



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

Sähkötekniikka ja elektroniikka

Kimmo Silvonen (X)

24.11.2021

Operaatiovahvistin *Operational Amplifier*

Opva *Opa(mp)* 24.11.2021.

- ▶ Ideaalivahvistin elektroniikan peruslohkona
- ▶ Takaisinkytkentä
- ▶ Operaatiovahvistin vahvistaa signaalin amplitudia (jännite)
- ▶ Sovelluksia, helppo ja hyvä yleistyökalu!
- ▶ Laskusäännöt: 0 0 0
- ▶ Laskuesimerkkejä
- ▶ Invertoiva ja ei-invertoiva vahvistin
- ▶ Teoria vs. käytäntö
- ▶ Epäideaalisuuksia
- ▶ Lisätietoa: Elektroniikka ja sähkötekniikka, sivut 211–235

Laboratoriotyö numero 4

Lisäohje

Näennäisteho

$$S = UI^*$$

$$|S| = |U| \cdot |I^*|$$

$$|S| = |U| \cdot |I|$$

Jos merkitään epätarkasti kuten muualla usein tehdään:

$$S = |S|$$

$$U = |U|$$

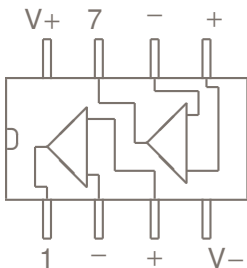
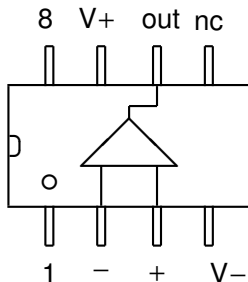
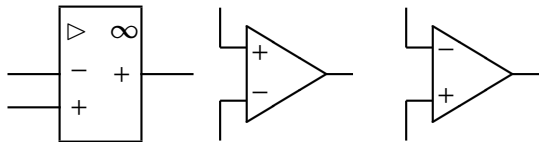
$$I = |I|$$

niin:

$$S = UI$$

Operaatiovahvistin, DIL-kotelo (DIP), IC

Mikropiiri, myös kaksikko (*dual*), nc = not connected, DC: V+ ja V-



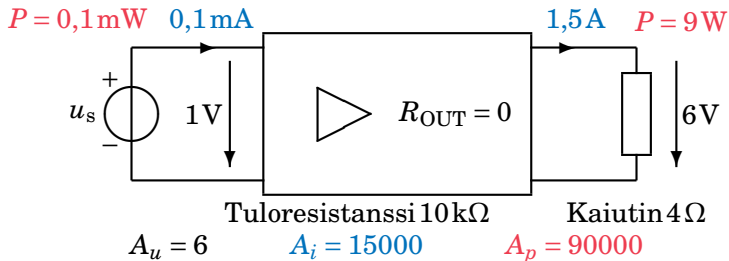
Taustaa ja sovelluksia

Background and Applications

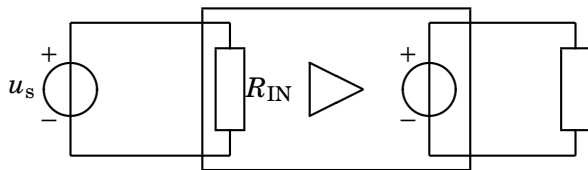
- ▶ Analogiaelektroniiikan yleistyökalu, μ A702 IC 1963
- ▶ Fairchild Semiconductor (Sherman Fairchild, Fokker F-27, ks. Wikipedia)
- ▶ Fairchild \rightarrow Intel \rightarrow mikroprosessorin μ
- ▶ Signaalin vahvistaminen ja muokkaaminen
- ▶ Haluttujen tai ei-toivottujen signaalien suodatus
- ▶ Jännitteenregulointipiirin osana
- ▶ Audiosignaalien käsittely, mm. sävynsäätö
- ▶ Mittaus- ja säätöjärjestelmät
- ▶ Instrumentointivahvistin (myös EEG ja EKG)
- ▶ A/D- ja D/A-muunnos, anturien liitäntä
- ▶ Digitaalisten järjestelmien liitäntä ulkomaailmaan, maailma mokoma on yhä analoginen!

Signaalin vahvistaminen, esim: kuulokeliitintä (u_s) → kaiutin

Lukuarvot vain esimerkkinä, alinna sijaiskytkentä eli piirimalli

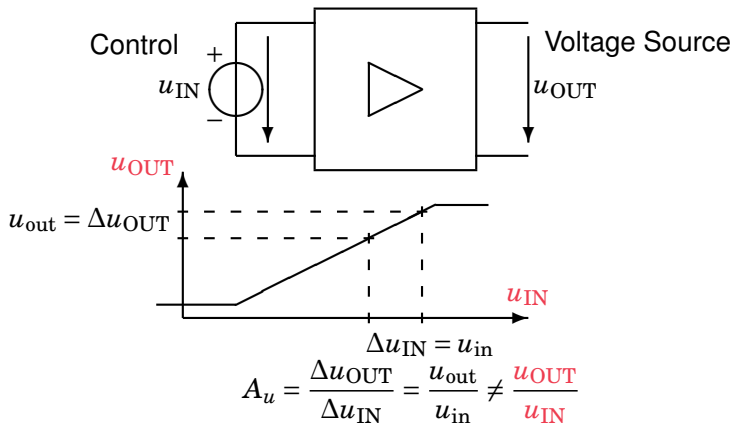


Esim. Operaatiovahvistin + virtavahvistimeksi tehotransistorit



Ideaalinen jännitevahvistin (VCVS)

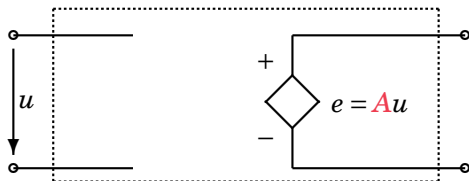
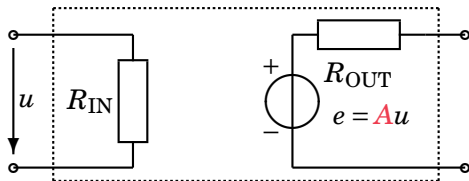
Voltage-Controlled Voltage Source, Voltage Amplifier



Tässä Δ viittaa u :n muuttumiseen ajan funktiona! Vahvistus A_u kohdistuu muutokseen u_{in} — ei suuruuteen u_{IN} (huom. case!).

Jänniteohjattu jännitelähde (VCVS)

Alinna amerikkalainen symboli ja ideaaliset resistanssit $R_{IN} = \infty$, $R_{OUT} = 0$



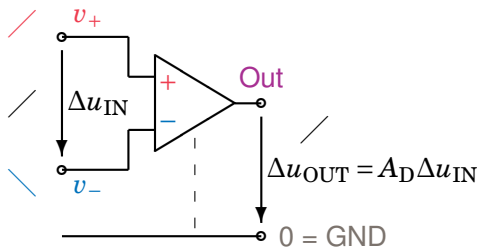
$$R_{IN} \approx \infty$$

$$R_{OUT} \approx 0$$

Differentiaalivahvistin *Differential Amplifier*

Kuvassa kellova symmetrinen tulo, epäsymmetrinen (yksipäinen) lähtö

Jos v_+ kasvaa tai v_- pienenee, Δu_{IN} ja Δu_{OUT} kasvavat:

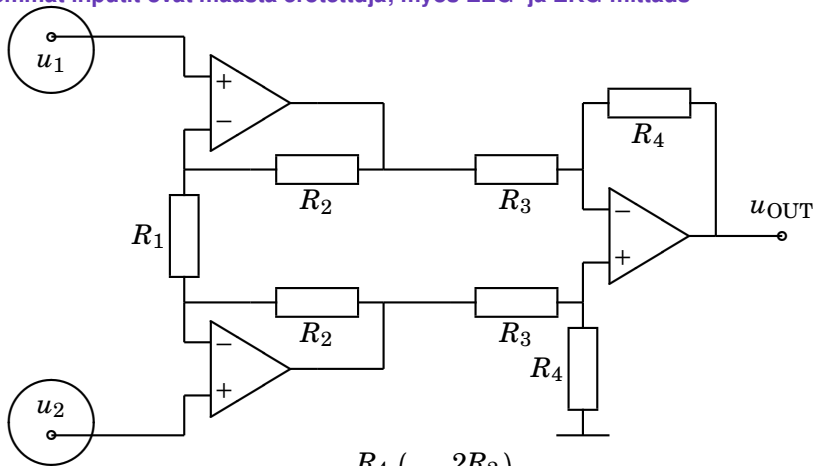


Tässä Δ viittaa potentiaalieroon kahden solmun välillä — sen voisi itsestäänselvyytenä jättää poisikin!

APLAC labrassa: OPAMP Nimi + - Out 0 = GND \$ IDEAL

Instrumentointivahvistin

Molemmat inputit ovat maasta erotettuja; myös EEG- ja EKG-mittaus



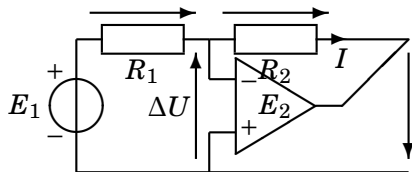
$$u_{OUT} = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) (u_2 - u_1)$$

Viime viikon tehtävä kolmessa minuutissa

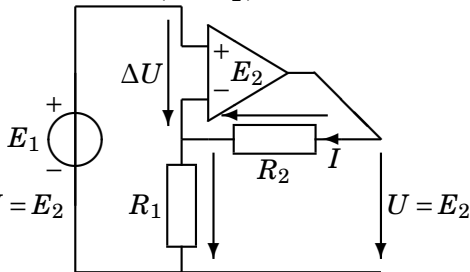
Kirjoita molemmille piireille Kirchhoffin jännitelaki

Millä E_2 :n arvolla $\Delta U = 0$? Eri tulos vasemmalla ja oikealla. Voit myös kokeilla lukuarvoja $E_1 = 1$ V ja $\frac{R_2}{R_1} = 2$, esim. $R_1 = 10$ k Ω .

$$E_2 = -\frac{R_2}{R_1} E_1 = -2 \text{ V}$$



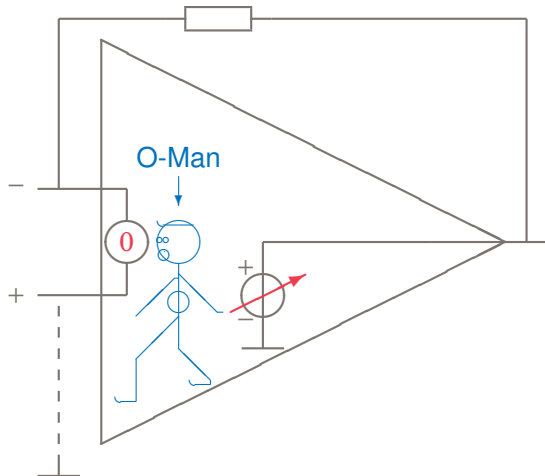
$$E_2 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) E_1 = 3 \text{ V}$$



Tämän hallinta riittää operaatiovahvistimen teorian oppimiseen!

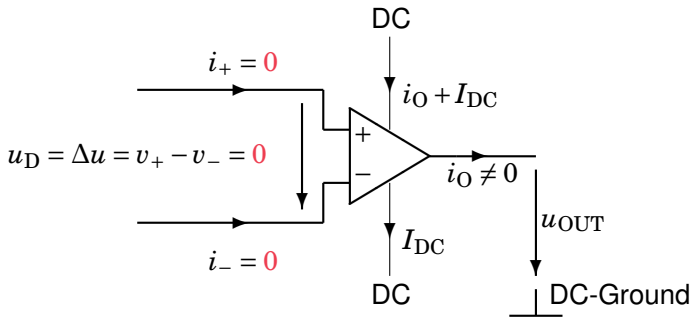
Operaatiovahvistinmies *(just a stupid joke)*

©X, credits to the LCs, Horowitz and Hill



Operaatiovahvistimen laskusäännöt

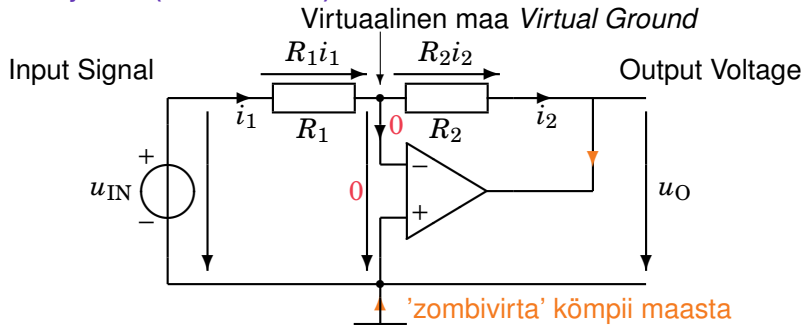
Ideal Operational Amplifier, Simple Rules — couldn't be much simpler!



Huomaa, että jännitenuoli, tässä esim. nuoli u_{OUT} , **ei koskaan** tarkoita johdinta!!!

Invertoiva vahvistin *Inverting Amplifier*

Sovelluskytkentä (vrt. kotitehtävä)



$$i_1 = \frac{u_{IN} - 0}{R_1} \quad i_1 = i_2 \quad i_2 = \frac{0 - u_O}{R_2}$$

$$\frac{u_{IN}}{R_1} = -\frac{u_O}{R_2} \Rightarrow \frac{u_O}{u_{IN}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Kaksi vaihtoehtoista laskutapaa

Kuva ed. sivulla, laskareissa molemmat laskutavat. *Two Alternative Ways:*

1. Jännite- ja silmukayhtälöt (KJL, vrt. muut laskuharjoitukset)

$$-u_{IN} + R_1 i_1 + 0 = 0$$

$$-0 + R_2 i_2 + u_O = 0$$

$$i_1 = i_2$$

2. Virta- ja solmuyhtälöt (KCL, tässä hyvin suositeltava!)

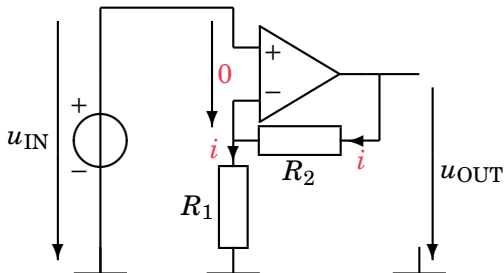
$$i_1 = \frac{u_{IN} - 0}{R_1}$$

$$i_2 = \frac{0 - u_O}{R_2}$$

$$i_1 = i_2$$

Ei-invertoiva vahvistin *Non-Inverting Amp.*

Yleinen sovelluskytkentä (vrt. kotitehtävä) *Another Recommended Application*



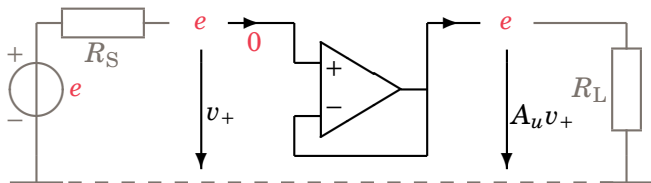
$$-u_{IN} + 0 + R_1 i = 0 \Rightarrow i = \frac{u_{IN}}{R_1}$$

$$-R_1 i - R_2 i + u_{OUT} = 0$$

$$\frac{u_{OUT}}{u_{IN}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Jännitteenseuraja, puskurivahvistin

Yet another: Voltage Follower, Buffer

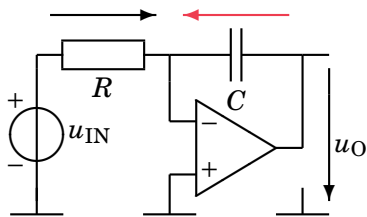


$$e \cdot \underbrace{\frac{R_{IN}}{R_S + R_{IN}}}_{v_+ = e} \cdot \overbrace{1}^{A_u = 1} \cdot \underbrace{\frac{R_L}{R_{OUT} + R_L}}_1 = u_{OUT}$$

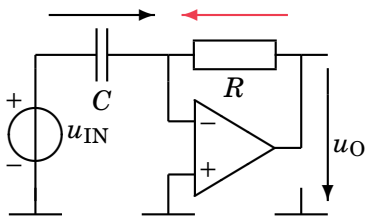
$R_S \ll R_{IN}$ $R_{OUT} \ll R_L$

Integraattori vs. derivaattori

Signaalinkäsittelyssä, katso myös Wikipediasta: *'Analog Computer'*



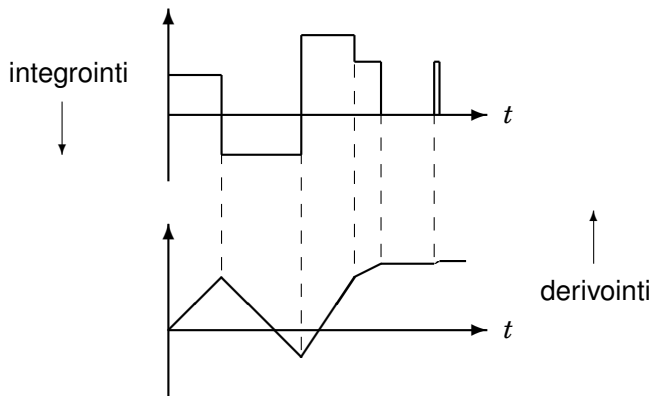
$$u_O(t) = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^t u_{IN}(t) dt + u_O(t_1)$$



$$u_O(t) = -RC \frac{du_{IN}}{dt}$$

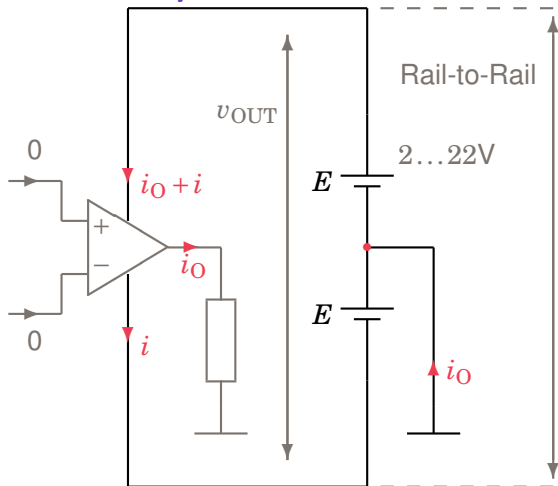
Signaalin integrointi ja derivointi

Myös aaltomuodon muokkaus *Integration vs. Derivation*



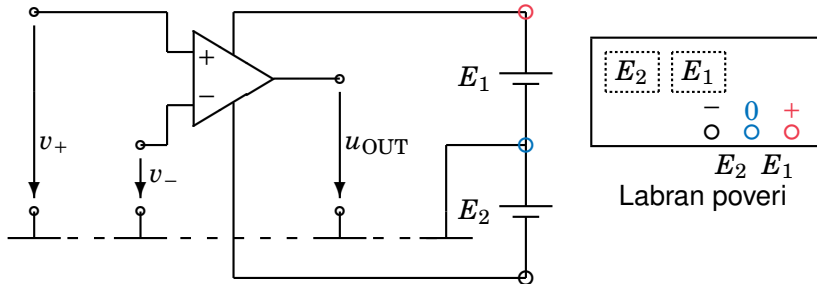
Kaksipuolinen syöttöjännite *DC Supply Voltage*

Elektroniikkapiirit tarvitsevat tasajännitelähteen!



Toimintaperiaate, liitännät

Differentiaalinen tulojännite on nolla! Ääretön raakavahvistus säädetään pienemmäksi vastuksilla (negatiivinen takaisinkytkentä).



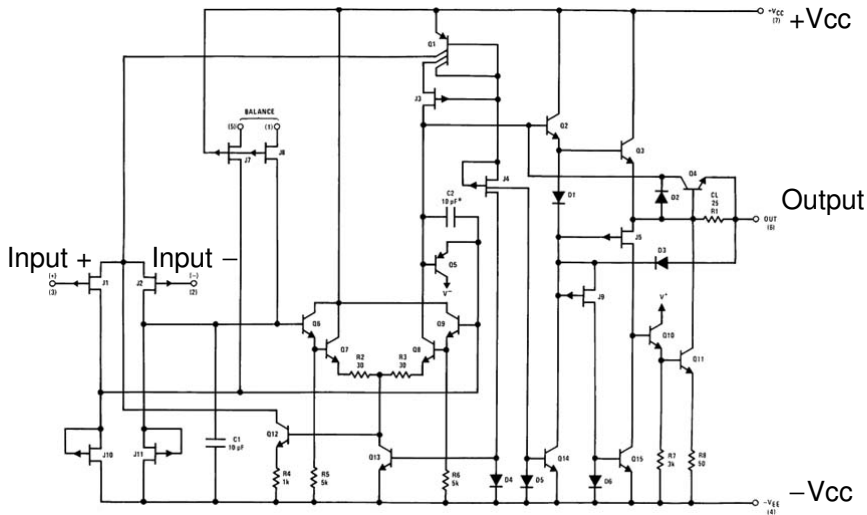
$$u_{OUT} = A \cdot \underbrace{(v_+ - v_-)}_{\Delta u = \Delta u_{IN} = u_D}$$

$$u_{OUT} = \infty \cdot 0$$

Maapisteet ovat aina yhteen liitettyjä! Labrassa opva saa käyttövoimansa piirilevyn sisäisen johdotuksen kautta reunaliittimistä!

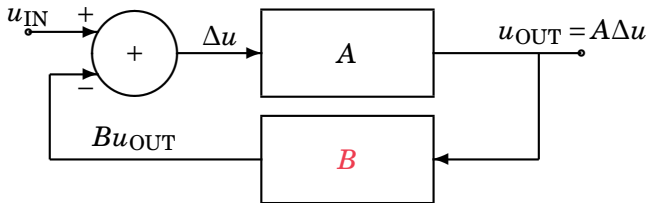
Operaatiovahvistimen sisäinen rakenne LF356

Sisäistä rakennetta (JFET & BJT) ei käytännössä tarvitse tuntea!



Negatiivinen takaisinkytkenta *NFB*

Kokeile itse alinna olevia lukuarvoja! *Negative Feedback Example*



$$u_{OUT} = A \overbrace{(u_{IN} - Bu_{OUT})}^{\Delta u}$$

$$u_{OUT} = \frac{A}{1+AB} u_{IN}$$

$$A \rightarrow \infty \Rightarrow u_{OUT} \rightarrow \frac{1}{B} u_{IN} \ \& \ \Delta u \rightarrow 0$$

Esim. $u_{IN} = 1$ ja $B = \frac{1}{10}$

$A = 1, 10, 100, 1000, \dots$

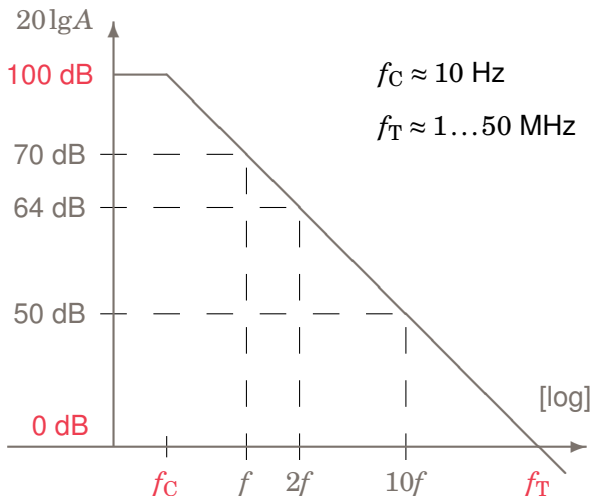
Ideaalinen vs. käytännön operaatiovahvistin

Tyypillisiä arvoja. *Ideal vs. Typical Characteristics*

Suure	Ideaalinen	Tyypillisesti
R_{IN}	∞	2 M Ω ... 1 T Ω BJT JFET
R_{OUT}	0	100 Ω
$A = \frac{u_{OUT}}{u_D}$	∞	10^5
$u_D = v_+ - v_-$	0	< 100 μV
i_+	0	< 100 nA
i_-	0	< 100 nA

Yksikkövahvistuksen rajataajuus ja GBP

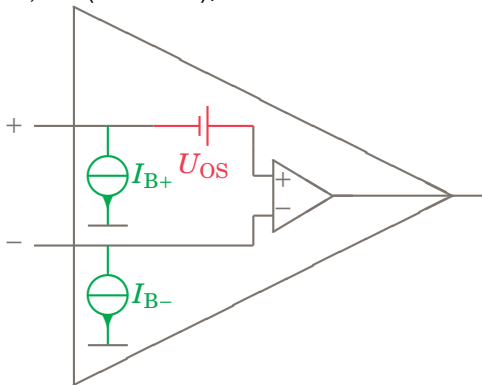
Gain-Bandwidth Product, Slope: 6 dB/octave, 20 dB/decade



Offset-jännite (nollatason siirtymä) ja bias- eli esivirta

Epäideaalisuuksia; vrt. laboratoriotyön epätarkka DC- vs. tarkka AC-jännitevahvistus!

Jos mittaat labrassa jännitevahvistuksen esim. arvoilla $u_{IN} = +0,5 \text{ V}$ ja $u_{IN} = -0,5 \text{ V}$ (tai $\pm 1 \text{ V}$), saat vahvistusten keskiarvoksi tasan $-\frac{R_2}{R_1}$.



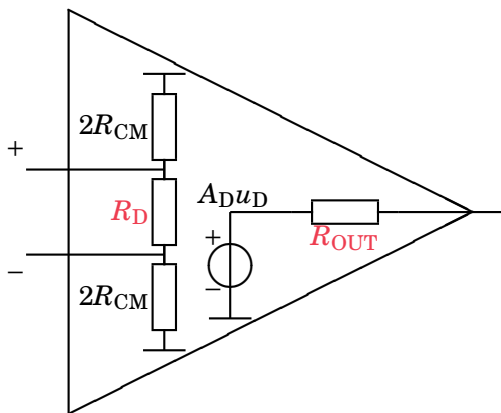
$$|U_{OS}| \leq 5 \text{ mV}$$

$$I_{B-} \approx I_{B+} \leq 100 \text{ nA}$$

$$I_{OS} = |I_{B-} - I_{B+}| \leq 10 \text{ nA}$$

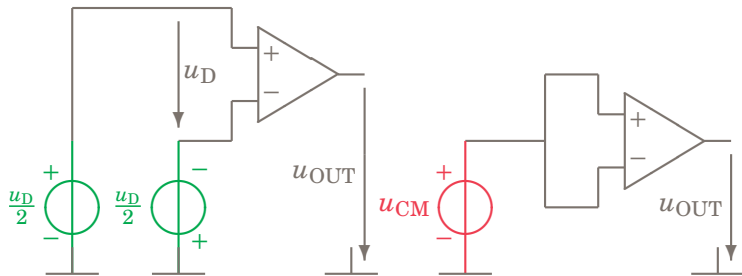
Tulo- ja lähtöresistanssi *Input and Output Resistance*

Yleensä tässä yhteydessä merkityksetömiä! *Often negligible in practice*



Yhteismuodon vaimennus, CMRR

Common Mode Rejection Ratio, ideaalisella muuntajalla se olisi ∞ !



$$A = A_D = u_{OUT}/u_D \approx 100 \text{ dB}$$

$$A_{CM} = u_{OUT}/u_{CM} \approx 20 \text{ dB}$$

$$CMRR = A_D/A_{CM} \approx 80 \text{ dB}$$

Ensi kerralla; tehollähteet eli poverit

Ensi viikolla on kurssin viimeinen ja ehkä hyödyllisin luento, joka käsittelee povereita eli erityisesti elektroniikan tasajännitelähteitä kuten "verkkolaitteita": lineaariset tehollähteet, hakkuritehollähteet ja jäähdytyksen mitoittaminen. Transistorin näköinen (esim. TO-220) lineaariregulaattori (esim. 7805) on yksinkertainen tapa muuttaa tasajännite pienemmäksi:

