisinkytketyn systeemin analyysissä.**
  - Lähde- ja kuormaimpedanssit.
  - Takaisinkytkentäverkko.
- **Neljä takaisinkytkentälajia**
  - Muutamia esimerkkejä
- **Takaisinkytketyn vahvistimen navat.**
  - Kaksi- ja kolminapainen tapaus.
- **Stabiilisuusanalyysi Bode-diagrammin avulla.**
  - Stabiilisuusehto.
  - Vaihe- ja vahvistusvaran määritelmät.

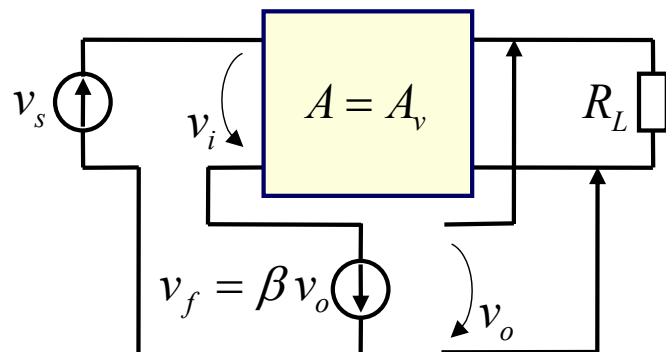
# Neljä takaisinkytkentälajia (kertaus)



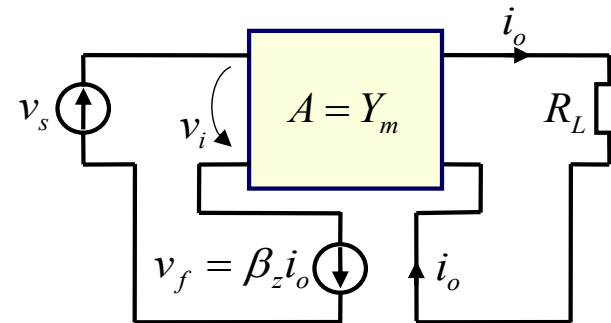
virtasummaus - jännitenäyte  
rinnan-rinnan (y-parametrit)



virtasummaus - virtanäyte  
rinnan-sarja (g-parametrit)



jännitesummaus - jännitenäyte  
sarja-rinnan (h-parametrit)



jännitesummaus - virtanäyte  
sarja-sarja (z-parametrit)

# Tuloimpedanssi jännitesummauksessa

- Lasketaan jännitesummaus-jännitenäyte (sarja-rinnan) takaisinkytketyn vahvistimen tulo- ja lähtöimpedanssit:

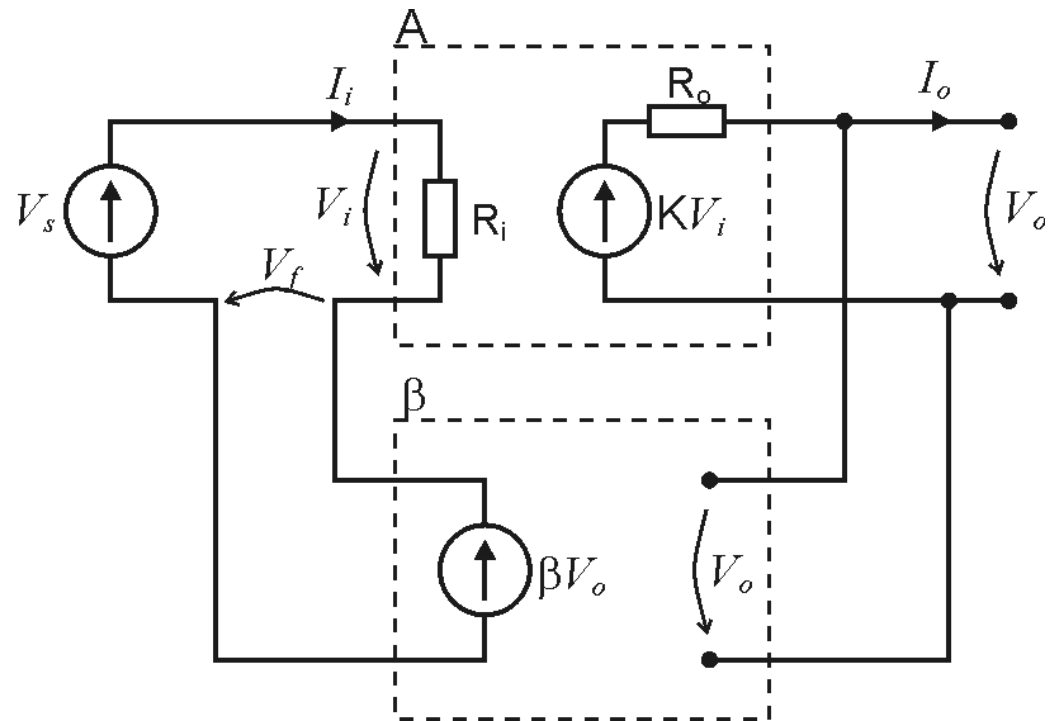
$$R_{if} = \frac{V_s}{I_i} = \frac{V_s}{V_i/R_i} = \frac{V_s}{V_i} R_i$$

$$V_i = \frac{V_s}{1 + \beta K}$$

$$\rightarrow R_{if} = (1 + \beta K) R_i$$

Jännitesummauksessa t.k.  
pyrkii vastustamaan  
tulojännitteen muutoksia

→ Korkeampi tuloimpedanssi



# Lähtöimpedanssi jännitenäytteenotossa

- Lasketaan lähtöimpedanssi:

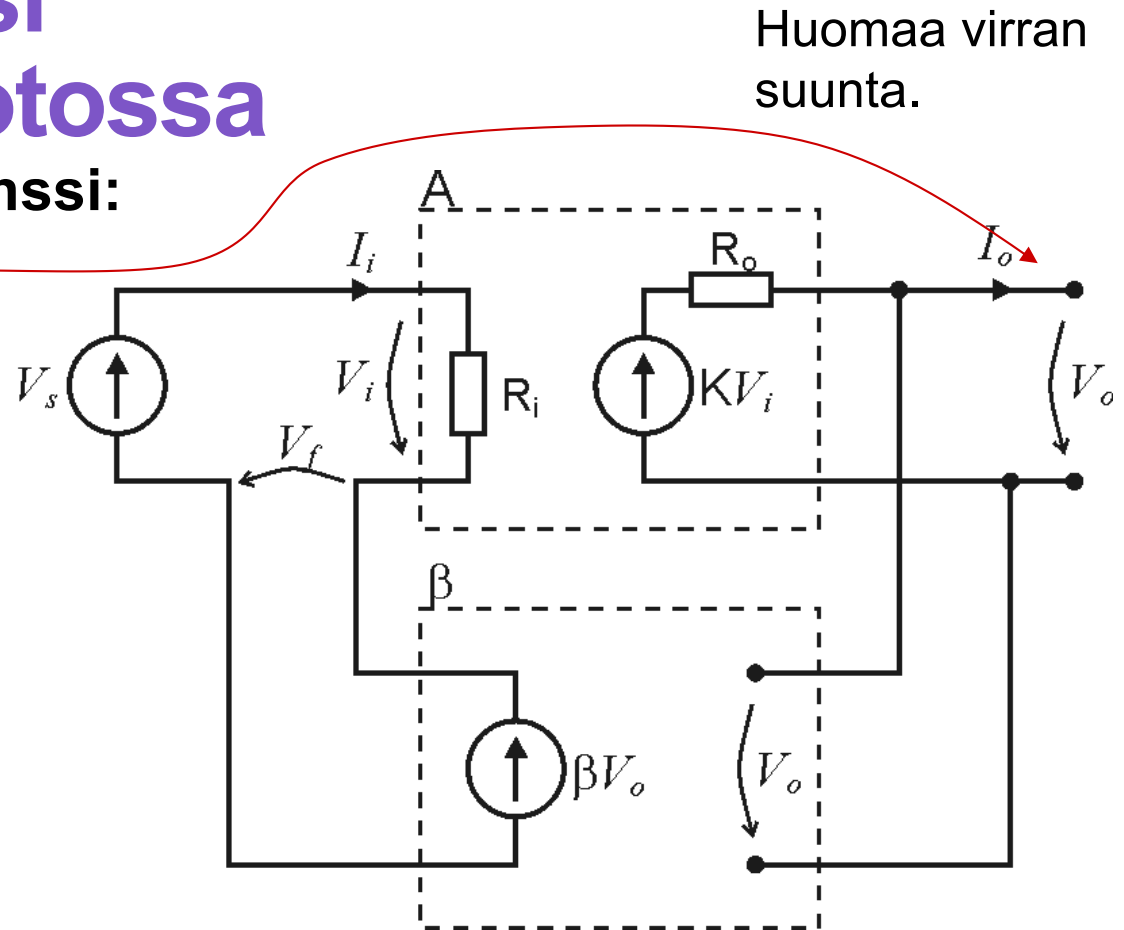
$$R_{of} = \frac{V_o}{-I_o}$$

$$-I_o = \frac{V_o - KV_i}{R_o}$$

Koska  $V_s=0$ :

$$V_i = -V_f = -\beta V_o$$

$$R_{of} = \frac{R_o}{1 + \beta K}$$



Jännitenäytteenotossa t.k. pyrkii pitämään lähtöjännitteen samana kuormituksesta riippumatta → Matalampi lähtöimpedanssi.

# Tuloimpedanssi virtasummauksessa

- Lasketaan virtasummaus-virtanäyte (rinnan-sarja) takaisinkytketyn vahvistimen tuloimpedanssi:

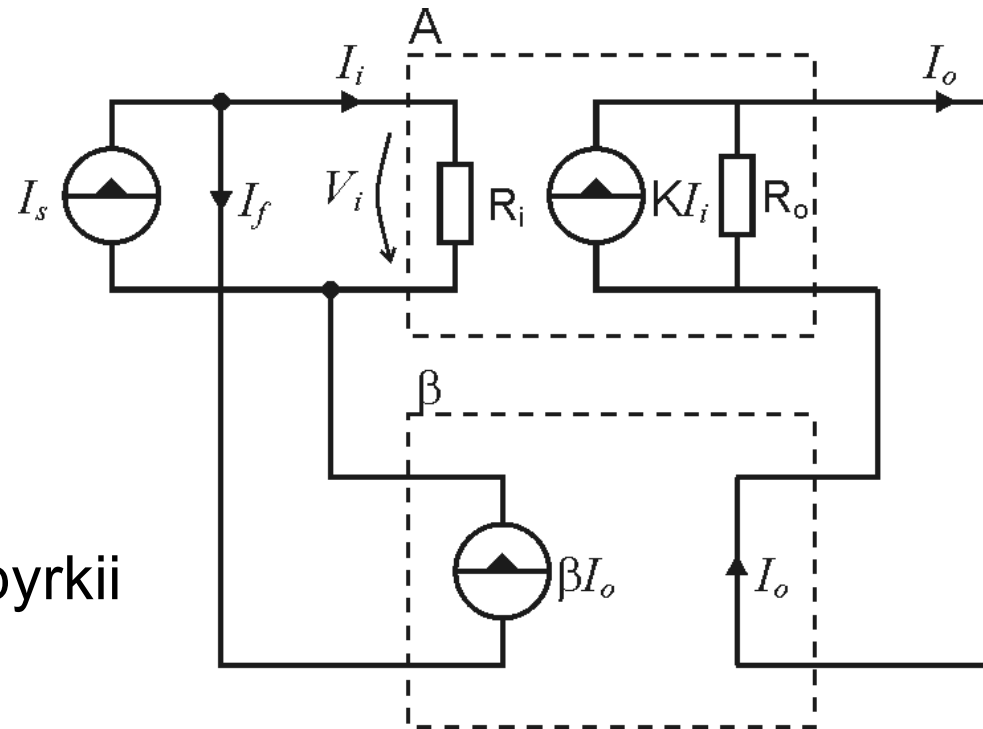
$$R_{if} = \frac{V_i}{I_s} = \frac{R_i I_i}{I_s}$$

$$I_i = \frac{I_s}{1 + \beta K}$$

$$\rightarrow R_{if} = \frac{R_i}{1 + \beta K}$$

Virtasummauksessa t.k. pyrkii vastustamaan tulovirran muutoksia.

→ Matalampi tuloimpedanssi



# Lähtöimpedanssi virtanäytteenotossa

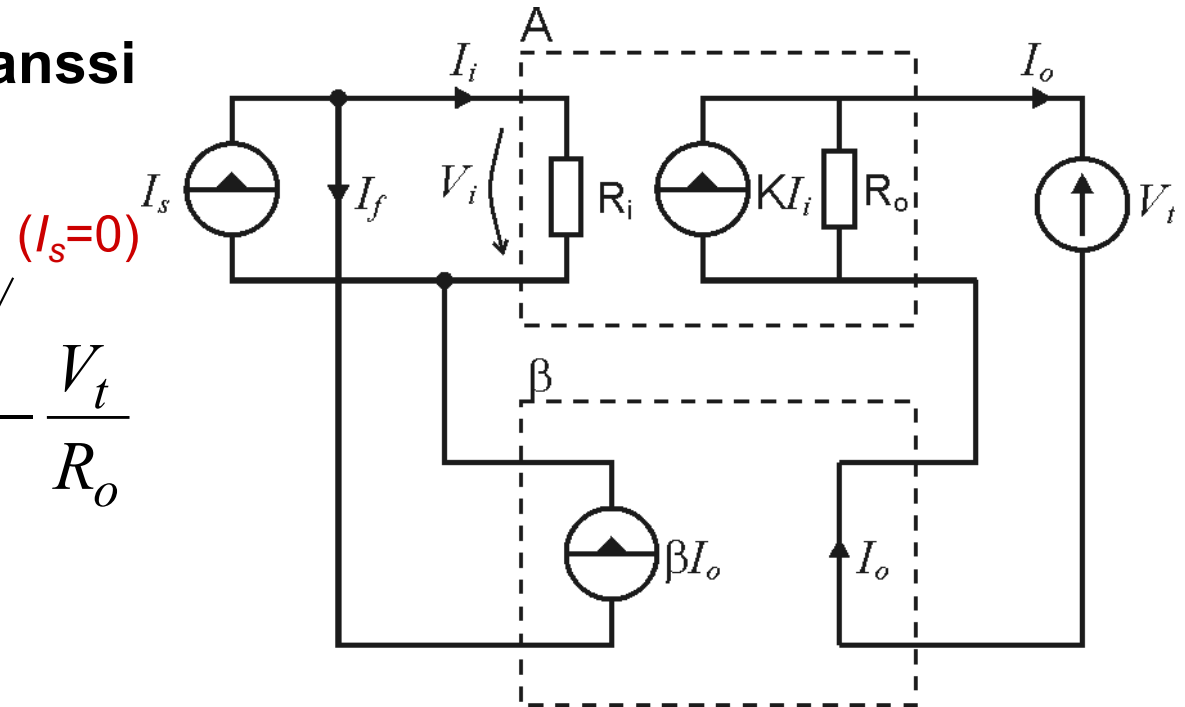
- Lasketaan lähtöimpedanssi

$$R_{of} = \frac{V_t}{-I_o}$$

$$I_o = KI_i - \frac{V_t}{R_o} = K(-\beta I_o) - \frac{V_t}{R_o}$$

$$I_o = -\frac{V_t}{R_o(1 + \beta K)}$$

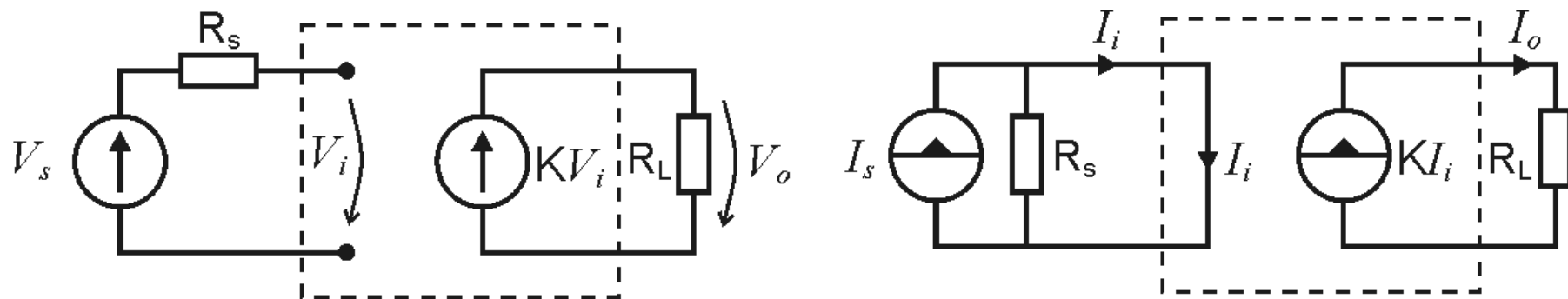
$$\rightarrow R_{of} = (1 + \beta K)R_o$$



Virtanäytteenotossa t.k. pyrkii pitämään lähtövirran samana kuormituksesta riippumatta  $\rightarrow$  Korkeampi lähtöimpedanssi.

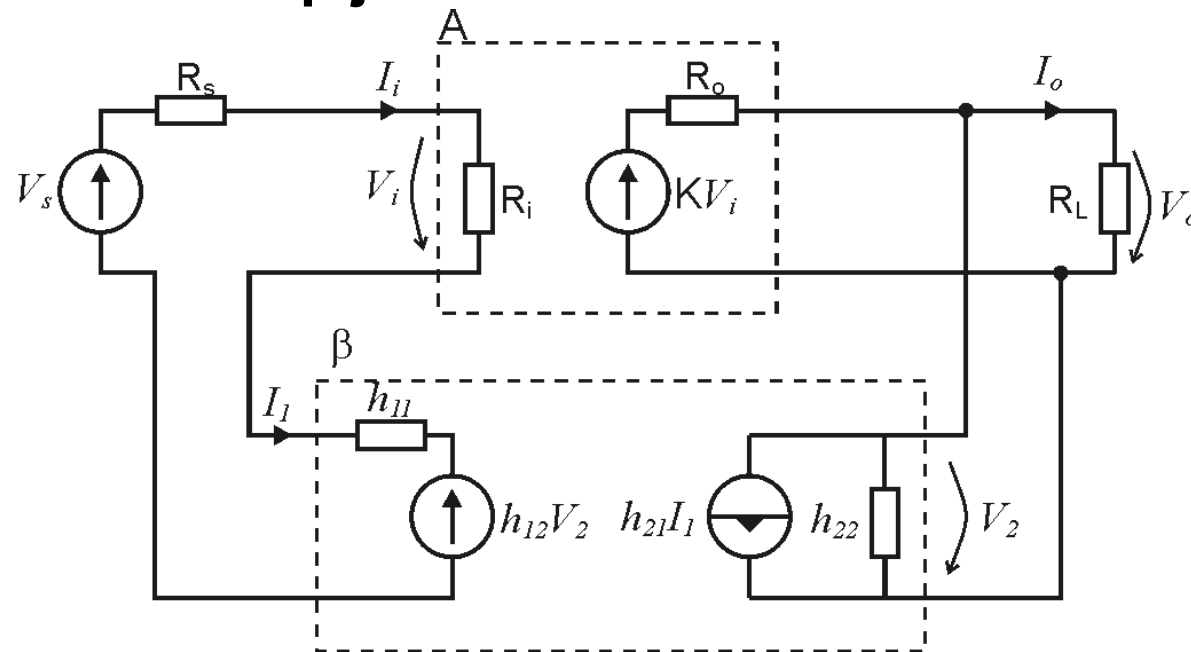
# Yhteenveto impedansseista

- **Muistisääntönä voi ajatella millainen olisi tietyn tyyppinen ideaalinen vahvistin impedanssien osalta:**
  - Idealisella virtavahvistimella on ääretön lähtöimpedanssi kun taas jännitevahvistimella se on nolla.
  - Jos vahvistimen tulosuure on jännite, on ääretön tuloimpedanssi ideaalitapaus ja virtatulolla taas nollain impedanssi.
- **Takaisinkytkentä ei voi tehdä vahvistimesta ideaalista, vaan vaikutuksena on ko. suureen kertominen tai jakaminen paluuerotuksella.**



# Kuormituksen vaikutus

- Käytännössä lähde- ja kuormaresistanssit sekä takaisinkytkentäverkko vaikuttavat toimintaan.
- Miten määritellään  $\beta$  ja  $A$  kun kaikki vaikuttaa kaikkeen?



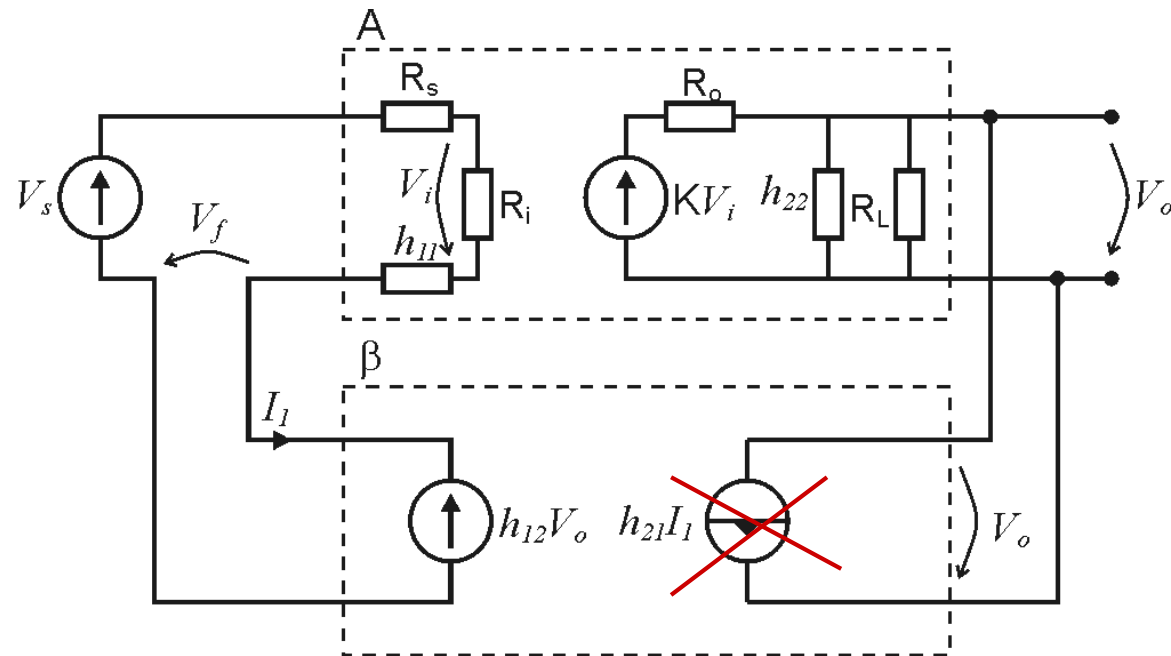
(Katso viimeistä kalvoa tai Sedran C-liitettä kaksiporittiparametrien määritelmistä) (Liite B viidennessä painoksessa)

# Takaisinkytkentäanalyysin kolme sääntöä

- Signaalivuokaavioihin perustuva analyysi on hyvin idealisoitua.
- Jotta teoria toimisi oikein, pitää todellisia piirejä muokata vastaamaan signaalikaaviomallia:
  1. **A- ja  $\beta$  -lohkojen on oltava yksisuuntaisia.**
    - Jos A-lohkossa on sisäistä takaisinkytkentää, se pitää siirtää  $\beta$  -lohkoon.
    - Kaikki eteenpäinkytkentä  $\beta$  -lohkossa pitää siirtää A-lohkoon.
  2.  **$\beta$ -lohko ei saa kuormittaa A-lohkoa.**
    - Kytkentää muokataan niin, että kuormitus on A:n sisällä.
  3. **Lähde ja kuorma ovat ideaalisia.**
    - Kytkentää muokataan niin, että lähde- ja kuormaresistanssi siirretään A:n sisään.

# Jännitesummaus-jännitenäyte

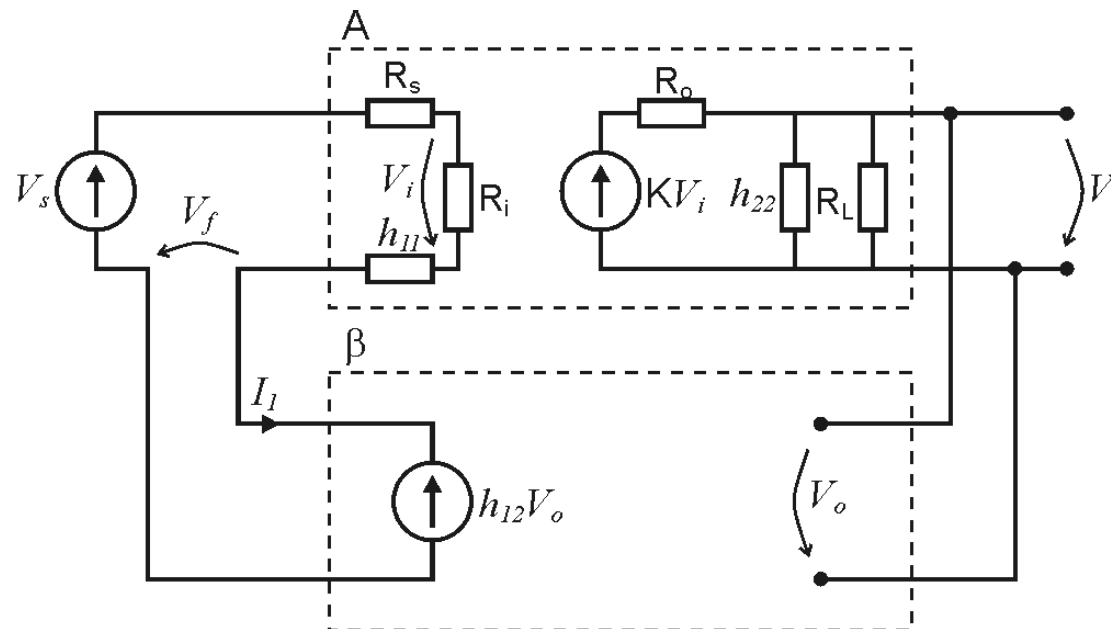
- Lähde- ja kuormaresistanssi siirretään A-lohkoon.
- Takaisinkytkentäverkko esitetään h-parametreina, jolloin sen tulo- ja lähtöresistanssien siirto A-lohkoon on mahdollista.
- $h_{21}$  on hyvin heikko A:han verrattuna ja approksimoidaan pois.



# Paluuerotus

$$A = \frac{R_i}{R_s + R_i + h_{11}} K \frac{1/h_{22} \parallel R_L}{R_o + 1/h_{22} \parallel R_L} \quad \begin{array}{l} h_{11} \text{ on impedanssi, kun taas} \\ h_{22} \text{ on admittanssi.} \end{array}$$

$$\rightarrow 1 + \beta A = 1 + h_{12} \frac{R_i}{R_s + R_i + h_{11}} K \frac{1/h_{22} \parallel R_L}{R_o + 1/h_{22} \parallel R_L}$$



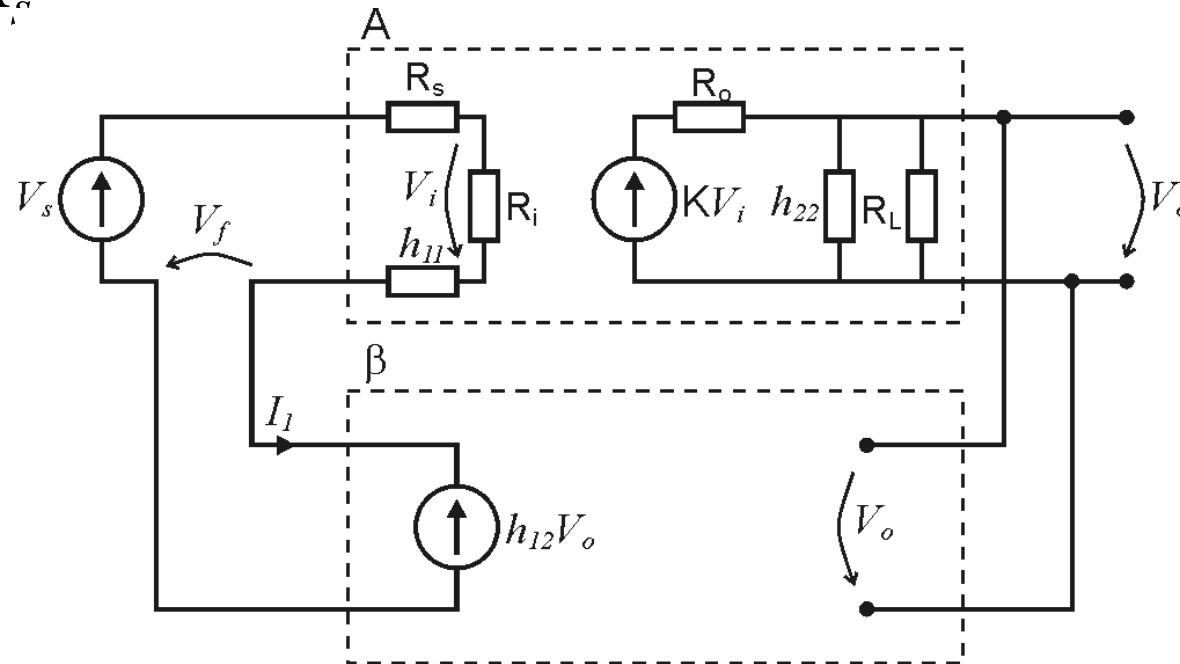
# Tuloresistanssi

- Lasketaan muokatun piirin tuloresistanssi lähteen kannalta:

$$R_{if} = (R_s + R_i + h_{11})(1 + \beta A)$$

- Todellinen tuloresistanssi  $R_{in}$  saadaan vähentämällä  $R_s$ :

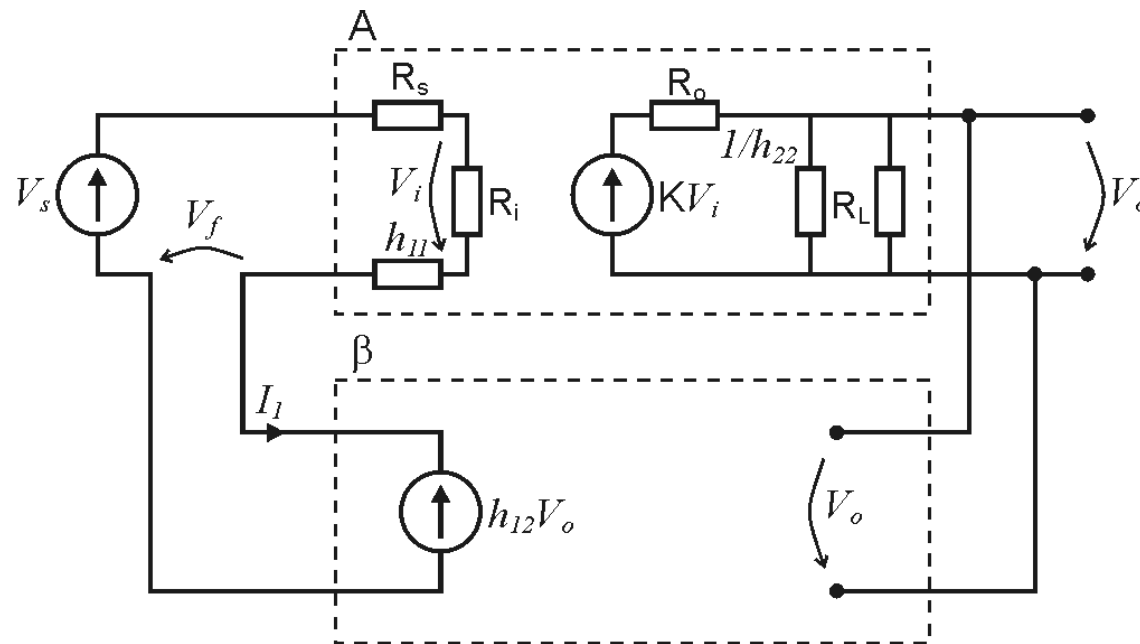
$$R_{in} = R_{if} - R_s$$



# Lähtöresistanssi

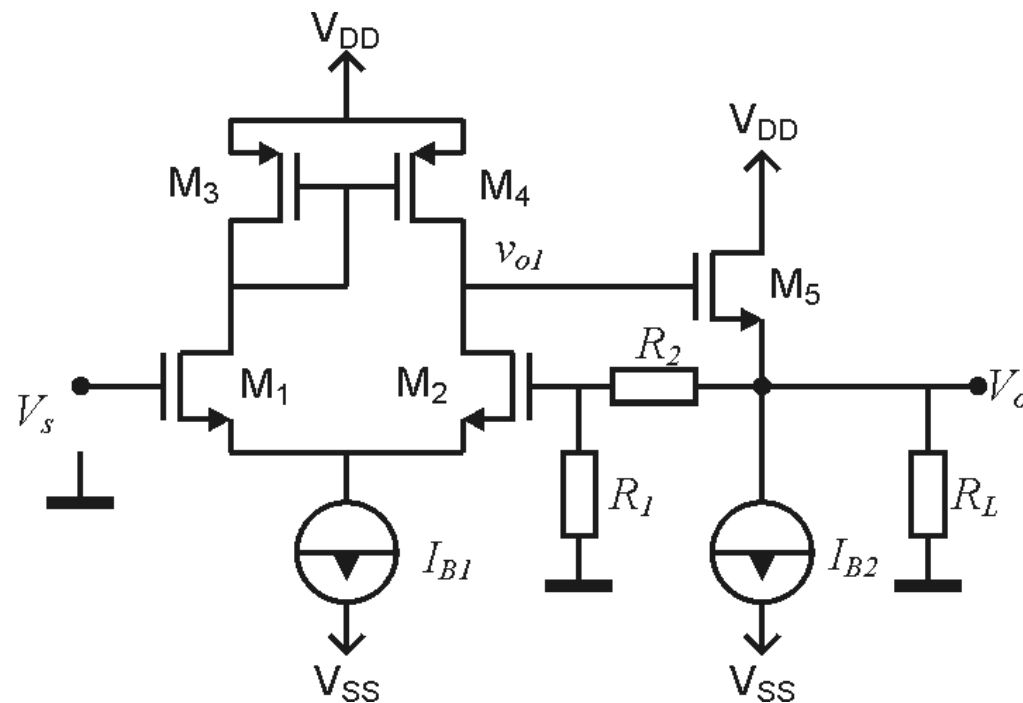
- Todellinen lähtöresistanssi saadaan vähentämällä kuorma  $R_{of}$ :sta:

$$R_{of} = \frac{1/h_{22} \parallel R_L \parallel R_o}{1 + \beta A} \quad R_{out} = 1 / \left( \frac{1}{R_{of}} - \frac{1}{R_L} \right)$$



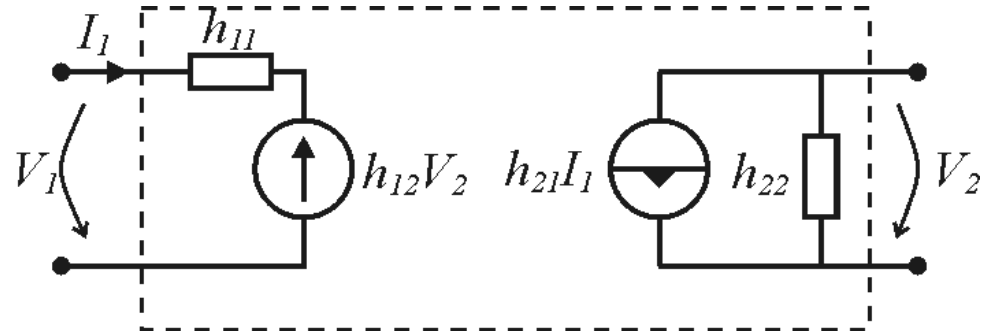
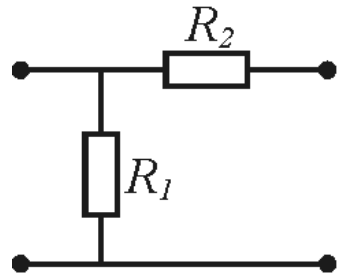
# Esimerkki 1

- Kuvan vahvistimessa  $M_{1-4}$ :n  $k_n'W/L=0.25\text{mA/V}^2$ ,  $M_5$ :n  $k_n'W/L=2.5\text{mA/V}^2$ ,  $\lambda_n=\lambda_p=0.01\text{V}^{-1}$ ,  $I_{B1}=0.2\text{mA}$  ja  $I_{B2}=1\text{mA}$ .
- Lasketaan  $A_f$  ja  $R_{\text{out}}$  kun  $R_1=R_2=R_L=1\text{k}\Omega$ .



# Esimerkki 1 jatkuu

- Lasketaan takaisinkytkentäverkon parametrit:



$$h_{11} = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{V_2=0} = R_1 \parallel R_2 = 500\Omega$$

$$h_{12} = \left. \frac{V_1}{V_2} \right|_{I_1=0} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0.5$$

$$h_{22} = \left. \frac{I_2}{V_2} \right|_{I_1=0} = 1/(R_1 + R_2) = 0.5\text{mS}$$

$$V_1 = h_{11}I_1 + h_{12}V_2$$

$$I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}V_2$$

# Esimerkki 1 jatkuu

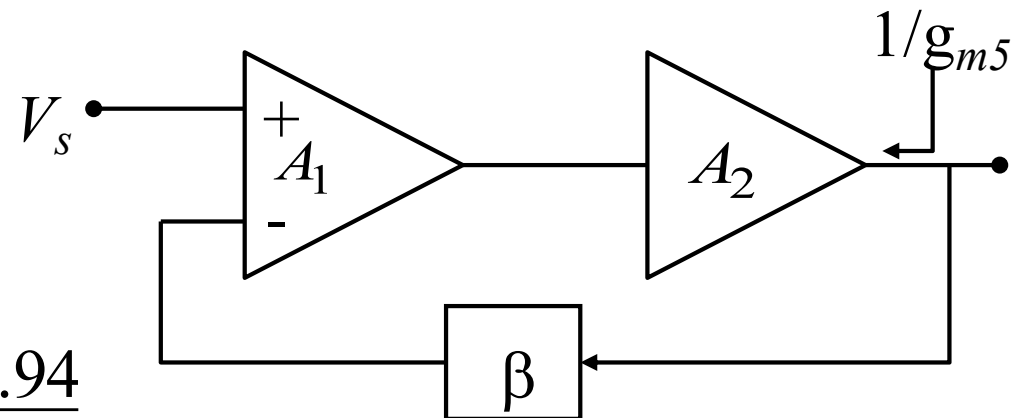
- Mallinnetaan vahvistinta kahden asteen yhdistelmällä, jossa ensimmäisen jännitevahvistus on 110 ja toisen 1. (laskettu aikaisemilla luennoilla).
- Toisen asteen lähtöresistanssi on  $1/g_{m5}$ .

$$g_{m5} = \sqrt{2k_n(W/L)_5 I_{D5}} \approx 2.2\text{mS}$$

$$A = K \frac{1/h_{22} \parallel R_L}{R_o + 1/h_{22} \parallel R_L} = 110 \frac{2\text{k}\Omega \parallel 1\text{k}\Omega}{1/2.2\text{mS} + 2\text{k}\Omega \parallel 1\text{k}\Omega} \approx 65.4$$

$$R_i \approx \infty \rightarrow \frac{R_i}{R_s + R_i + h_{11}} \approx 1$$

$$A_f = \frac{A}{1 + h_{12}A} = \frac{65.4}{1 + 0.5 \cdot 65.4} = \underline{1.94}$$



# Esimerkki 1 jatkuu

- Koska paluuerotus on tiedossa, voidaan lähtöresistanssi laskea:

$$R_{of} = \frac{1/h_{22} \parallel R_L \parallel R_o}{1 + \beta A} = \frac{1}{1 + 0.5 \cdot 65.4} \frac{1}{2.2mS + 1/1k\Omega + 1/2k\Omega} \approx 8.02\Omega$$

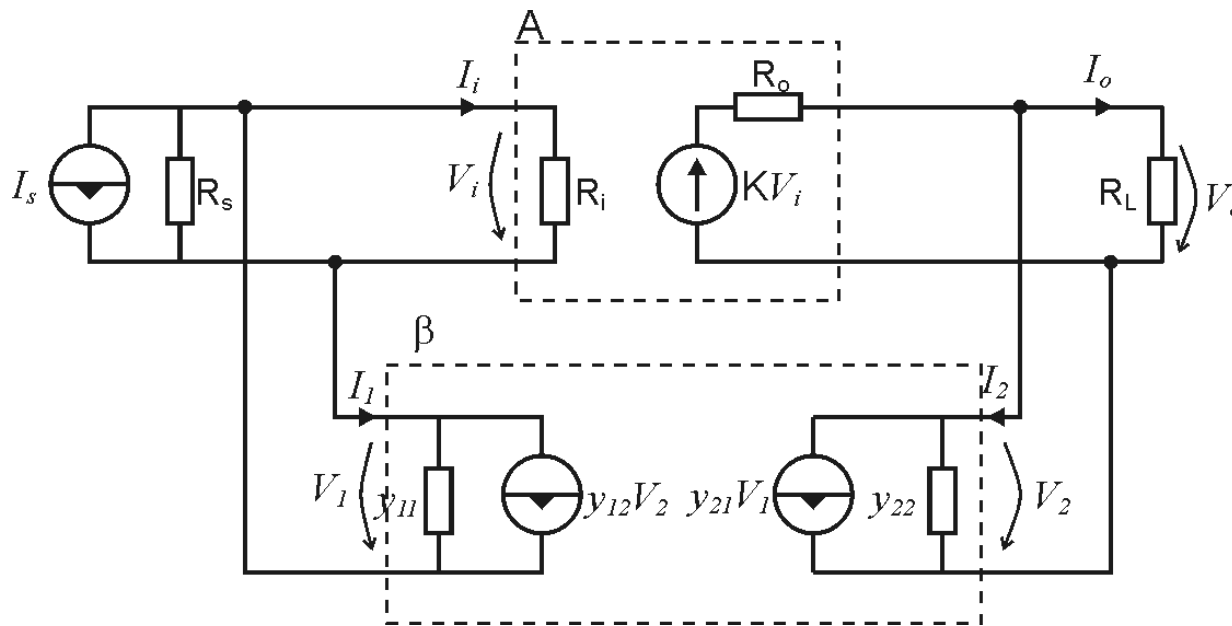
$$R_{out} = 1 / \left( \frac{1}{R_{of}} - \frac{1}{R_L} \right) = \underline{8.08\Omega}$$

- $R_L$  vaikuttaa paljon merkittävämmiin epäsuorasti paluuerotuksen heikkenemiseen kautta.

# Virtasummaus-jännitenäyte

- Sekä näytteenotto että summaus tapahtuvat rinnan.
- Takaisinkytkentäverkko kannattaa esittää y-parametreina.
- $y_{11}$ ,  $R_s$ ,  $y_{22}$  ja  $R_L$  siirretään A-lohkoon.
- $y_{21}$  approksimoidaan nolllaksi.

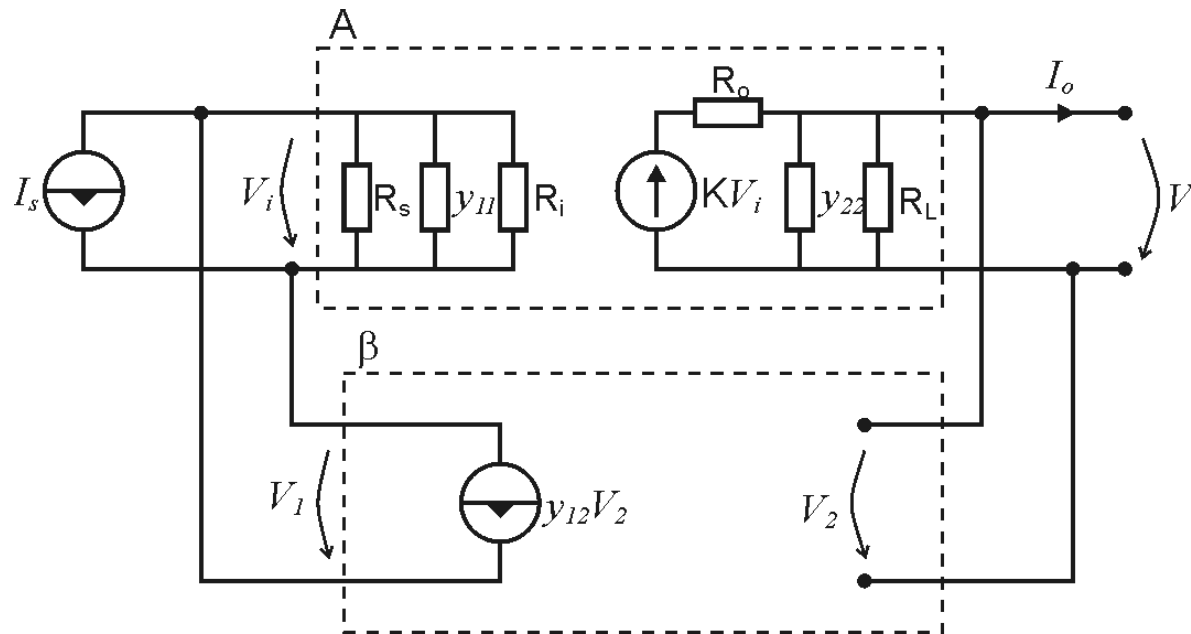
$$\begin{aligned} I_1 &= y_{11}V_1 + y_{12}V_2 \\ I_2 &= y_{21}V_1 + y_{22}V_2 \end{aligned}$$



# Paluuerotus

$$A = \frac{R_L \parallel 1/y_{22}}{R_o + R_L \parallel 1/y_{22}} K(R_s \parallel 1/y_{11} \parallel R_i) \quad \beta = y_{12}$$

$$1 + \beta A = 1 + y_{12} \cdot \frac{R_L \parallel 1/y_{22}}{R_o + R_L \parallel 1/y_{22}} R_s \parallel 1/y_{11} \parallel R_i \cdot K$$



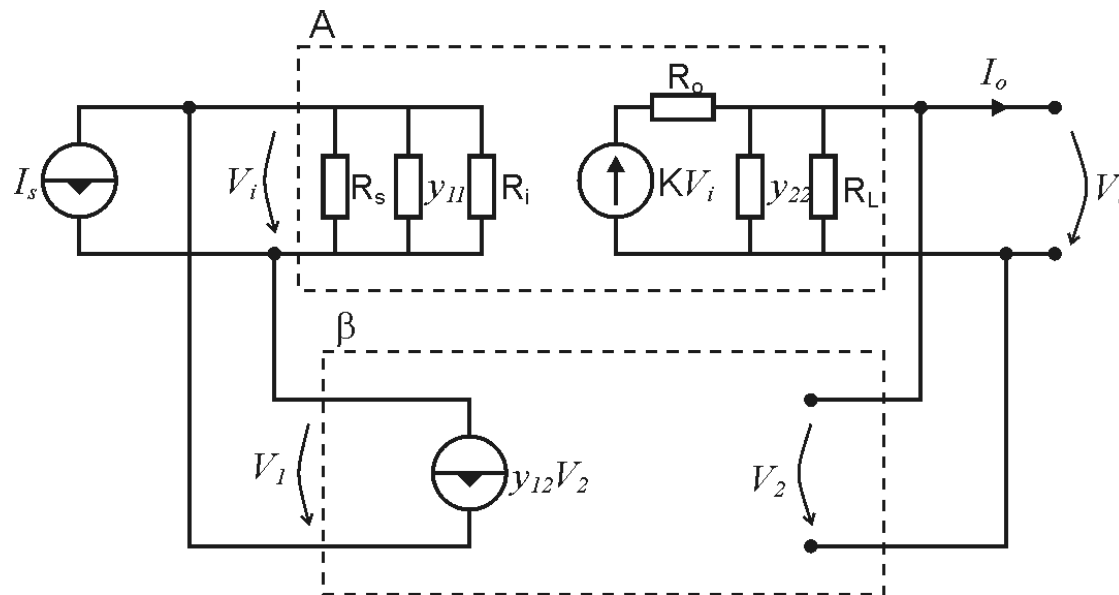
# Tuloresistanssi

- Lasketaan muokatun piirin tuloresistanssi lähteen näkemänä:

$$R_{if} = \frac{R_s \parallel 1/y_{11} \parallel R_i}{1 + \beta A}$$

- Todellinen tuloresistanssi:

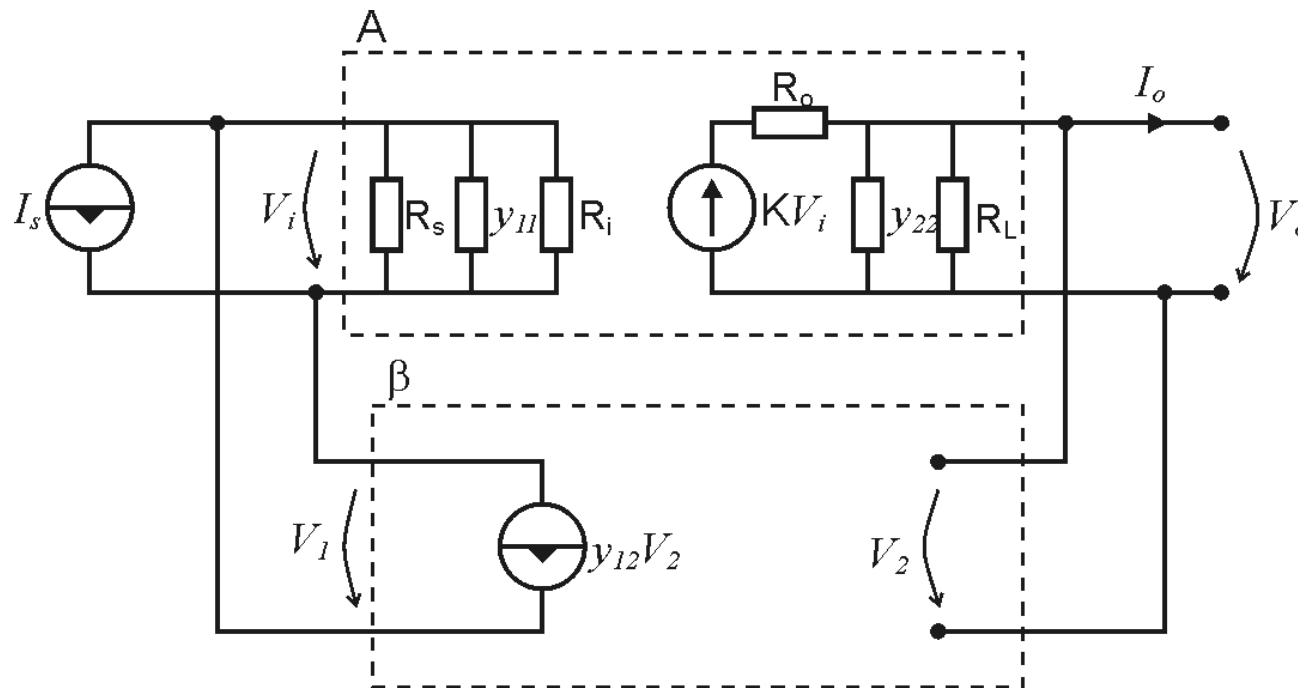
$$R_{in} = 1 / \left( \frac{1}{R_{if}} - \frac{1}{R_s} \right)$$



# Lähtöresistanssi

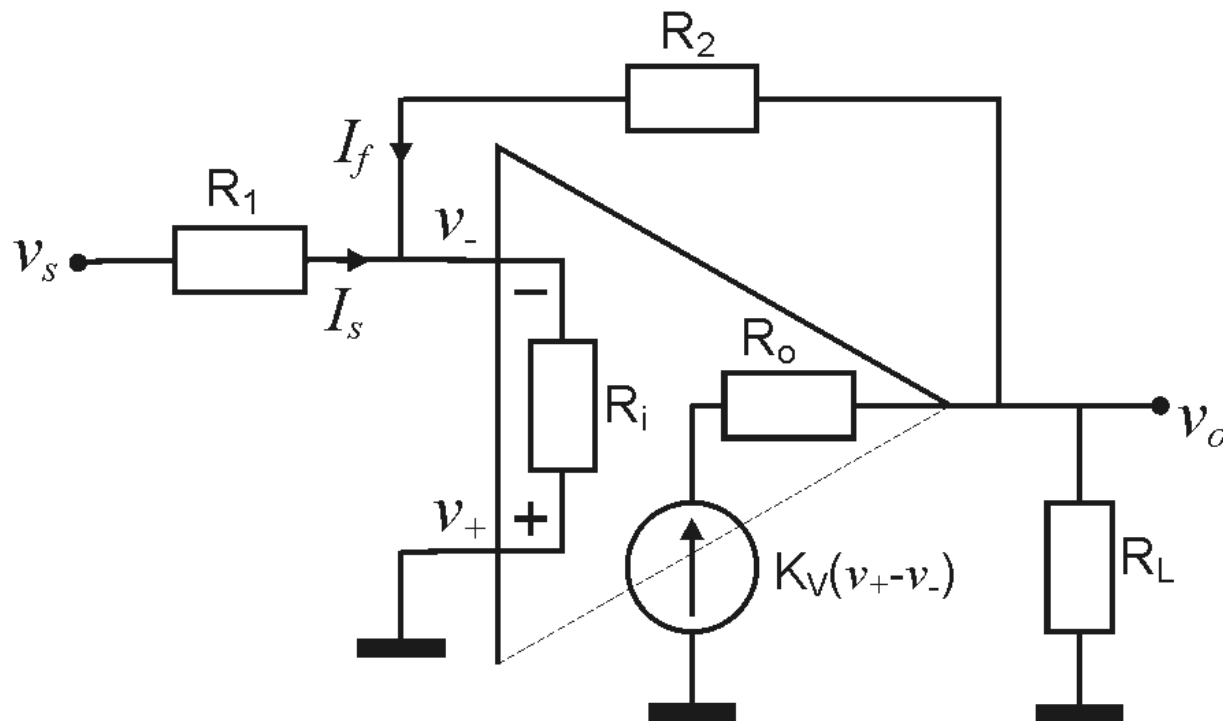
- Todellinen lähtöresistanssi saadaan vähentämällä kuorma  $R_{of}$ :sta.

$$R_{of} = \frac{1/y_{22} \parallel R_L \parallel R_o}{1 + \beta A} \quad R_{out} = 1 / \left( \frac{1}{R_{of}} - \frac{1}{R_L} \right)$$



## Esimerkki 2

Oheisessa kytkennässä olevan operaatiovahvistimen DC-jännitevahvistus  $K=10^4$ . Lasketaan tulo- ja lähtoresistanssit, silmukavahvistus sekä suljetun silmukan vahvistus.



$$R_1 = 1k\Omega$$

$$R_2 = 100k\Omega$$

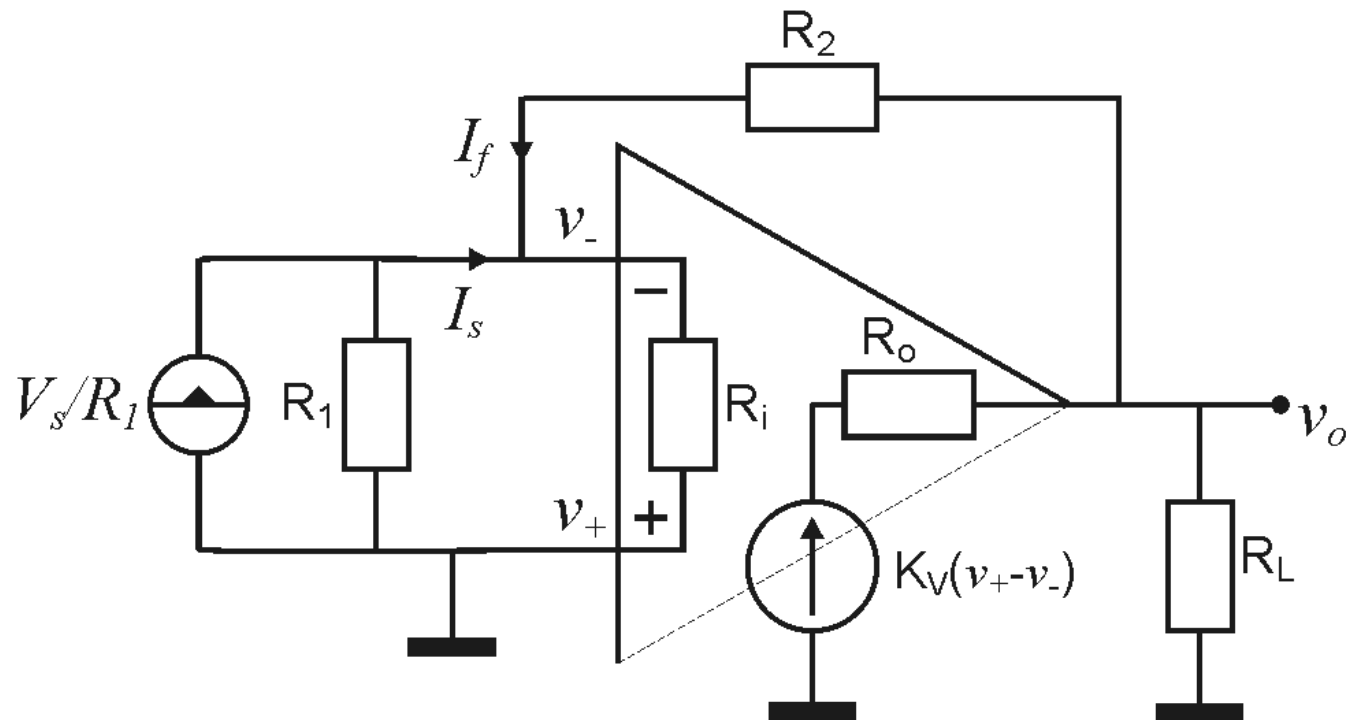
$$R_i = 1M\Omega$$

$$R_o = 10k\Omega$$

$$R_L = 1k\Omega$$

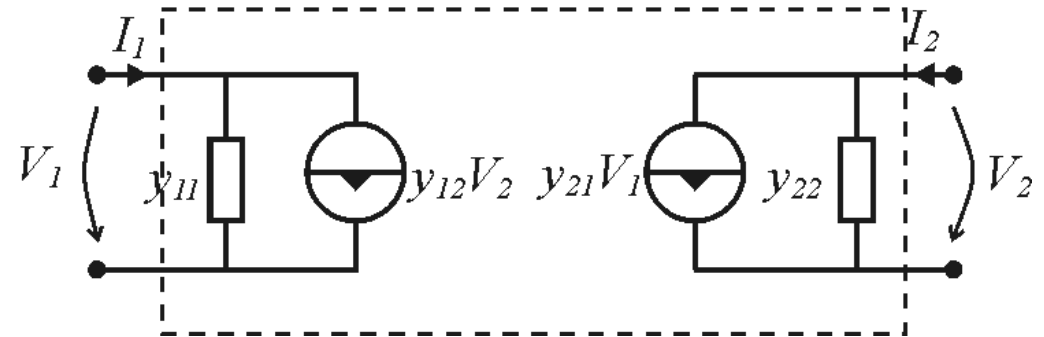
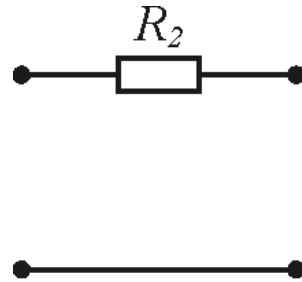
## Esimerkki 2 jatkuu

- Takaisinkytkentäsignaalin summaaminen tapahtuu virtana.
- Lähteen on oltava samaa tyyppiä kuin t.k.-signaalin.
- Tehdään Nortonin muunnos lähteelle:



# Esimerkki 2 jatkuu

- Lasketaan takaisinkytkentäverkon parametrit:



$$y_{11} = \left. \frac{I_1}{V_1} \right|_{V_2=0} = 1/R_2 = 10\mu S$$

$$y_{12} = \left. \frac{I_1}{V_2} \right|_{V_1=0} = -1/R_2 = -10\mu S$$

$$y_{22} = \left. \frac{I_2}{V_2} \right|_{V_1=0} = 1/R_2 = 10\mu S$$

$$I_1 = y_{11}V_1 + y_{12}V_2$$

$$I_2 = y_{21}V_1 + y_{22}V_2$$

# Esimerkki 2: vahvistukset

- Lasketaan ensin silmukkahavvistus:
- Silmukkahavvistus on positiivinen, koska  $\beta$  on negatiivinen ja vahvistin invertoiva.

$$\beta A = y_{12} \cdot \frac{R_L \parallel 1/y_{22}}{R_o + R_L \parallel 1/y_{22}} (R_s \parallel 1/y_{11} \parallel R_i) \cdot K =$$

$$\beta A = -\frac{1}{R_2} \cdot \frac{R_L \parallel R_2}{R_o + R_L \parallel R_2} (R_1 \parallel R_2 \parallel R_i) \cdot (-K_V) = \underline{8.9}$$

- Paluuerotukseksi saadaan:  $1 + \beta A \approx 9.9$

- Suljetun silmukan vahvistus:

$$A_f = \frac{A}{1 + \beta A} = \frac{8.9 / (-1/R_2)}{9.9} = -89.9 k\Omega \Rightarrow V_o = A_f \frac{V_s}{R_1} = -89.9 V_s$$

transresistanssi



## Esimerkki 2: resistanssit

virtuaalimaa

- **Tuloresistanssi:**

$$R_{if} = \frac{R_1 \parallel R_2 \parallel R_i}{1 + \beta A} \approx 99.9\Omega \quad R_{in} = 1 / \left( \frac{1}{R_{if}} - \frac{1}{R_1} \right) \approx \underline{111\Omega}$$

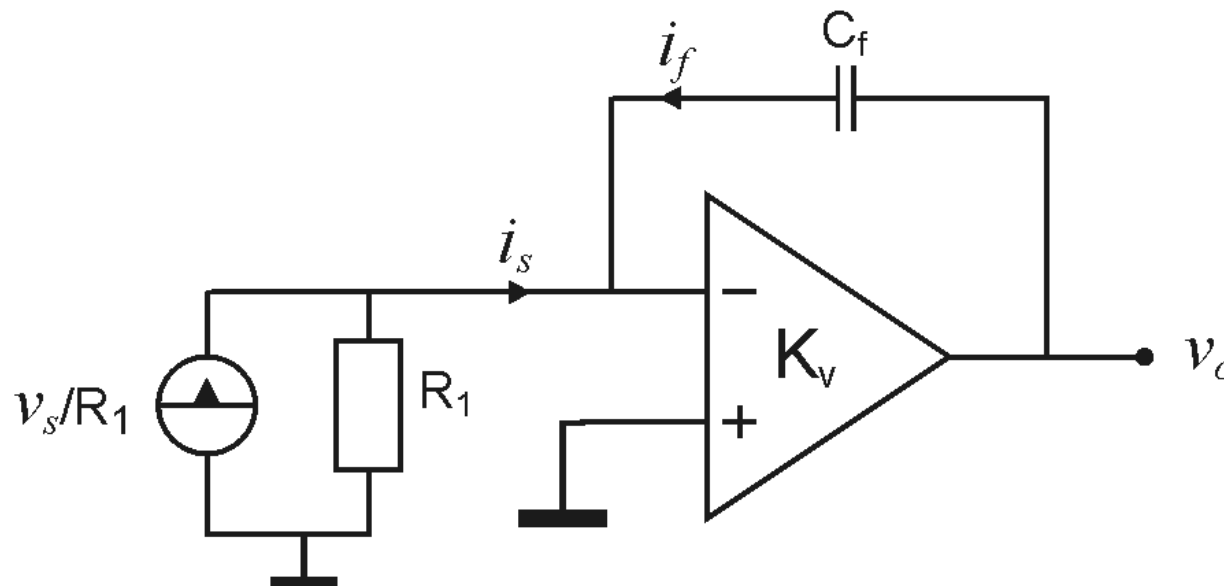
- **Jännitelähteen  $V_s$  näkemä resistanssi on  $R_1 + R_{in} = 1.111\text{k}\Omega$ .**
- **Lähtöresistanssi:**

$$R_{of} = \frac{R_2 \parallel R_L \parallel R_o}{1 + \beta A} = 99\Omega \quad R_{out} = 1 / \left( \frac{1}{R_{of}} - \frac{1}{R_L} \right) = 110\Omega$$

- **Tällä kertaa tulokset ovat kaukana ideaalisesta, koska  $A_f$  on liian lähellä  $A$ :ta, jolloin paluuerotus jää pieneksi.**

# Esimerkki 3

- Takaisinkytkentäverkko voi olla taajudesta riippuva.
  - Analyysi ei siitä oleellisesti muutu.
- Lasketaan kuvan integraattorin suljetun silmukan vahvistus.
- Operaatiovahvistimella on rajallinen jännitevahvistus  $K_v$ , mutta se on muutoin ideaalinen.

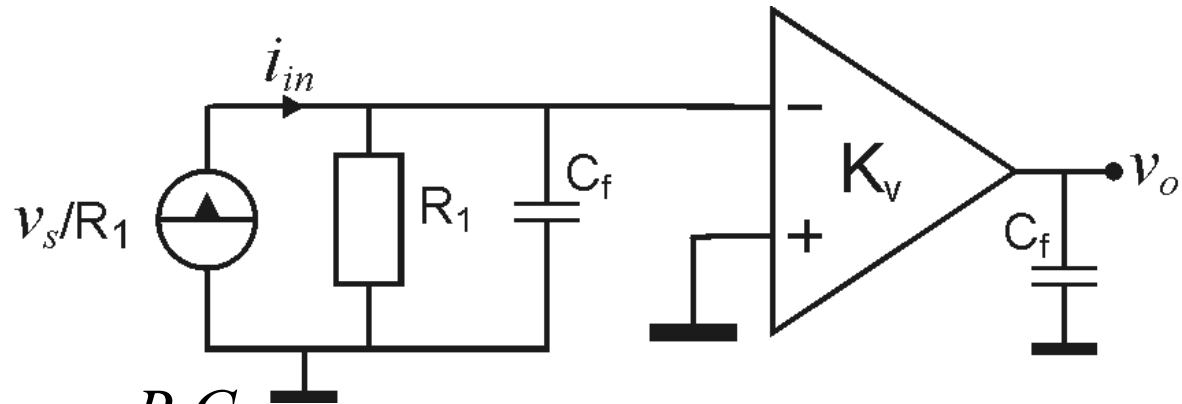


## Esimerkki 3 jatkuu

$$y_{11} = sC_f$$

$$y_{22} = sC_f$$

$$y_{12} = -sC_f$$



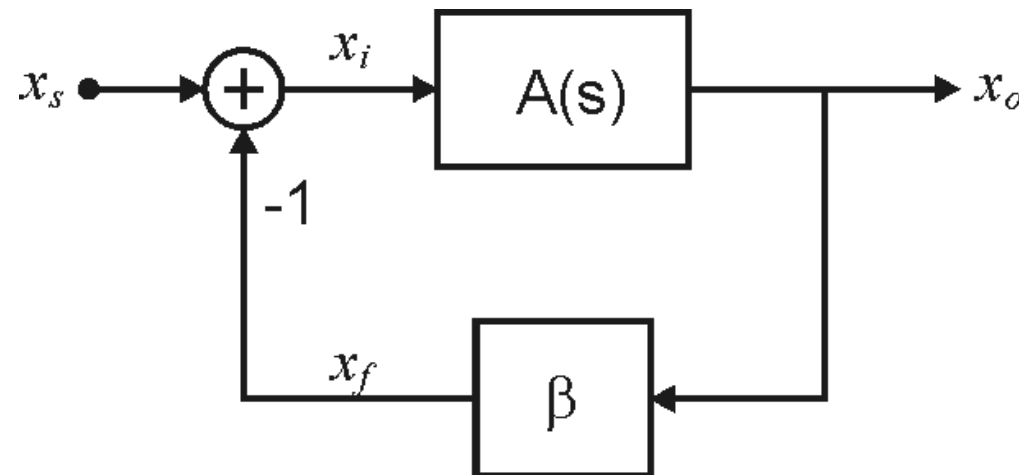
$$\beta A = y_{12} \cdot R_1 \parallel 1/y_{11} \cdot -K_V = \frac{sR_1C_f}{1 + sR_1C_f} K_V \quad \text{Tässä oletetaan } R_i = \infty \text{ ja } R_o = 0.$$

$$A_f = \frac{A}{1 + \beta A} = -\frac{K_V R_1}{1 + sR_1C_f(1 + K_V)}$$

$$V_o = -\frac{K_V R_1}{1 + sR_1C_f(1 + K_V)} \frac{V_s}{R_1} = -\frac{K_V V_s}{1 + sR_1C_f(1 + K_V)} \quad \lim_{K_V \rightarrow \infty} \frac{V_o}{V_s} = -\frac{1}{sR_1C_f}$$

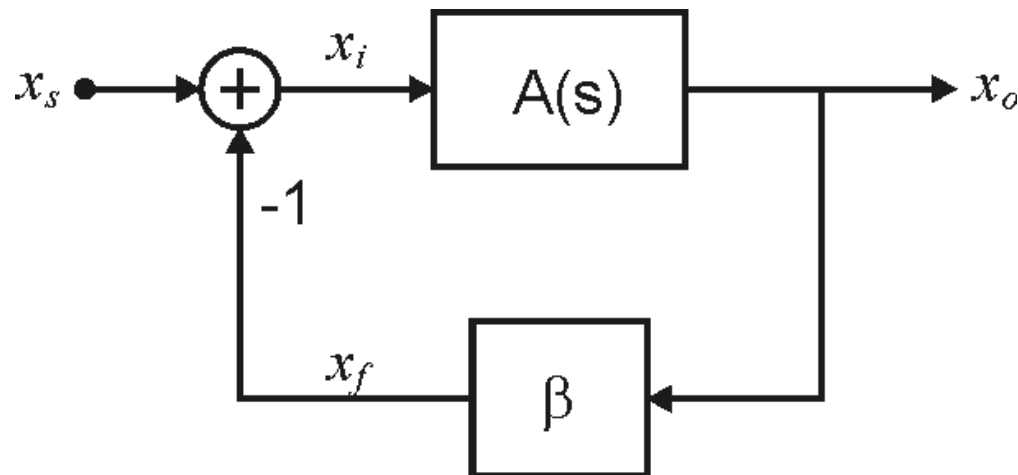
# Stabiilisuus

- Matalilla taajuuksilla  $A(s) \sim K$ , ja silmukavahvistus  $\beta A$  on vakio.
- Korkeammilla taajuuksilla  $A(s)$  muuttuu ja vaihesiirto silmukan ympäri ei välttämättä ole enää  $180^\circ$ .
- Jos silmukavahvistuksen vaihe kääntyy toiset  $180$  astetta, takaisinkytkentä muuttuu positiiviseksi.



# Stabiilisuus

- Oletetaan, että taajuudella  $\omega_{180}$  silmukavahvistuksen vaihesiirto on  $180^\circ$  ja vahvistus on täsmälleen 1.
- Systeemiin syötetään heräte  $x_i = \hat{x}_i \sin(\omega_{180}t)$
- Takaisinkytkentäsignaali:  $x_f = \beta A(j\omega_{180})x_i = -x_i$
- Systeemi ylläpitää signaalin, vaikka heräte poistettaisiin.



# Suljetun silmukan navat

- **Stabiilin systeemin navat sijaitsevat vasemmassa puolitasossa.**
  - (tai yksinkertaisina origossa).
- **Tarkastellaan kahden navan vahvistimen suljetun silmukan vastetta.**

$$A(s) = \frac{K\omega_1\omega_2}{(s + \omega_1)(s + \omega_2)}$$

$$\left(1 + \frac{s}{\omega_1}\right)\left(1 + \frac{s}{\omega_2}\right) = \frac{s^2}{\omega_1\omega_2} + \left(\frac{1}{\omega_1} + \frac{1}{\omega_2}\right)s + 1$$

$$A_f(s) = \frac{A(s)}{1 + \beta A(s)} = \frac{K\omega_1\omega_2}{s^2 + s(\omega_1 + \omega_2) + (1 + \beta K)\omega_1\omega_2}$$

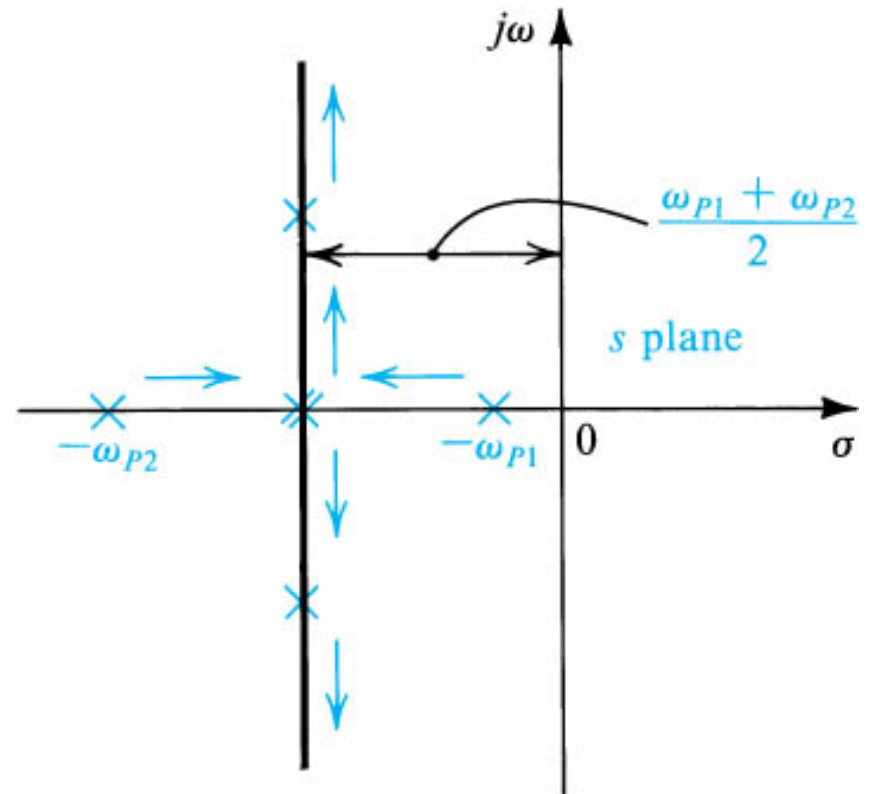
$$\omega_{1f} \approx \frac{(1 + \beta K)\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \approx (1 + \beta K)\omega_1$$

$$\omega_{2f} \approx \omega_1 + \omega_2 \approx \omega_2$$

Tulos pitää paikkansa vain kun suljetun silmukan navat ovat kaukana toisistaan.

# Suljetun silmukan navat

- Koska  $\omega_{1f}$  on suoraan verrannollinen paluuerotukseen mutta  $\omega_{2f}$  ei muutu juurikaan, pitäisi olla helppoa siirtää  $\omega_{1f}$   $\omega_{2f}$ :n yläpuolelle.
- Jos paluuerotus on riittävän suuri  $\omega_{1f}$  ja  $\omega_{2f}$  siirtyvät päällekkäin.
- Sen jälkeen ne muuttuvat kompleksiseksi napapariksi.
- **Navat eivät kuitenkaan siirry millään paluuerotuksen arvolla oikeaan puolitasoon.**



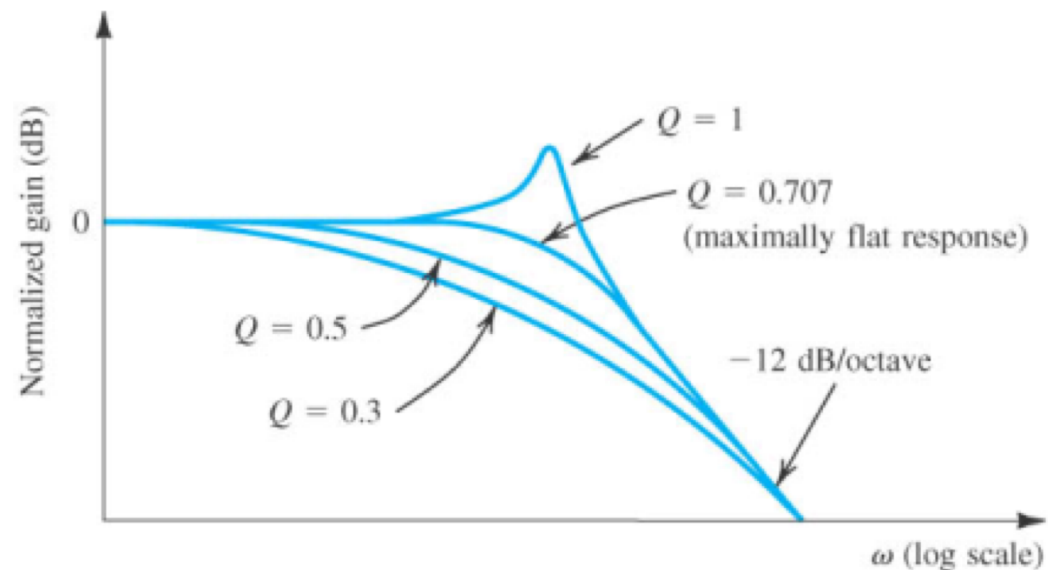
# Toisen asteen t.k. systeemin Q

- Suljetun silmukan siirtofunktion Q saadaan helposti  $A_f$ :n lausekkeesta

$$A_f(s) = \frac{K\omega_1\omega_2}{s^2 + s(\omega_1 + \omega_2) + (1 + \beta K)\omega_1\omega_2} \quad H(s) = \frac{K\omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$$

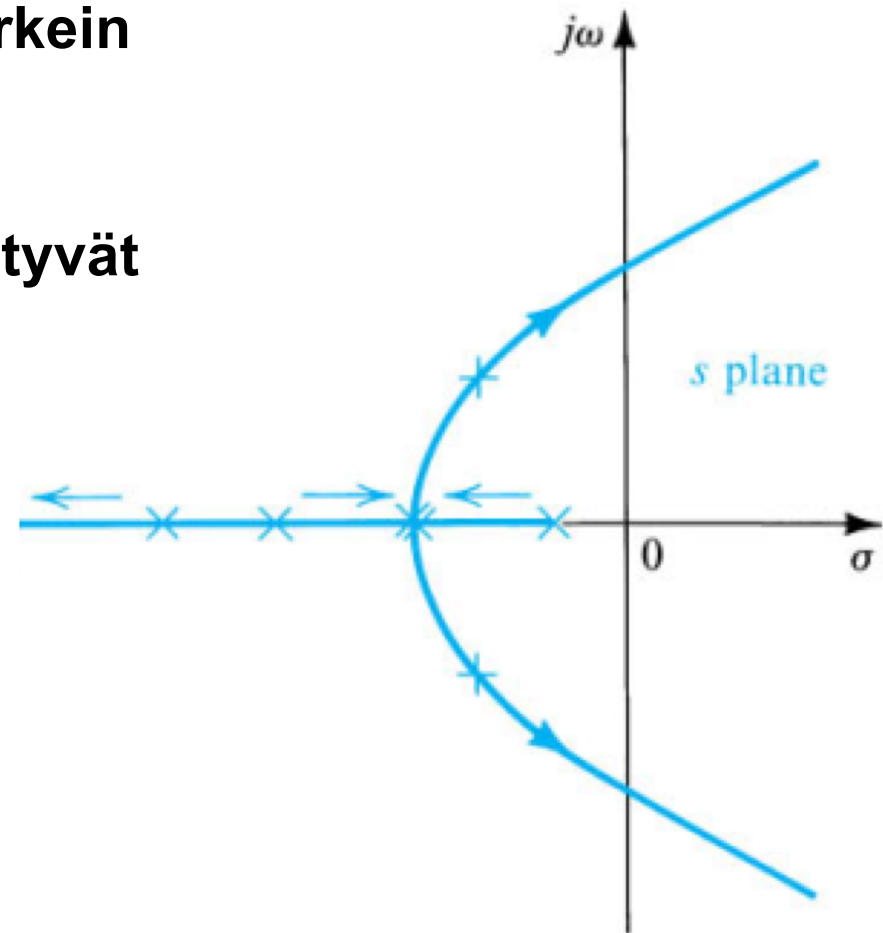
$$\rightarrow Q = \frac{\sqrt{(1 + \beta K)\omega_1\omega_2}}{\omega_1 + \omega_2}$$

Mitä suurempi  
paluuerotus, sitä  
enemmän vaste piikittää.



# Kolmen navan t.k.-vahvistin

- Jos napoja on kolme, niistä korkein siirtyy ylös paluuerotuksen kasvaessa.
- Kaksi matalampaa napaa lähestyvät toisiaan ja muuttuvat kompleksiseksi pariksi.
- Paluuerotuksen kasvaessa edelleen, ne siirtyvät oikeaan puolitason.
- **Vahvistimesta tulee epästabiili.**



# Stabiilisuusanalyysi Bode-diagrammilla

- Stabiilisuus voidaan tutkia suoraan silmukkahavvistuksen Bode-diagrammista.

**Stabiilisuusehto:**

$|\beta A| < 1$ , kun vaihe  $= -180^\circ$ .

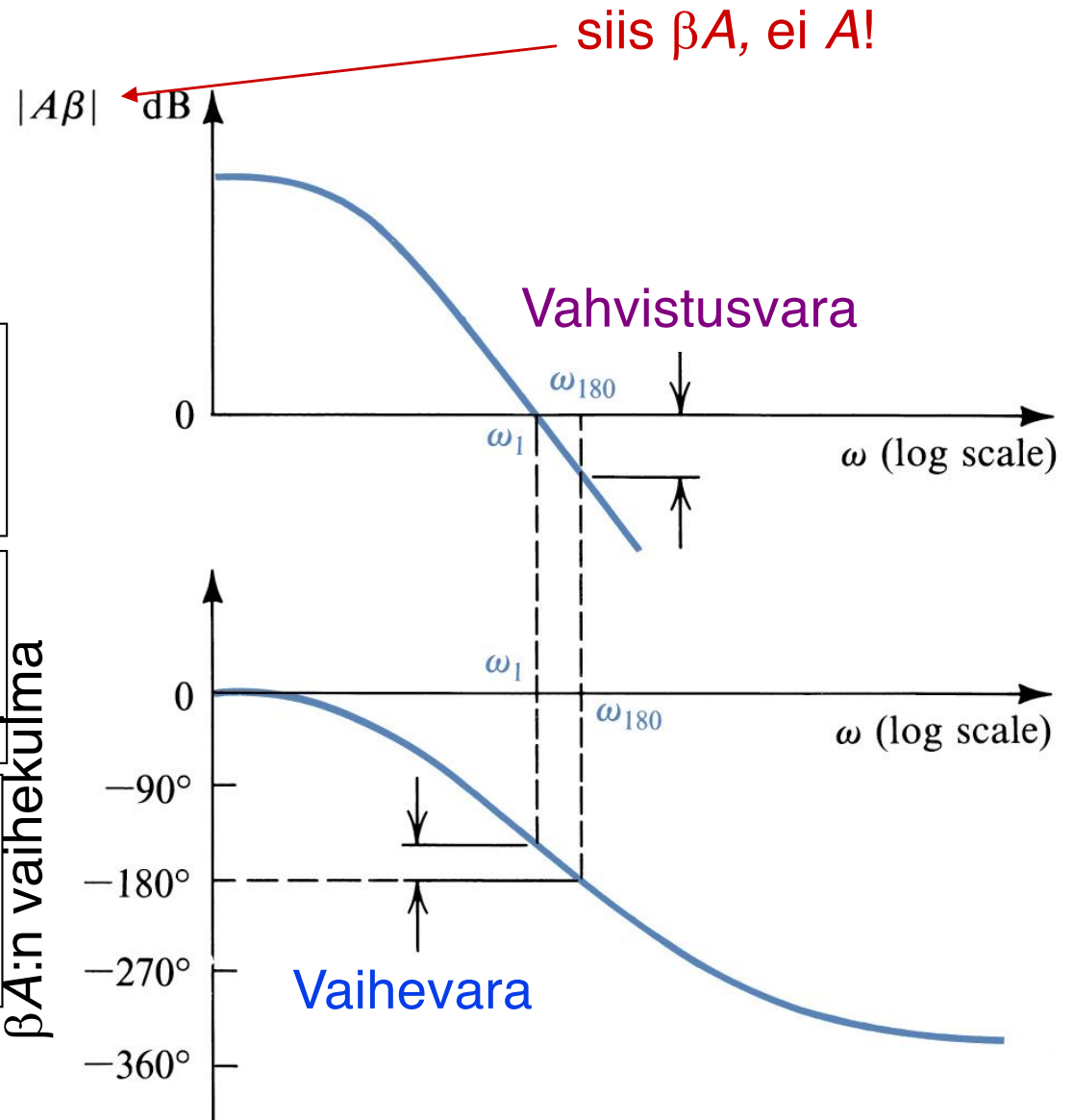
**Vaihevara:**

Ero  $-180^\circ$  :n, kun  $|\beta A| = 1$ .

**Vahvistusvara:**

Vahvistuksen ero 1:n, kun vaihe  $= -180^\circ$ .

$\beta A$ :n vaihekulma



$\beta A$  ei A

Silmukkevahvistus  $\beta A$  määrää stabiiliuden.

Siis ei avoimen silmukan vahvistus A.

~~A~~ HUONO ☹️☹️☹️

$\beta A$  HYVÄ 😊😊😊

# Esimerkki 4

- Vahvistimella on kaksi napaa  $p_1$  ja  $p_2=10p_1$ . Sen avoimen silmukan DC-vahvistus on 60dB ja se kytketään takaisin niin, että  $A_f=20\text{dB}$ .

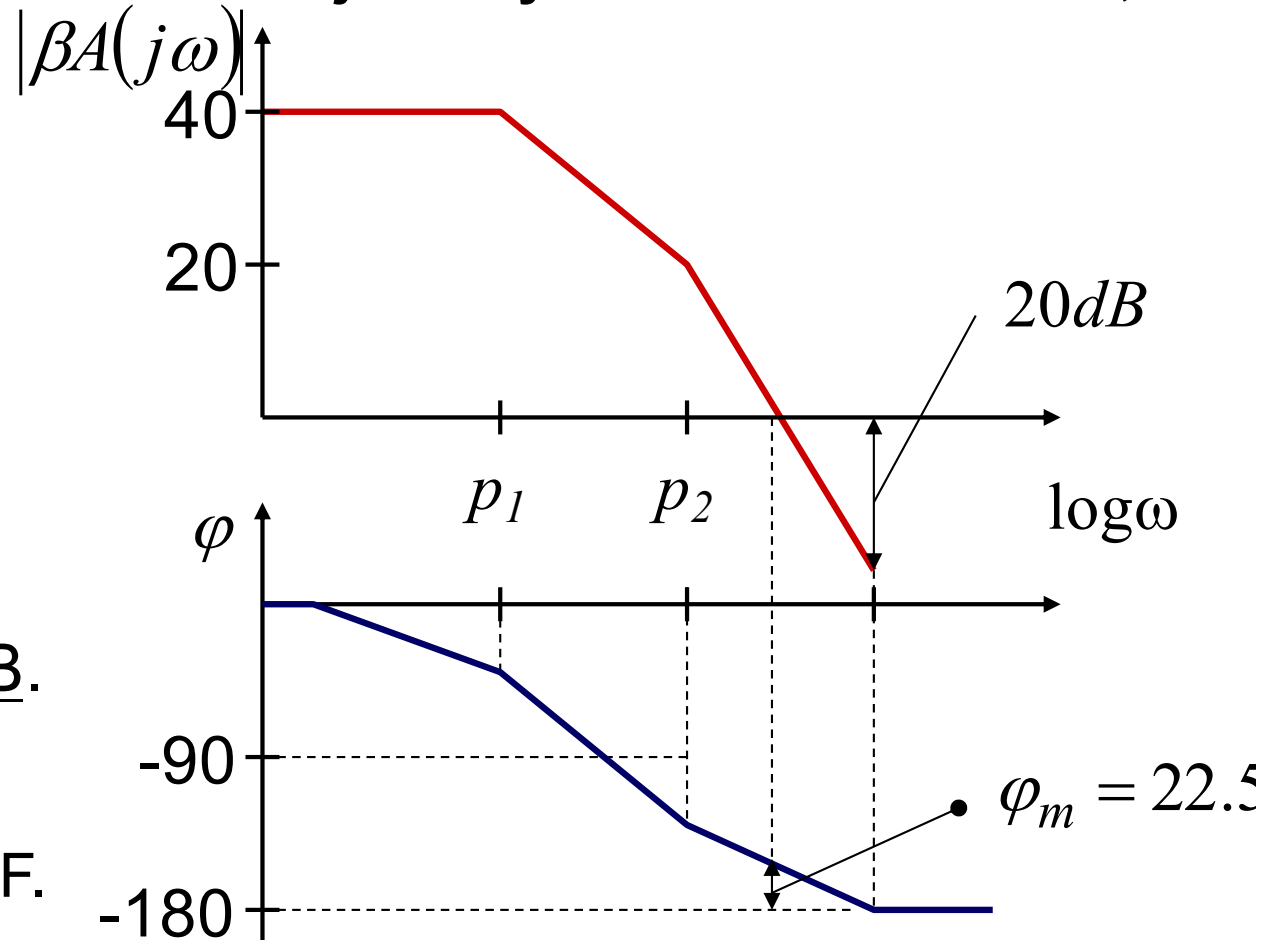
$$\beta \approx \frac{1}{A_f} = 0.1$$

$$\rightarrow \beta A[\text{dB}] = 40\text{dB}$$

Vaihevara 22.5°.

Vahvistusvara 20dB.

Vaihevara on aika heikko. Yleensä  $p_2 \geq \text{UGF}$ .



# Esimerkki 5

- Vahvistimella on navat taajuuksilla 1kHz, 100kHz, 400kHz. Sen DC-vahvistus on 40dB ja se on yksikkötakaisinkytketty ( $\beta=1$ ).

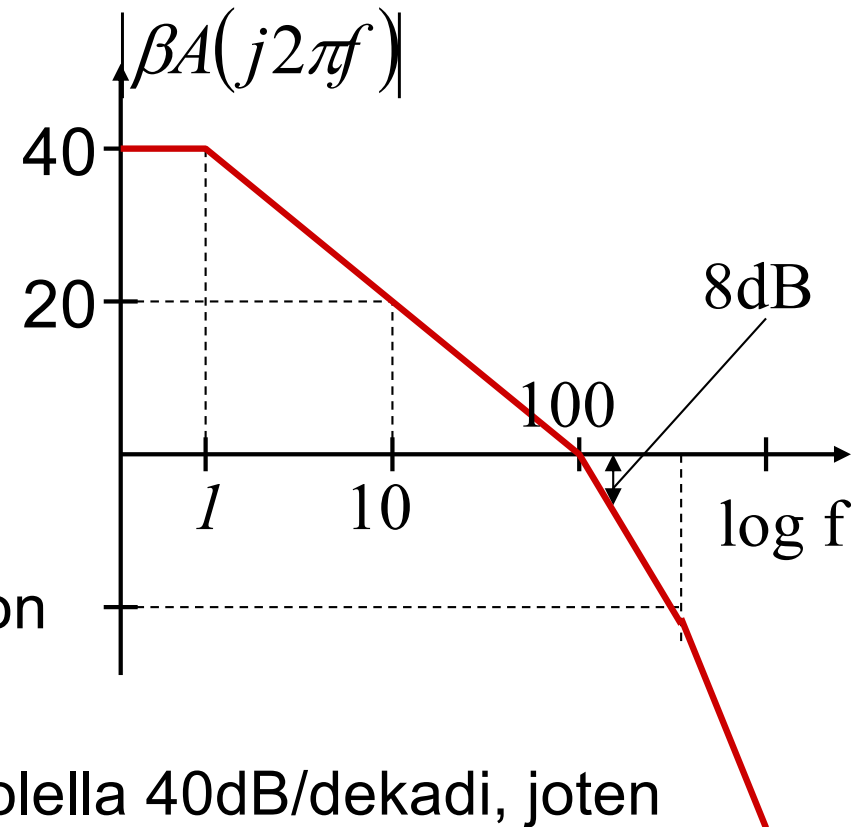
Lasketaan tarkka vaihe UGF:llä 100kHz.

$$\varphi = -\tan^{-1}\left(\frac{100}{1}\right) - \tan^{-1}(1) - \tan^{-1}\left(\frac{100}{400}\right) \approx -148.5^\circ$$

→Vaihevara 31.5°.

Ratkaistaan numeerisesti milloin vaihe on  $-180^\circ$  :→  $f_{-180}=201\text{kHz}$ .

Toisaalta vahvistus putoaa UGF:n yläpuolella 40dB/dekadi, joten vahvistusvara on  $\log_{10}(201\text{kHz}/100\text{kHz}) * 40\text{dB} \approx \underline{12\text{dB}}$ .



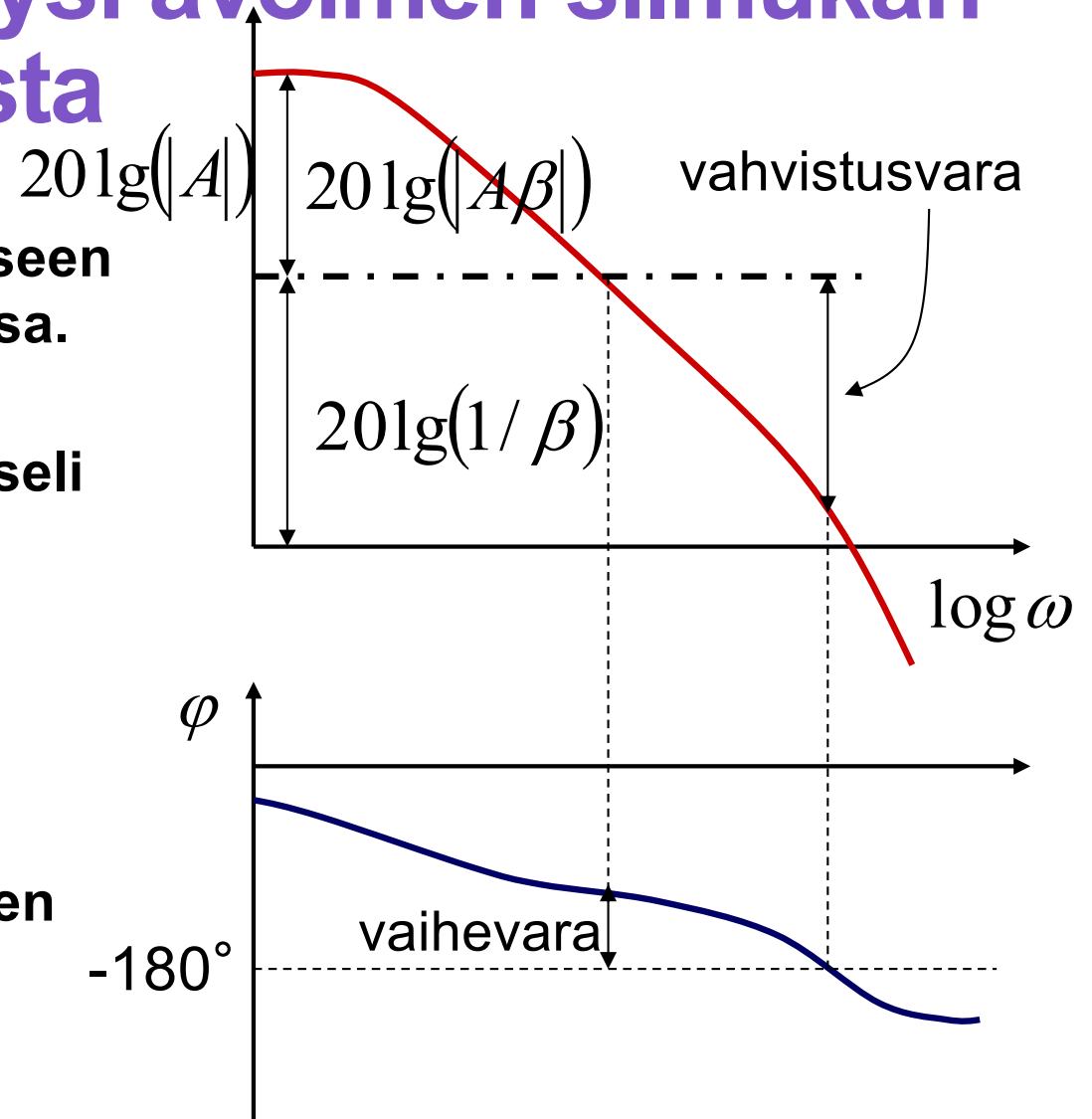
# Stabiilisuusanalyysi avoimen silmukan Bode diagrammista

Jos  $\beta$  ei riipu taajuudesta, se vaikuttaa silmukka-vahvistukseen ainoastaan vertikaalisuunnassa.

Analyysi voidaan tehdä käänteisesti lisäämällä  $1/\beta$ -akseli avoimen silmukan Bode diagrammiin.

$1/\beta$  -akselin ja  $A$ :n leikkauskohdan taajuudelta voidaan lukea vaihevara.

Mahdollistaa nopeasti erilaisten vaihevara/ $A_f$ -kombinaatioiden tutkimisen.



# Esimerkki 6

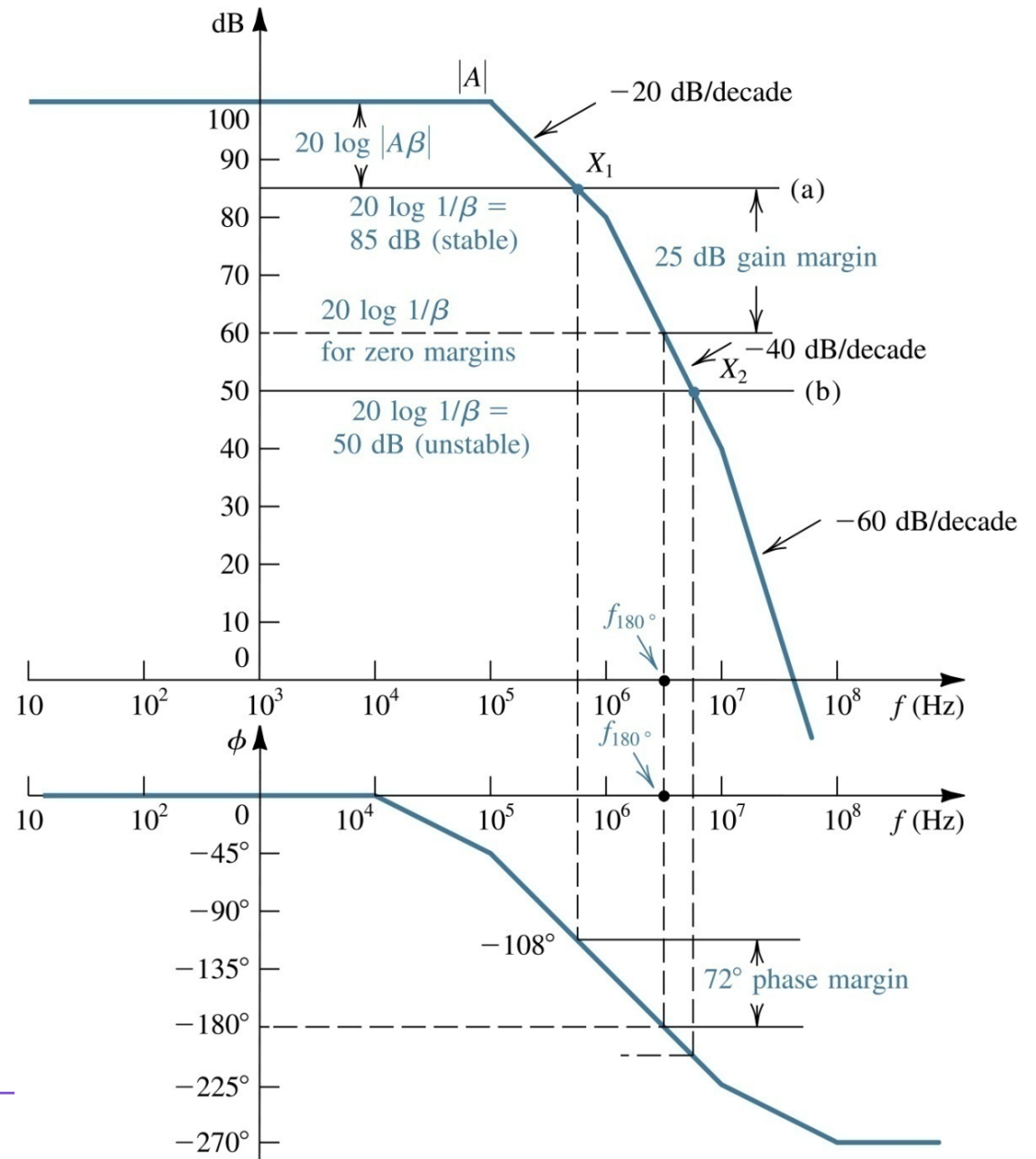
- Kuvasta:
- Napataajuudet:
  - $2 \times 10^5$ ,  $2 \times 10^6$  ja  $2 \times 10^7$ .

a) Suljetun silmukan vahvistus  $A_f = 85$  dB

- vaihevara  $72^\circ$
- vahvistusvara 25 dB

b) Suljetun silmukan vahvistus  $A_f = 50$  dB

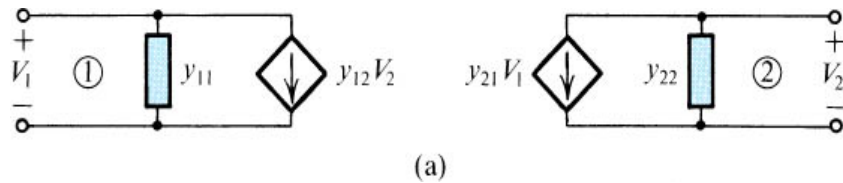
- vaihe- ja vahvistusvara negatiivinen
- $\rightarrow$  piiri on epästabiili



# Tavoitteet

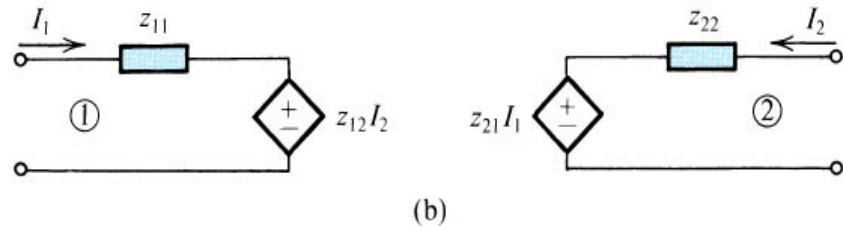
- **Tietää**
  - Takaisinkytkentään liittyvät tärkeimmät käsitteet
  - Avoimen ja suljetun silmukan vahvistus
  - Takaisinkytkentäkerroin  $\beta$ .
  - Paluuerotus ja silmukkavahvistus
  - Vaihe- ja vahvistusmarginaali
  - Takaisinkytkentälajit
- **Ymmärtää**
  - Takaisinkytkennän vaikutus vahvistimen ominaisuuksiin.
  - Lähteen, kuorman ja takaisinkytkentäverkon vaikutus paluuerotukseen ja silmukkavahvistukseen.
  - Miksi takaisinkytketty vahvistin voi olla epästabiili
- **Soveltaa**
  - Analysoida idealisten t.k. systeemien eri ominaisuuksia.
  - Tunnistaa takaisinkytkentälajit.
  - Analysoida sarja-rinnan ja rinnan-rinnan t.k.-vahvistimia epäideaalisuudet huomioon ottaen.
  - Analysoida takaisinkytketyn vahvistimen stabiilisuutta Bode-diagrammin avulla.

# Liite: kaksiporittiparametrit



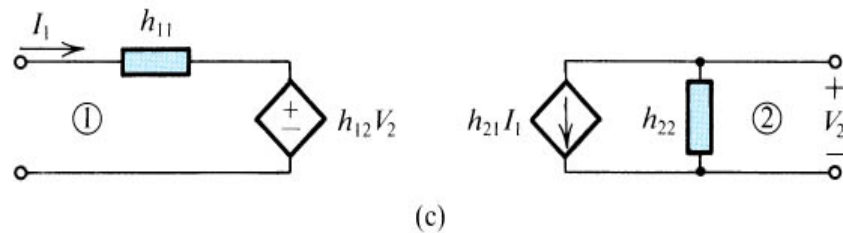
$$I_1 = y_{11}V_1 + y_{12}V_2$$

$$I_2 = y_{21}V_1 + y_{22}V_2$$



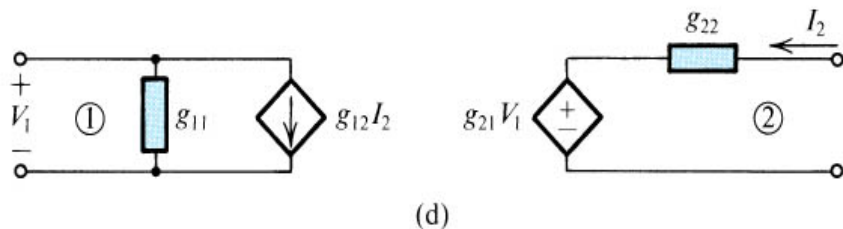
$$V_1 = z_{11}I_1 + z_{12}I_2$$

$$V_2 = z_{21}I_1 + z_{22}I_2$$



$$V_1 = h_{11}I_1 + h_{12}V_2$$

$$I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}V_2$$



$$I_1 = g_{11}V_1 + g_{12}I_2$$

$$V_2 = g_{21}V_1 + g_{22}I_2$$