

# A?

Aalto-yliopisto  
Sähkötekniikan  
korkeakoulu

# Taajuuskompen- sointi

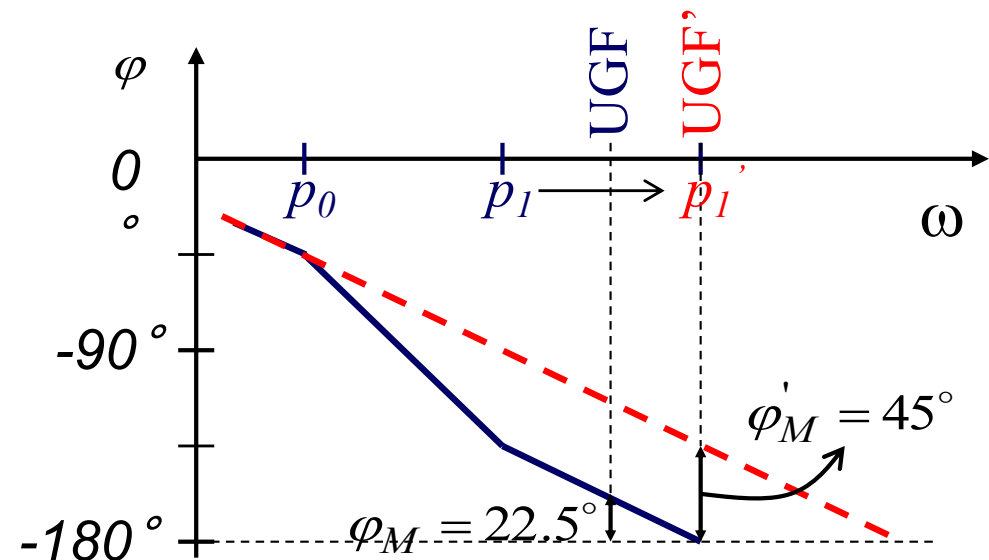
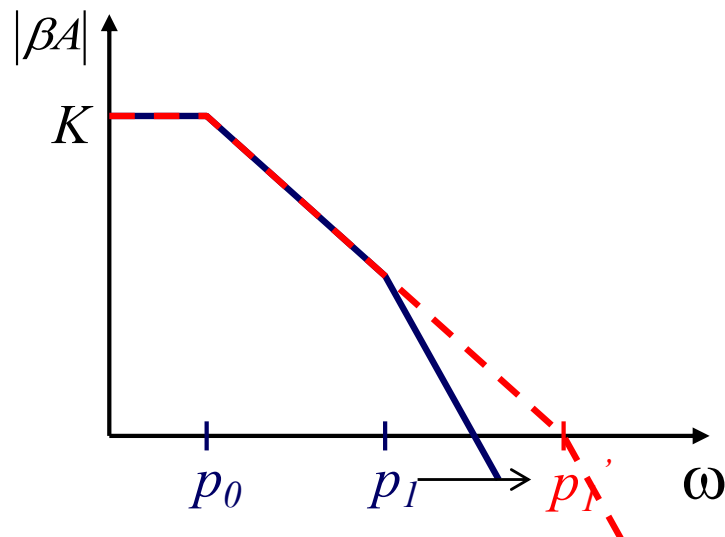
*ELEC-C3230 Elektronikka I (Ryynänen)*

# Luennon pääkohdat

- **Taajuuskompensointi**
  - Lisäkapasitanssilla
  - Miller-kompensointi
  - Esimerkkinä kaksiasteinen operaatiovahvistin

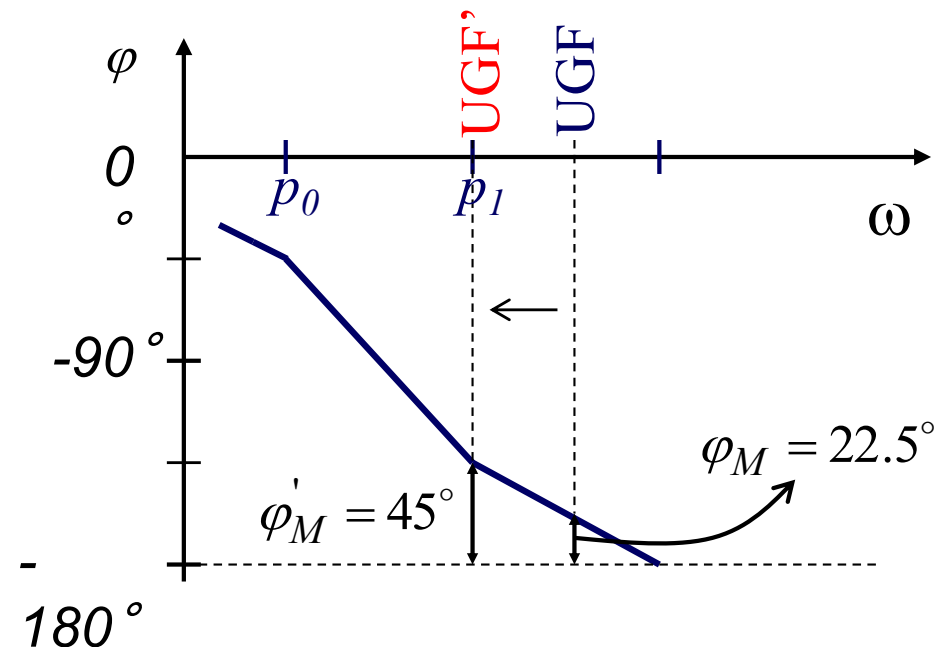
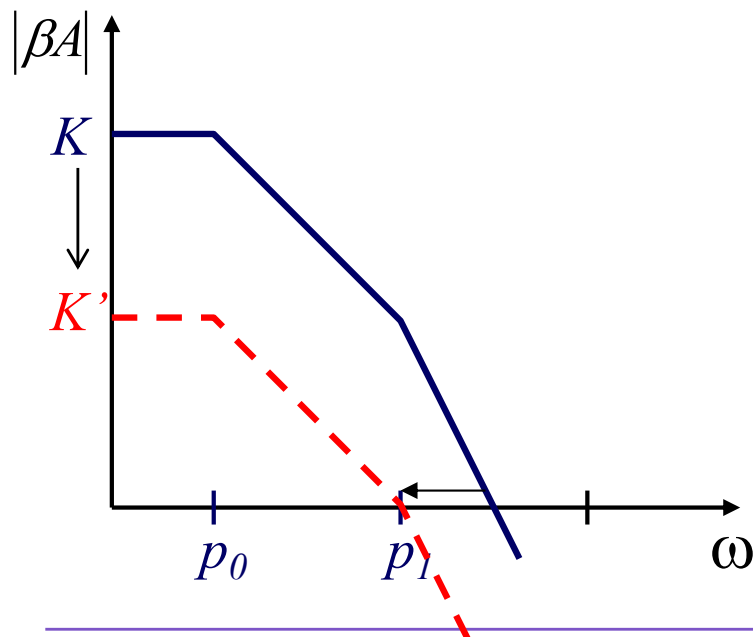
# Takaisinkytketyn vahvistimen stabilointi

- Epästabiilius t.k.-vahvistimissa on seurausta liian suuresta negatiivisesta vaihesiirrosta yksikkövahvistustaajuudella UGF.
- Vahvistin voidaan teoriassa suunnitella niin, että ylimääräiset navat ja nollat ovat riittävän korkealla taajuudella UGF:ään verrattuna
- Usein vaikeaa toteuttaa ilman kohtuutonta tehonkulutusta.



# Takaisinkytketyn vahvistimen stabilointi

- Pudotetaan DC-vahvistusta, jolloin UGF siirtyy matalammalle taajuudelle.
- Haittapuolena on tietenkin se, että paluuerotus heikkenee, jolloin takaisinkytkentä toimii vähemmän ideaalisesti.

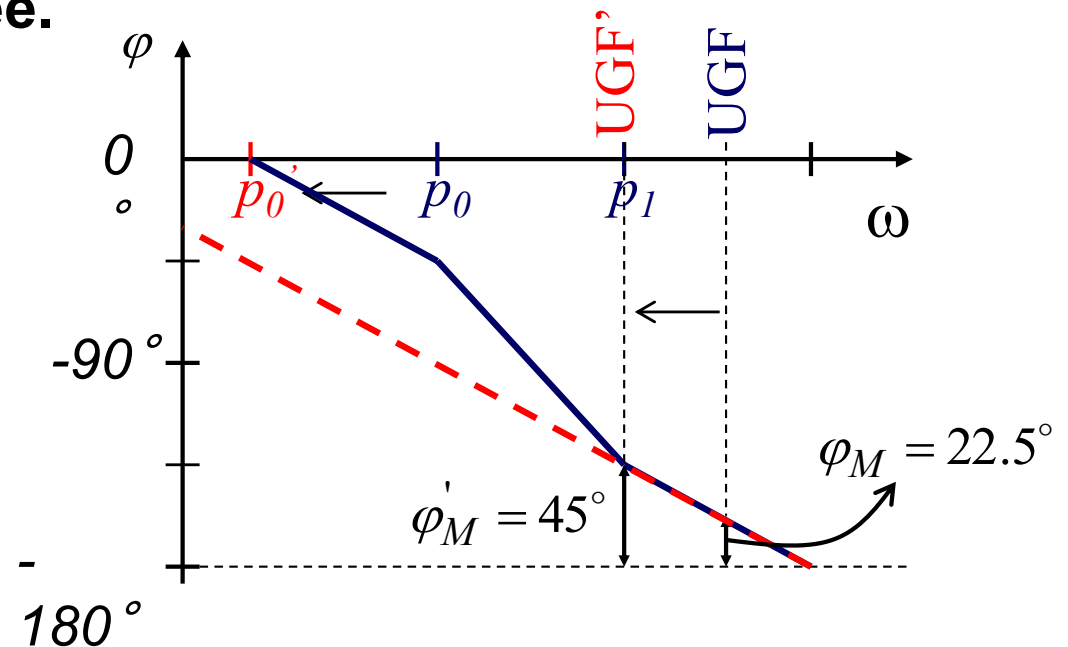
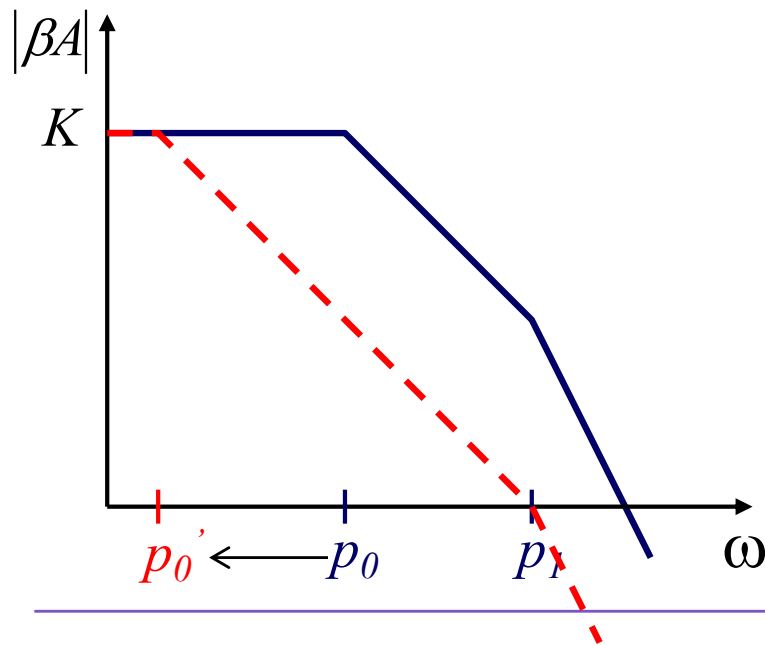


# Taajuuskompensointi

- **Valitaan yksi navoista määrääväksi.**
  - Navan taajuutta siirretään alas lisäämällä kapasitanssia piiriin.
  - Jos mahdollista siirretään muita napoja ylös.
- **Vahvistin voidaan kompensoida stabiiliksi**
  1. **Yksikkötakaisinkytkettynä**
    - Vahvistin on stabiili suljetun silmukan vahvistuksesta riippumatta
  2. **Minimivahvistuksella  $A_f$  (alikompensointi)**
    - Silmukkavahvistus on matalampi kuin yksikkötakaisinkytkennässä.
    - Saavutetaan laajempi kaistanleveys.
- **Kompensoinin toteutus:**
  - Lisäkapasitanssi
  - Miller
- **Stabiiliuden raja on  $0^\circ$  :n vaihemarginaali. Vahvistimia ei koskaan suunnitella siihen vaan usein välille  $\varphi_m=45^\circ -60^\circ$  .**

# Kompensointi lisäkapasitanssilla

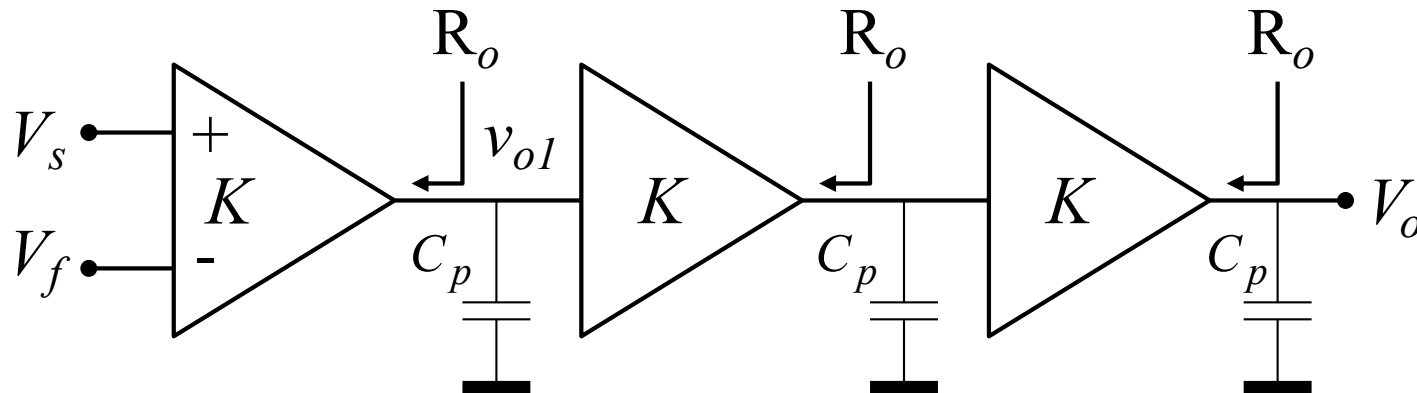
- Lisätään piiriin kondensaattori, joka siirtää yhtä napaa ja samalla UGF:ää alas.
- Yleensä siirretään napaa, joka on valmiiksi alimpana.
- **Paluuerotus matalilla taajuuksilla ei heikkene.**
- **Kaistanleveys tosin kapenee.**



# Esimerkki 1

- Kuvan vahvistimessa on kolme astetta.
- Jokaisen asteen DC-jännitevahvistus  $K=20\text{dB}$ ,  $R_o=100\text{k}\Omega$  ja lähtöön liittyvä kapasitanssi  $C_p=0.5\text{pF}$ .
- Taajuuskompensoidaan piiri niin, että  $\varphi_m > 45^\circ$  yksikkötakaisinkytkennässä.

$$A(s) = \left( K \frac{1/sC_p}{R_o + 1/sC_p} \right)^3 = \left( \frac{K}{1 + sR_oC_p} \right)^3$$

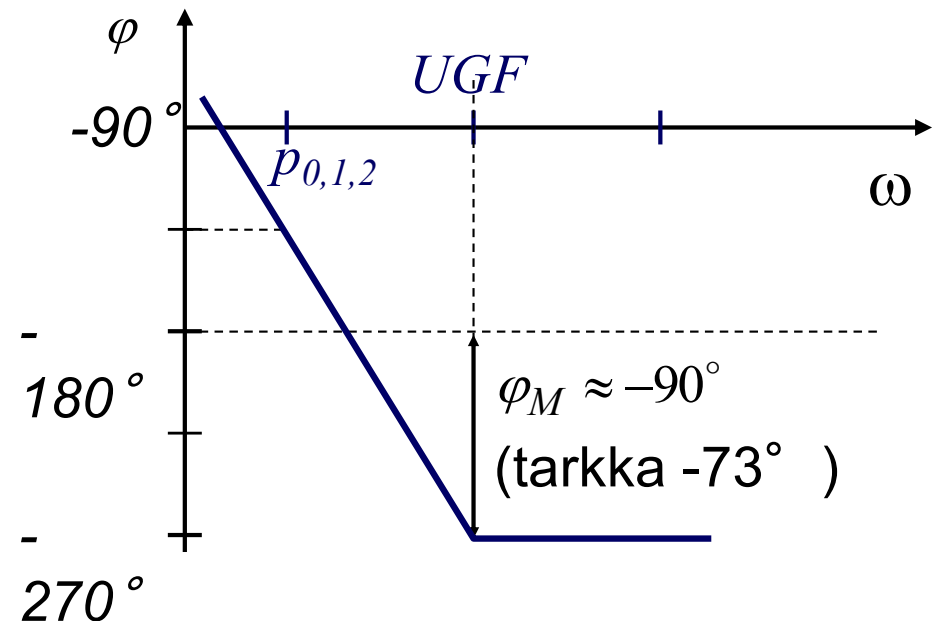
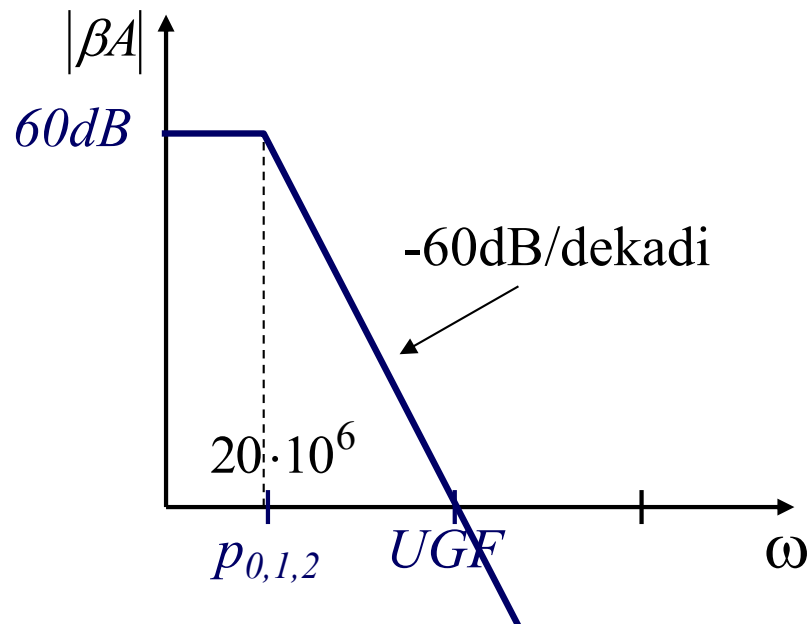


# Esimerkki 1 jatkuu

$$p_{0,1,2} = -\frac{1}{R_o C_p} = 20 \cdot 10^6 \text{ rad/s} \quad UGF \approx 200 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$$

$$\varphi_m = 180^\circ - 3 \tan^{-1} \frac{UGF}{\omega_{p0,1,2}} \approx -73^\circ$$

Vahvistin olisi yksikkötakaisinkytkennässä epästabiili.





# Esimerkki 1 jatkuu

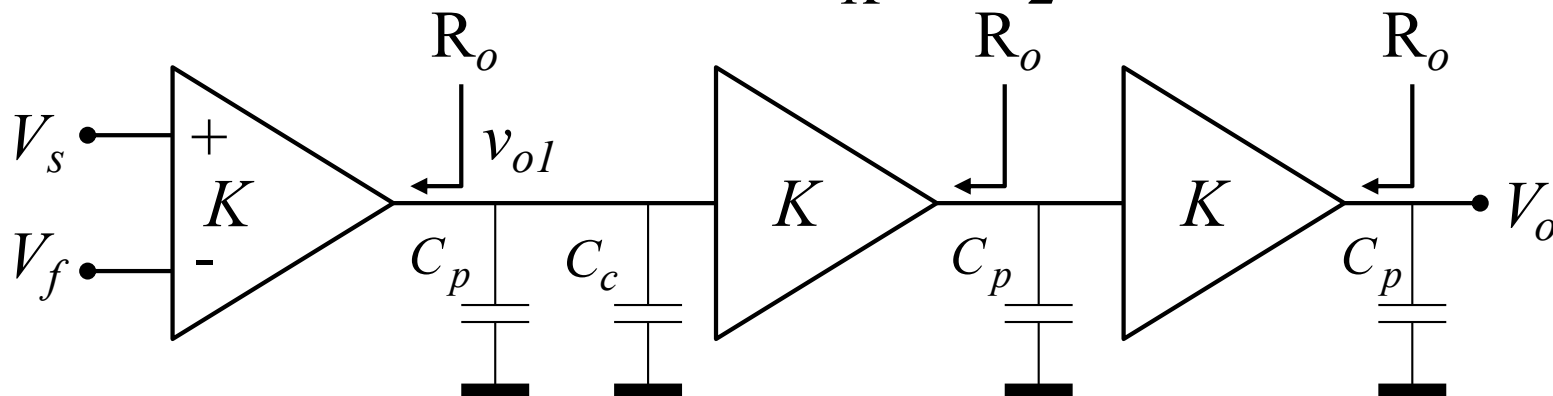
- Stabiloidaan vahvistin siirtämällä yhtä navoista alaspäin.
  - $C_{p0}$ :n rinnalle lisätään kompensointikondensaattori  $C_c$ .
  - Jos dominoiva napa olisi paljon UGF:n alapuolella ja kaksi korkeampaa napaa UGF:llä, olisi vaihevara  $0^\circ$ .
- Korkeampien napojen  $p_{1,2}$  on oltava UGF:n yläpuolella.

$$\Rightarrow UGF \approx K^3 \omega'_{p0}$$

$$\varphi_m = 180^\circ - 90^\circ - 2 \tan^{-1} \frac{UGF}{\omega_{p1,2}}$$

$$UGF = \omega_{p1,2} \tan \frac{1}{2} (90^\circ - \varphi_m)$$

$$\omega'_{p0} = \frac{\omega_{p1,2}}{K^3} \tan \frac{1}{2} (90^\circ - 45^\circ) = 8.3 \cdot 10^3 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

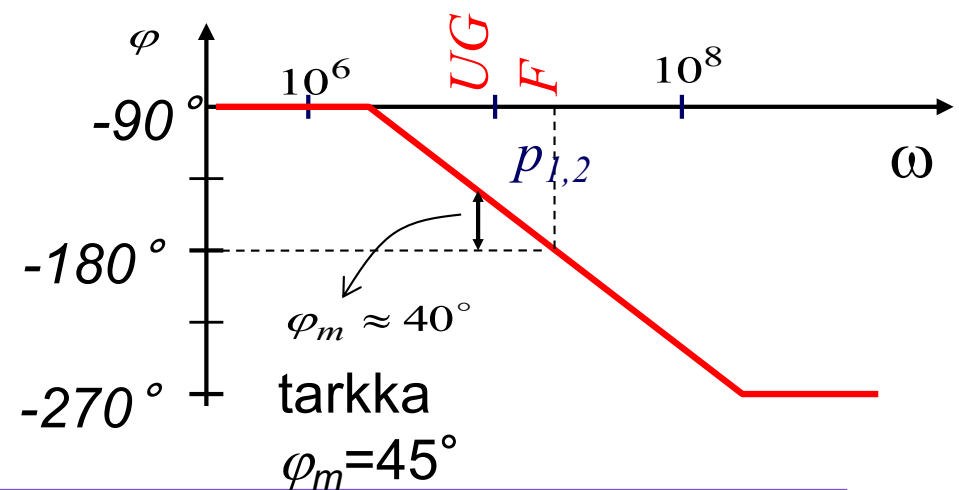
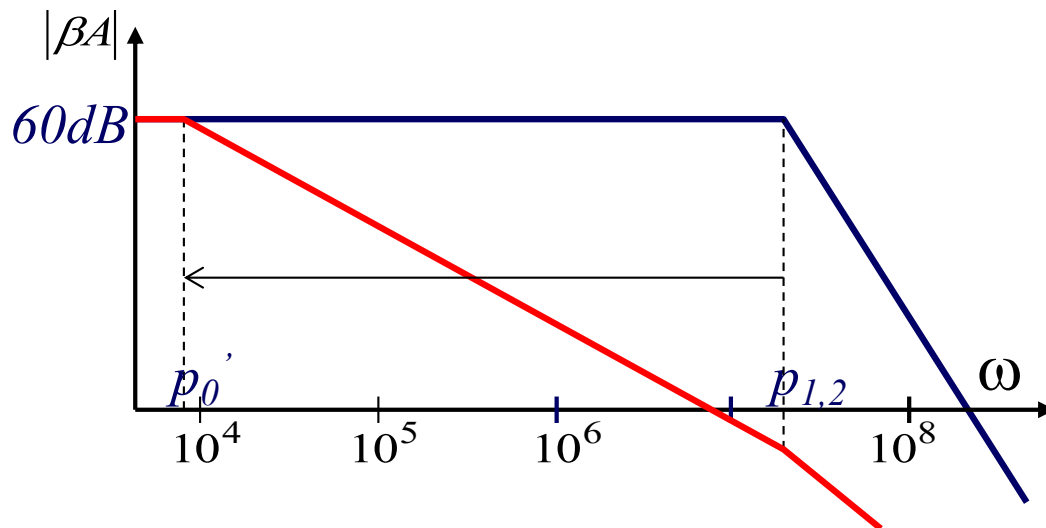


# Esimerkki 1 jatkuu

- Lasketaan kompensatiokondensaattorin  $C_c$  kapasitanssi ja piirretään stabiloitu Bode-diagrammi:

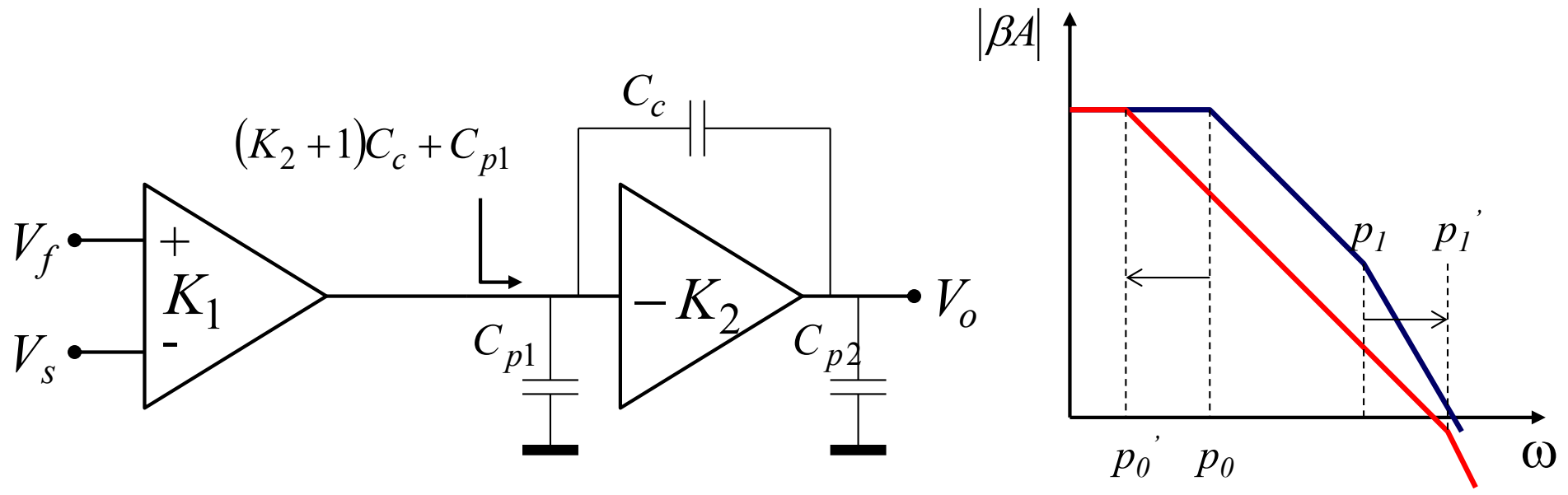
$$\omega'_{p0} = \frac{1}{R_o(C_p + C_c)} \Rightarrow C_c = \frac{1}{R_o\omega'_{p0}} - C_p \approx \underline{1.2nF}$$

- Ylärajataajuus putosi yli kolme dekadia.
- 1.2nF on aivan liian suuri integroituihin toteutuksiin.



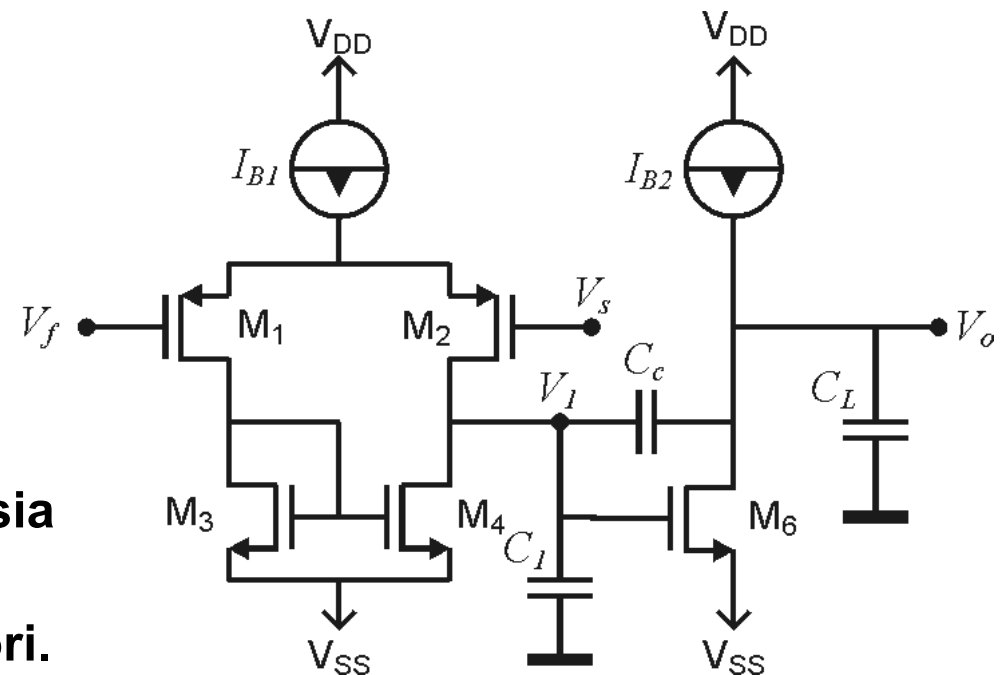
# Miller-kompensointi

- **Miller-efekti** kertoo kapasitanssin asteen jännitevahvistuksella.
- Tehokas tapa synnyttää dominoiva napa.
- **Lisäksi Miller-kompensointi siirtää asteen lähtöön syntyvää napaa ylöspäin.**
  - Merkittävä etu verrattuna pelkkään yhden navan siirtämiseen alas.

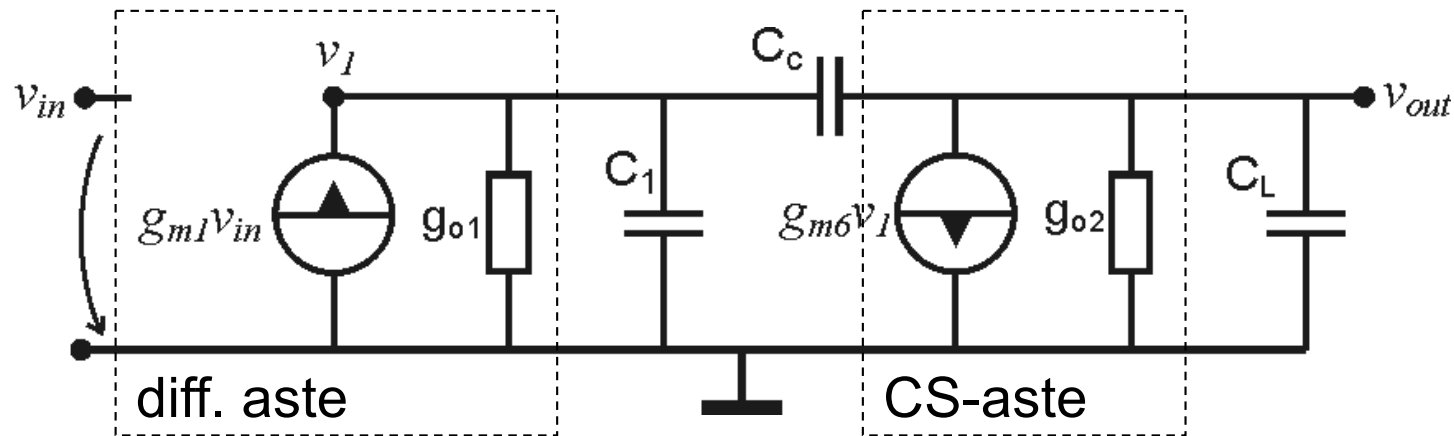


# Kaksiasteinen operaatiovahvistin

- Transistorit  $M_1$ - $M_4$  muodostavat differentiaaliasteen.
  - Osa differentiaaliasteen parasiittisista kapasitansseista on jätetty huomiotta.
- $M_6$  on CS-aste, jolla on aktiivikuorma ( $I_{B2}$ ).
- $C_1$ :een on sisällytetty  $M_{2,4,6}$ :n parasiittisia kapasitansseja.
- $C_L$  on lähdössä näkyvä kuormakapasitanssi, johon on sisällytetty  $M_6$ :n ja  $I_{B2}$ :n parasiittisia kapasitansseja.
- $C_c$  on kompensointikondenssaattori.



# Piensignaalisijaiskytkentä



$$g_{o1} = g_{ds2} + g_{ds4}$$

$$g_{o2} = g_{ds6} + g_{IB2}$$

Solmuyhtälö  $v_1$ :ssä:

$$(g_{o1} + sC_1 + sC_c)v_1 - sC_c v_{out} = g_{m1}v_{in} \quad \Rightarrow \quad v_1 = \frac{g_{m1}v_{in} + sC_c v_{out}}{g_{o1} + sC_1 + sC_c}$$

ja lähdössä:

$$(g_{o2} + sC_L + sC_c)v_{out} - sC_c v_1 = -g_{m6}v_1$$

$$\Rightarrow (g_{o2} + sC_L + sC_c)v_{out} = -(g_{m6} - sC_c)v_1$$

# Siirtofunktio

Sijoitetaan  $v_1$ : ja lasketaan  $v_{out}/v_{in}$ :

$$(g_{o2} + sC_L + sC_c)v_{out} = -(g_{m6} - sC_c) \frac{g_{m1}v_{in} + sC_c v_{out}}{g_{o1} + sC_1 + sC_c}$$

$$\left[ (g_{o2} + sC_L + sC_c) + \frac{sC_c(g_{m6} - sC_c)}{g_{o1} + sC_1 + sC_c} \right] v_{out} = -\frac{g_{m1}(g_{m6} - sC_c)}{g_{o1} + sC_1 + sC_c} v_{in}$$

$$\frac{(g_{o2} + sC_L + sC_c)(g_{o1} + sC_1 + sC_c) + sC_c(g_{m6} - sC_c)}{g_{o1} + sC_1 + sC_c} v_{out} = -\frac{g_{m1}(g_{m6} - sC_c)}{g_{o1} + sC_1 + sC_c} v_{in}$$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{g_{m1}(g_{m6} - sC_c)}{s^2(C_L C_1 + C_c C_1 + C_L C_c) + s[g_{o1}(C_L + C_c) + g_{o2}(C_1 + C_c) + g_{m6} C_c] + g_{o1} g_{o2}}$$

# Navat

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{g_{m1}(g_{m6} - sC_c)}{s^2(C_L C_1 + C_c C_1 + C_L C_c) + s[g_{o1}(C_L + C_c) + g_{o2}(C_1 + C_c) + g_{m6}C_c] + g_{o1}g_{o2}}$$

Olettaen, että  $\omega_{p1} \gg \omega_{p0}$  (ja  $g_m \gg g_{ds}$ ,  $C_{L|c} \gg C_1$ ):

$$\left(1 + \frac{s}{\omega_{p0}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{p1}}\right) = \frac{s^2}{\omega_{p0}\omega_{p1}} + \left(\frac{1}{\omega_{p0}} + \frac{1}{\omega_{p1}}\right)s + 1 \approx \frac{s^2}{\omega_{p0}\omega_{p1}} + \frac{1}{\omega_{p0}}s + 1$$

$$p_0 \approx -\frac{g_{o1}g_{o2}}{g_{o1}(C_L + C_c) + g_{o2}(C_1 + C_c) + g_{m6}C_c} \approx -\frac{g_{o1}}{g_{m6}/g_{o2} C_c}$$

$$p_1 \approx -\frac{g_{o1}(C_L + C_c) + g_{o2}(C_1 + C_c) + g_{m6}C_c}{C_L C_1 + C_c C_1 + C_L C_c} \approx -\frac{g_{m6}}{C_L}$$

# Navat ja nolla

$$p_0 \approx -\frac{g_{o1}}{g_{m6}/g_{o2} C_c} \quad p_1 \approx -\frac{g_{m6}}{C_L} \quad z_0 = +\frac{g_{m6}}{C_c}$$

DC jännitevahvistus:  $K = -\frac{g_{m1}}{g_{o1}} \frac{g_{m6}}{g_{o2}}$

Jos  $\omega_{p1}$  ja  $\omega_{z0} > UGF$  (niin kuin on oltava, jotta  $\varphi_m > 45^\circ$ ), niin

$$UGF \approx K\omega_{p0} = \frac{g_{m1}}{g_{o1}} \frac{g_{m6}}{g_{o2}} \frac{g_{o1}}{g_{m6}/g_{o2} C_c} = \frac{g_{m1}}{C_c}$$

Nähdään, että  $z_0$ :n taajuus  
suhteessa UGF:ään ei riipu  $C_c$ :stä:  $\frac{\omega_{z0}}{UGF} = \frac{g_{m6}}{g_{m1}}$

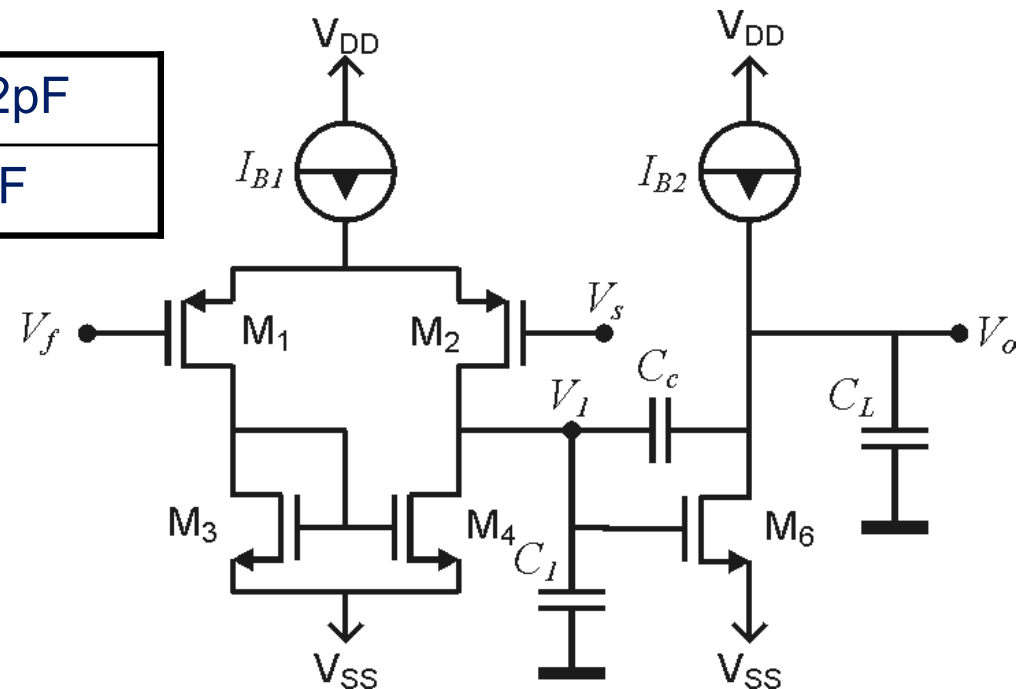
→  $z_0$ :n vaikutus vaihemarginaaliin ei riipu  $C_c$ :stä



# Esimerkki 2

$W/L_{1,2}$	10/1
$W/L_6$	30/1
$K_n'$	$50\mu\text{A}/\text{V}^2$
$K_p'$	$15\mu\text{A}/\text{V}^2$
$\lambda$	0.01
$I_{B1}$	0.2mA
$I_{B2}$	1mA

$C_1$	0.2pF
$C_L$	5pF



- Mitoitetaan  $C_c$  niin, että vaihevaraksi tulee  $60^\circ$  .

$$g_{m1} = \sqrt{2K_p' W / L_1 \frac{I_{B1}}{2}} = 0.173\text{mS}$$

$$g_{m6} = \sqrt{2K_n' W / L_6 I_{B2}} = 1.73\text{mS}$$

$$g_{o1} = \lambda I_{B1} = 2\mu\text{S}$$

$$g_{o2} = \lambda I_{B2} = 10\mu\text{S}$$

$$\Rightarrow K = -\frac{g_{m1}}{g_{o1}} \frac{g_{m6}}{g_{o2}} = -1.5 \cdot 10^4 (83.5\text{dB})$$

# Esimerkki 2 jatkuu

- Lasketaan  $z_0$ :n etäisyys UGF:stä:  $\frac{\omega_{z0}}{UGF} = \frac{g_{m6}}{g_{m1}} = 10$
- Toinen napa:  $\omega_{p1} \approx \frac{g_{m6}}{C_L} = 346 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$
- Lasketaan UGF vaihemarginaalista:

$$\varphi_m \approx 180^\circ - 90^\circ - \tan^{-1} \frac{UGF}{\omega_{p1}} - \tan^{-1} \frac{UGF}{\omega_{z0}}$$

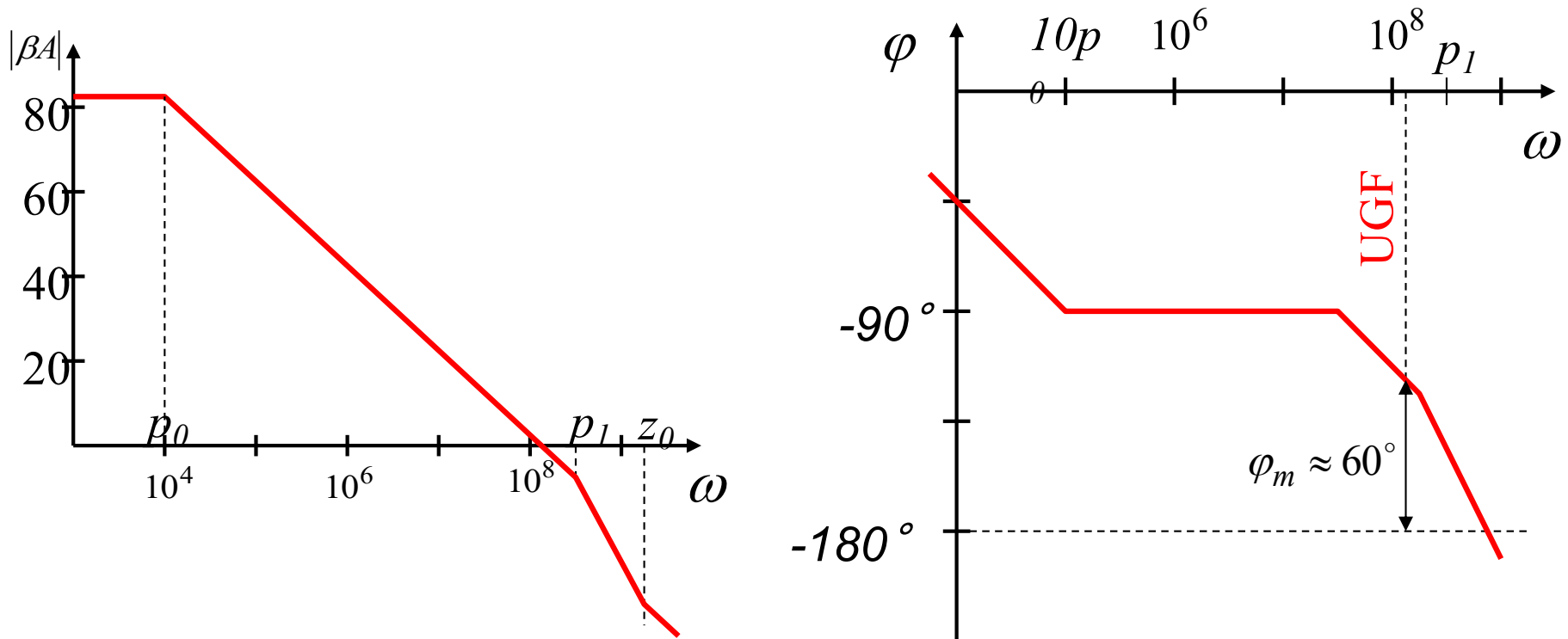
$$UGF = \tan(84.3^\circ - \varphi_m) \cdot \omega_{p1} = 0.45 \omega_{p1} = 156 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$$

$$UGF \approx \frac{g_{m1}}{C_c} \Rightarrow C_c = \frac{g_{m1}}{UGF} \approx \underline{1.1 \text{ pF}}$$

$$\omega_{p0} \approx -\frac{g_{o1}}{g_{m6}/g_{o2} C_c} = 10.5 \cdot 10^3 \text{ rad/s}$$

# Esimerkki 2

## Taajuuskompensoitu vaste



Ilman kompensointia  $p_1 = g_{02}/C_L = 2 \cdot 10^6$  rad/s.

Dominoiva napa yli neljä dekadia alempana  $\sim 100$  rad/s

# Tavoitteet

- **Tietää**
  - Mitä taajuuskompensoinnilla tarkoitetaan.
  - Miller-kompensointi.
- **Ymmärtää**
  - Miller-kompensoinnin edut verrattuna pelkkään kapasitanssin lisäämiseen.
  - Alikompensointi vs. yksikkötakaisinkytketyn vahvistimen kompensointi.
- **Soveltaa**
  - Kompensoinnin mitoittaminen vaihemarginaalitavoitteeseen tunnetusta vahvistinrakenteesta.