

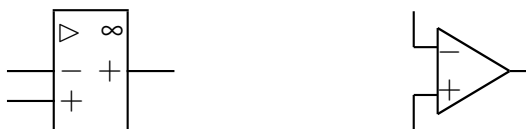
# SÄHKÖTEKNIikka JA ELEKTRONIIKKA

tXt-9 2017, Kimmo Silvonen

Osa IX, 20.11.2017

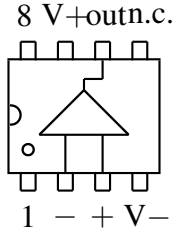
## 1 Operaatiovahvistin

**Operaatiovahvistin**, opva eli opa (*operational amplifier, opamp*) tai "opari" on ehkä yleisin analoginen mikropiiri. Sisäisesti se koostuu noin paristakymmenestä transistorista ja muutamista muista komponenteista. Käytännössä operaatiovahvistimen ominaisuudet on pitkälle standardoitu; se vastaa niin hyvin ideaalista jänniteohjattua jännitelähdettä (VCVS), ettei IC:n sisäistä rakennetta tarvitse tuntea lainkaan. Operaatiovahvistimella on kaksi vakiintunutta piirrosmerkkiä (kuva 1):



**Kuva 1.** Vasemmalla on IEC:n standardin mukainen operaatiovahvistimen piirrosmerkki — sitä tosin käytetään melko vähän; kolmionmuotoinen merkki on suositumpi.

Operaatiovahvistimet ovat usein 8-nastaisissa DIL- eli DIP-koteloissa. Koteloiden johdinjärjestys on tärkeimpien liitännöiden osalta vakiintunut (kuva 2), joskin ainakin *rail-to-rail* -mallit poikkeavat säännöstä.



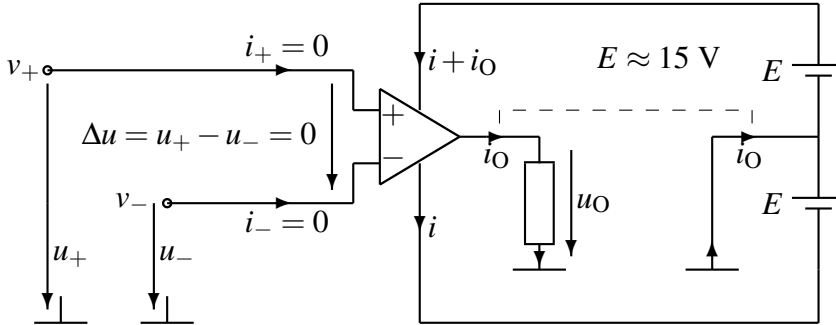
**Kuva 2.** DIL8-kotelaisen operaatiovahvistimen tyypillinen johdotus päältä katsottuna;  $V_+$  ja  $V_-$  tarkoittavat käyttöjännitteitä, n.c. = *not connected*.

Operaatiovahvistimilla on helppo toteuttaa monilohkoisia piirejä. Koska kytkennät voidaan useimmiten käsitellä pieninä lohkoina, jotka eivät käytännössä vaikuta toisiinsa, on piirien mitoittaminen ja analysointi helpompaa kuin yksinkertaisenkin transistori- tai FET-kytkennän. Komponenttivalmistajat pyrkivät jäljittelemään ideaalista operaatiovahvistinta mahdollisimman tarkasti. Tällöin ainakin peruskytkennät toimivat hyvin minkä tahansa operaatiovahvistinmikropiirin kanssa. Vaativammassa sovelluksissa valintakriteerinä voi olla esim. käyttöjännitealue, virrankulutus, suuri ylärajataajuus, matala kohina, pieni *bias*- eli esivirta tai alhainen siirros- eli *offset*-jännite.

Yksittäisissä (*single*) operaatiovahvistimissa on 8 liitintää, joista vähintään viittä tarvitaan käytännössä: positiivinen tulo eli *input* +, negatiivinen tulo -, lähtö eli *output*, sekä positiivinen ja negatiivinen käyttöjännite  $DC_+$  ja  $DC_-$ . Tästä huolimatta operaatiovahvistin eli opari on helpoimpia komponentteja soveltaa käytäntöön! Yhteen mikropiiriin on usein pakattu yhden vahvistinlohkon sijaan kaksikko *dual* tai nelikko *quad*.

**Ideaalisen operaatiovahvistimen** tuloimpedanssi on ääretön ja lähtöimpedanssi nolla. Korkeasta tuloimpedanssista seuraa, että tulonavoissa ei kulje virtaa:  $i_+ = 0$  ja  $i_- = 0$  (kuva 3). Suuri jännitevahvistus ja takaisinkytkentä yhdessä saavat aikaan sen, että tulonavat ovat tarkasti samassa potentiaalissa eli  $v_+ = v_-$ . Invertoivan ja ei-invertoivan tulonavan välillä ei siis ole potentiaali- eli jännite-eroa ( $\Delta u = v_+ - v_- = u_+ - u_- = 0$ ). Jännitevahvistus on tällöin teoriassa ääretön:

$$A = \frac{u_O}{\Delta u} = \infty \quad (1)$$



**Kuva 3.** Operaatiovahvistimen tulojännitteiden määrittely ja tyypillinen syöttö- eli käyttöjännitteen kytkentätapa. Piirin maataso on jännitelähteiden "keskikohdassa", mutta operaatiovahvistinta ei monissakaan sovelluskytkennöissä kytketä suoraan maahan. Maapistee on elektroniikkapiireissä aina yhdistetty toisiinsa! Kuvasta näkyy myös maasta kömpivän "zombi"-virran  $i_O$  vaikutus maasolmun virtatasapainoon (epävirallinen termi). Käyttöjännitejohtimia ei yleensä piirretä näkyviin, jolloin virtatasapaino näyttää horjuvan: piiristä tulee virtaa ulos, vaikka sisään ei näennäisesti mene mitään.

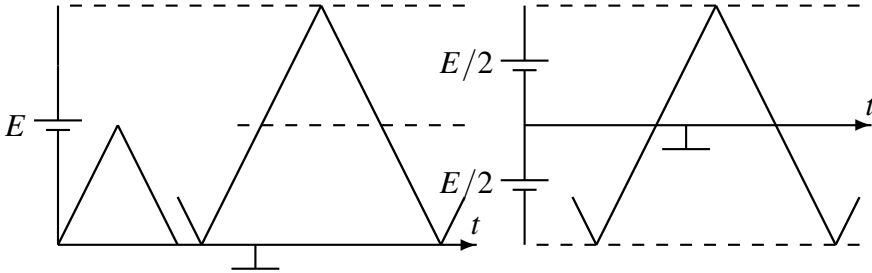
Alaindeksit  $+$  ja  $-$  viittaavat **ei-invertoivaan** ja **invertoivaan** tulonaapaan. Jos plus-tulon potentiaalia nostetaan, nousee myös oikealla olevan lähtöliitännän potentiaali. Jos taas invertoivan eli miinustulon potentiaali nousee plus-tulon potentiaalinsa pysyessä ennallaan, laskee lähdön potentiaali.

Useimmissa operaatiovahvistimen sovelluskytkennöissä jännitevahvistus säädetään sopivaksi **negatiivisella takaisinkytkennällä** eli kytkemällä osa lähtöjännitteestä takaisin negatiiviseen tuloon. Negatiivinen takaisinkytkentä parantaa yleensäkin monia vahvistimen signaalinkäsittelyominaisuuksia, kuten säröä ja taajuusvastetta. Taajuuden kasvaessa operaatiovahvistimen jännitevahvistus pienenee ilman takaisinkytkentää suorastaan katastrofaalisen nopeasti.

### 1.0.1 Syöttöjännite

Operaatiovahvistimen pienen lähtöimpedanssin takia lähtöjännite  $u_O$  ei riipu lähtövirrasta  $i_O$ . Yleensä  $i_O \neq 0$ , koska operaatiovahvistimen lähdöstä virta kulkee kuormaan ja takaisinkytkentälänsäkkiin. Koska tulovirrat ovat nollia, on lähtövirran tultava jostakin muualta. Operaatiovahvistin vaatii

aina tasajännitelähteen **käyttö-** eli **syöttöjännitteeksi**. Se koostuu yleensä positiivisesta ja negatiivisesta jännitteestä, joiden liitoskohta muodostaa piirin maatasen. Maata ei yleensä kytketä suoraan operaatiovahvistimelle.

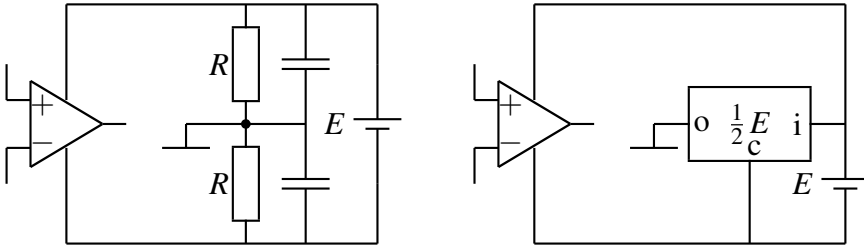


**Kuva 4.** Yksipuolisen ja kaksipuolisen käyttöjännitteen ero signaalinkäsittelyn kannalta. Kolmioaalto on esimerkkinä signaalista; tärkeätä tässä ei ole signaalin muoto, vaan sen ääriarvot. Vasemmalla signaali pitää nostaa keinotekoisesti maatasen yläpuolelle summaamalla siihen tasajännite; signaali ei lineaarisessa piirissä voi käytännössä ylittää (eikä aivan saavuttaakaan) ainakaan molempia käyttöjännitealueen rajoja.

Syöttöjännitelähteet  $E$  jätetään kytkentäkaavioissa itsestäänselvyyksinä yleensä piirtämättä. Yksipuolisessa jännitesyötössä kuvan 3 alempi lähde voidaan korvata oikosululla, mutta tämä rajoittaa piirin toiminta-alueita jännitteen suhteen. Muulloin yleensä molemmat lähteet ovat yhtä suuret (tyypillisesti korkeintaan 15 V). Kaksi erillistä tasajännitelähdettä (*dual supply*) voi vaikuttaa hankalalta. Etuna on se, että toisin kuin yksipuolisella jännitesyötöllä tällä järjestelyllä oparin lähtöjännite voi olla maahan nähden positiivinen tai negatiivinen (kuva 4). Samaa periaatetta käytetään usein hifi-vahvistimissa, jotta kaiutinliitäntään muuten tarvittava suuri d.c.-erotuskondensaattori voidaan jättää pois.

Monessa tilanteessa on tyydyttävä yksipuoliseen jännitesyöttöön. Tällöin operaatiovahvistinkytkennän maataso on hilattava keinotekoisesti yleemmäksi (kuva 5, *split supply*). Halpa ja huono tapa on muodostaa kahdesta yhtä suuresta vastuksesta jännitteenjakaja. Vastusarvot riippuvat tarvittavista virroista; maahan menevä tasavirta ei saisi merkittävästi muuttaa jännitteenjakajan jännitettä. Lisäksi tarvitaan suuri kondensaattori jännitteenjakajan keskipisteestä vähintään toiseen syöttöjännitteen napaan, jotta signaali ei joudu kulkemaan kyseisten vastusten kautta. Parempaan tulokseen päästään muodostamalla "korotettu" maataso syöttöjännitteestä regu-

laattorilla.



**Kuva 5.** Operaatiovahvistimen yksipuolinen jännitesyöttö. Vasemmalla jännitteenjakaja, joka on signaalin kannalta oikosuljettu suurehkoilla kondensaattoreilla. Oikealla oleva jänniteregulaattori on suositeltavampi tapa; siinäkin on hyvä lisätä esim. 100 nF:n kondensaattori liitäntöjen o ja c väliin.

Yksi huomioon otettava seikka on operaatiovahvistimen lähtöjännite alue — harva malli on *rail-to-rail* -tyyppinen. Käytännössä lähtöjännite pääsee vain tietyn marginaalin, esim. 1,5 voltin päähän positiivisesta ja negatiivisesta käyttöjännitteestä: esim. viiden voltin käyttöjännitteellä käytettävissä olisi vain kahden voltin korkuinen jännitealue 2,5 voltin ympäristössä. *Rail-to-rail* -tyyppisillä operaatiovahvistimissa ongelma on pienempi, mutta ne eivät yleensä toimi odotetusti muuta kuin alhaisella kuormavirralla. Jos lähtöliitäntää kuormitetaan, menetetään laaja jännitealue.

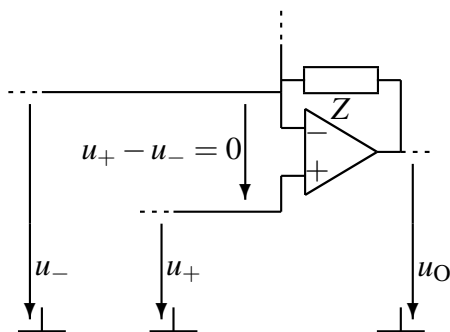
Jos toinen yksipuolisen käyttöjännitteen navoista otetaan piirin maatasoksi, ei käyttöjännitteen väliulosottoa välttämättä tarvita. Tällöin kuitenkin signaaliin täytyy yleensä summata tasajännite, joka nostaa sen jännitealueen keskivaiheille. Kun kytkettävien liitäntöjen tasajännitetasot eivät ole samat, tarvitaan signaalitiellä lohkojen väleihin kytkentä- eli d.c.-erotuskondensaattorit.

## 1.1 Lineaarinen toiminta

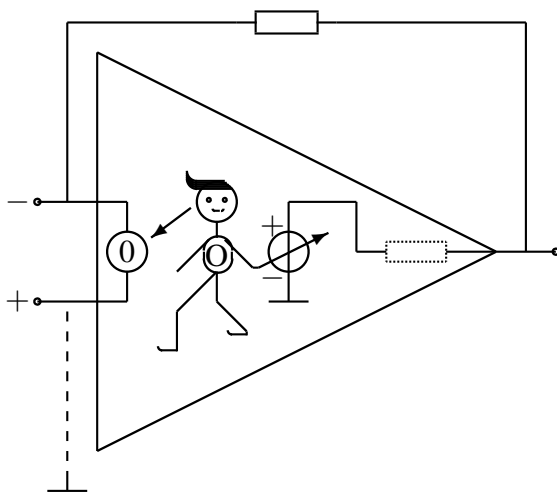
Operaatiovahvistimen toiminta voidaan ehkä helpoimmin ymmärtää kuvan 6 avulla. Siinä piiri on (tai voi olla) osa laajempaa kokonaisuutta.

Operaatiovahvistin tai tarkemmin sanottuna sen sisällä kyhjättävä **O-mies** ;-) mittaa potentiaalia  $v_+$  ja asettaa lähtöjännitteen  $u_O$  sellaiseksi, että invertoivan navan potentiaali  $v_-$  säättyy takaisinkytkennän  $Z$  kautta yhtä suureksi kuin  $v_+$  (kuva 7). Potentiaalihan tarkoittaa jännitettä eli potentiaaliero verrattuna maahan tai muuhun sovittuun vertailupisteeseen. Kun

puhutaan jännitteestä yhdessä pisteessä (esim.  $u_+$ ), tarkoitetaan aina kyseisen pisteen potentiaalia eli jännitettä maahan nähden. Normaalin toiminnan kannalta on oleellista, että takaisinkytkentä tuodaan negatiiviseen eli invertoivaan sisäänmenoon; tällöin kyseessä on negatiivinen takaisinkytkentä. Yleensä vain oskillaattoreissa ja komparaattoreissa käytetään positiivista takaisinkytkentää.



**Kuva 6.** Operaatiovahvistimen toiminnan analysointi. Vahvistin säätelee lähtöjännitteen  $u_O$  siten, että jännite  $u_-$  säättyy takaisinkytkennän  $Z$  kautta yhtä suureksi kuin "vertailujännite"  $u_+$ .



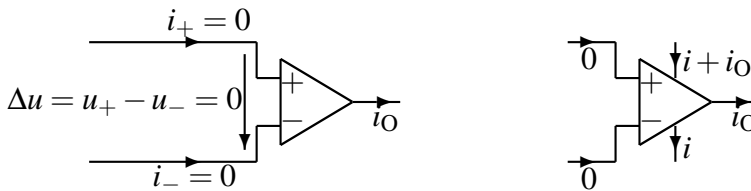
**Kuva 7.** Operaatiovahvistinmies säätelee lähtöjännitteen sellaiseksi, että tulonapojen välinen jännite on nolla. O-miehen esikuvana oli Horowitzin ja Hillin kirjassa *The Art of Electronics* esitelty Trankkumies eli *Transistor man* (tosin myös *Leningrad Cowboyseilta* on otettu vaikutteita).

Lineaariset operaatiovahvistinpiirit voidaan analysoida seuraavin oletuksin (kuva 8): tulonavat ovat samassa potentiaalissa eikä niihin mene virtaa.

$$\Delta u = 0 \Rightarrow v_+ = v_- \quad (2)$$

$$i_+ = 0 = i_- \quad (3)$$

Yhtälöt kirjoitetaan Kirchhoffin lakien avulla; **muuta oletuksia** tai tietoja **ei tarvita**. Lähtövirta  $i_O$  ja tulojännitteet  $u_+ = u_-$  jätetään yleensä laskematta ellei niitä erikseen kysytä. Huom. yleensä  $i_O \neq 0$ ; virtatasapaino toteutuu käyttöjänniteliitäntöjen kautta.



**Kuva 8.** Operaatiovahvistimen laskusäännöt ja virtojen jakautuminen käyttöjännitejohtimien ja lähtöliitännän kesken (lähtövirta  $i_O$  voi olla positiivinen tai negatiivinen).

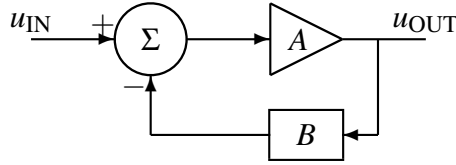
## 1.2 Takaisinkytkentä

Takaisinkytkentä tarkoittaa sitä, että osa piirin lähtösignaalista tuodaan takaisin piiriin tuloon. Se, mitä tällä halutaan saada aikaan, riippuu erityisesti siitä, onko takaisinkytketty signaali vastakkaisvaiheinen vai samanvaiheinen tulosignaalin kanssa (negatiivinen vai positiivinen takaisinkytkentä). Negatiivinen takaisinkytkentä on yleinen mm. vahvistimissa. Se parantaa lineaarisuutta ja useita muita signaalinkäsittelyyn liittyviä vahvistimen ominaisuuksia jopa radikaalisti. Esimerkiksi operaatiovahvistimen yläraja-  
taajuus voidaan negatiivisen takaisinkytkennän avulla nostaa helposti 100 000-kertaiseksi. Positiivisella takaisinkytkennällä voidaan mm. kiihdyttää lähtöjännitteen muutosta muutostilanteissa tai käynnistää oskillaattorin värähtely.

### 1.2.1 Takaisinkytkennän vaikutus vahvistukseen

Kuva 9 esittää takaisinkytkettyä vahvistinta tai muuta järjestelmää. Lähtöjännite tuodaan takaisin summaimelle **takaisinkytkentäkertoimella**  $B$

kerrottuna. Takaisinkytketty signaali vähennetään tulosignaalista.



**Kuva 9.** Negatiivisesti takaisinkytketty järjestelmä. Kuvan lohkokaaviossa oletetaan yleensä, että  $A > 0$  ja  $B > 0$ . Jos  $B < 0$ , muutetaan summaimen miinus plussaksi.

Merkitään piirin avoimen silmukan vahvistusta eli vahvistusta ilman takaisinkytkentää lyhyesti  $A$ :lla. Suljetun silmukan jännitevahvistusta eli vahvistusta takaisinkytkettynä merkitään tässä  $A_u$ :lla. Oletetaan aluksi että vahvistus  $A$  on positiivinen vakio. Suorassa kytkennässä ei ole takaisinkytkentää lainkaan, vaan  $B = 0$ . Vahvistimissa takaisinkytkentä on negatiivinen eli  $B > 0$  tai ainakin **silmukkavahvistus**  $AB > 0$ . Yleisin tyyppi eli **negatiivinen takaisinkytkentä** pienentää vahvistusta<sup>1</sup>, mutta laajentaa kaistanleveyttä molemmista päistä, muuttaa tulo- ja lähtöimpedanssia sekä pienentää säröä. Negatiivisen takaisinkytkennän periaatteen esitti v. 1934 Bellin laboratorioiden tutkija Harold Black. Negatiivinen takaisinkytkentäkerroin  $B < 0$  viittaisi tietysti **positiiviseen takaisinkytkentään**. Oskillaattoreissa, Schmitt-triggereissä, ym. takaisinkytkentä on positiivinen.

$$u_{\text{OUT}} = A(u_{\text{IN}} - Bu_{\text{OUT}}) \Rightarrow u_{\text{OUT}} = \underbrace{\frac{A}{1+AB}}_{A_u} u_{\text{IN}} \quad (4)$$

Operaatiovahvistimissa (avoimen silmukan) vahvistus on hyvin suuri ( $A \rightarrow \infty$ ), jolloin jännitevahvistus määräytyy takaisinkytkentäkertoimesta  $A_u \rightarrow 1/B$ :

$$u_{\text{OUT}} \rightarrow \frac{1}{B} u_{\text{IN}} \quad \text{kun} \quad A \rightarrow \infty \quad (5)$$

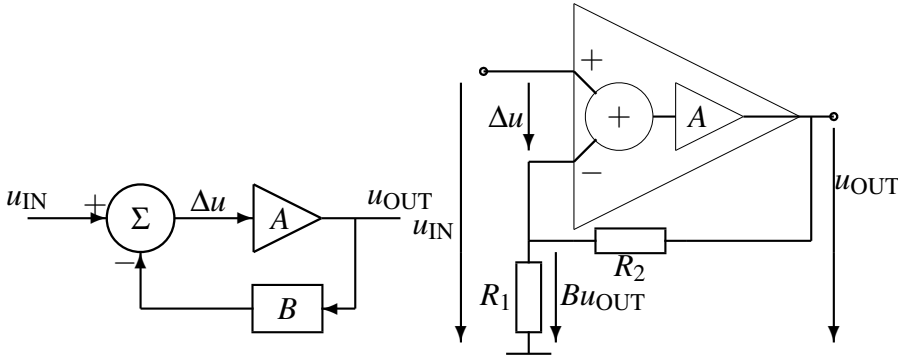
Lopullinen vahvistus ei enää riipu raakavahvistuksesta  $A$ , vaan se on yksinomaan takaisinkytkennän määräämä.

<sup>1</sup>Myös vastamelukuulokkeissa signaaliin summataan osa signaalista vastakkaisvaiheisena, jolloin juuri tämä osa vaimenee.



### 1.2.2 Suljetun silmukan vahvistus

Jos merkitään  $A$ :lla vahvistusta ilman takaisinkytkentää (**avoimen silmukan vahvistus** eli raakavahvistus) ja  $B$ :llä **takaisinkytkentäkerrointa** (kuva 10), voidaan johtaa takaisinkytketyn vahvistimen vahvistuksen lauseke. Takaisinkytkentäkerrointa merkitään joskus kirjaimilla  $\beta$  tai  $f$ .



**Kuva 10.** Negatiivisesti takaisinkytketty järjestelmä. Tarkasteltava signaali voi olla myös virta joko toisessa tai molemmissa porteissa. Oikealla mallia on sovellettu ei-invertoivaan operaatiovahvistinkytkentään. Oparissa vahvistuskerroin  $A$  on hyvin suuri ja  $B$  asetellaan ulkopuolisilla vastuksilla.

$$u_{\text{OUT}} = \frac{A}{1 + AB} u_{\text{IN}} = A_u u_{\text{IN}} \quad (6)$$

Antamalla  $A$ :n kasvaa hyvin suureksi saadaan vakuuttava perustelu ideaalisen operaatiovahvistimen toimintaperiaatteelle. Suurilla vahvistuksen arvoilla takaisinkytketyn vahvistimen **suljetun silmukan vahvistus**  $A_u$  riippuu vain takaisinkytkentäkertoimesta  $B$ , mutta ei enää **raakavahvistuksesta**  $A$ , kuten seuraava raja-arvotarkastelu osoittaa:

$$u_{\text{OUT}} = \frac{1}{\frac{1}{A} + B} u_{\text{IN}} \rightarrow \frac{1}{B} u_{\text{IN}} \quad \text{kun } A \rightarrow \infty \quad (7)$$

Differentiaalinen tulojännite  $\Delta u$  menee luonnostaan nollassi.

$$\Delta u = u_{\text{IN}} - Bu_{\text{OUT}} \rightarrow 0 \quad \text{kun } A \rightarrow \infty \quad (8)$$

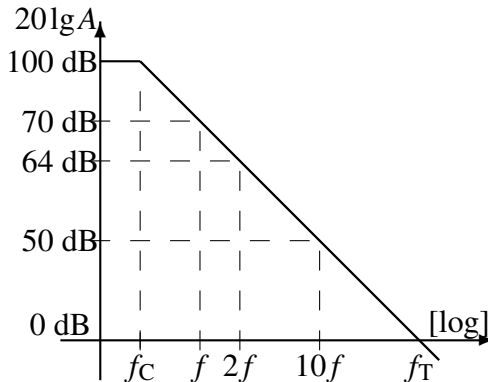
Kuvan 10 määrittelyin positiivinen  $B$  tarkoittaa negatiivista takaisinkytkentää  $A$ :n ollessa positiivinen. Käytännössä sekä  $A$  että  $B$  ovat yleensä taajuu-

desta riippuvia kompleksilukuja. Tällöin takaisinkytkentäkertoimen merkki voi "yllättäen" vaihtua taajuuden kasvaessa. Takaisinkytketyn operaatiovahvistimen tuloresistanssi suurenee ja lähtöresistanssi pienenee useita dekadeja avoimen silmukan arvoista, joten niitä ei yleensä tarvitse ottaa huomioon.

### 1.2.3 Operaatiovahvistimen ylärajataajuus

Negatiivinen takaisinkytkentä pienentää vahvistusta, mutta samalla ylärajataajuus kasvaa selvästi. Tietyllä taajuusalueella ( $0 \dots f_1$ ) saavutettavaa vahvistusta ( $A_1$ ) voidaan arvioida valmistajan julkaiseman käyrän perusteella (kuva 11).

**Transitiotaajuudella**  $f_T$  jännitevahvistus on pudonnut alle ykkösen. Jos vahvistusta pienennetään takaisinkytkennällä, kasvaa ylärajataajuus huimaavasti (esim. arvoon  $10f$ , kun vahvistus on 50 dB); **vahvistus-kaistanleveys -tulo GBP** pysyy tällaisessa vahvistimessa vakiona, vaikka vahvistusta muutetaan. *GBP* on usein yhteydessä virrankulutukseen; nopeilla ja laajakaistaisilla piireillä virrankulutus on suurempi. Monet uudet piirit voidaan tilapäisesti sammuttaa esim. digitaalisella ohjaussignaali virrankulutuksen alentamiseksi. On kuitenkin huomattava, että piirin uudesta herättely vie ehkä satoja nanosekunteja aikaa.

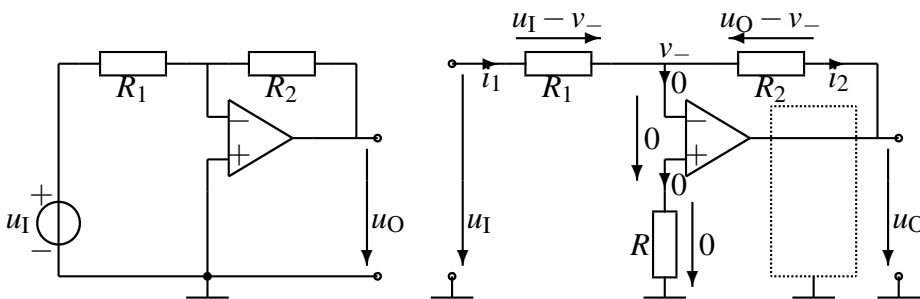


**Kuva 11.** Operaatiovahvistimen taajuusvaste ilman takaisinkytkentää on suorastaan surkea. Suurin avoimen silmukan jännitevahvistus  $A_D$  saavutetaan vain hyvin matalilla taajuuksilla ( $f < f_c \approx 10$  Hz); tarkkaan ottaen  $f_c$  on 3 dB:n rajataajuus. Suuremmilla taajuuksilla vahvistus pienenee **20 dB/dekadi** eli **6 dB/oktaavi** (dekadi tarkoittaa taajuuden muuttumista kertoimella 10 ja oktaavi taajuuden muuttumista kertoimella 2).

Operaatiovahvistinvalmistajien nettisivuilta voi ladata tai käyttää *selection guide* -tyyppisiä apuvälineitä. Paljon lisätietoa operaatiovahvistinteoriasta ja esimerkiksi toiminnasta yksipuolisella käyttöjännitteellä on mm. Googella löytyvässä Texas Instrumentsin kokoamassa 464-sivuisessa kirjassa *Op Amps for Everyone*, slod006b.pdf. Mittaustuloksia käytännön operaatiovahvistimien säröstä on esitetty yhtä laajassa tutkielmassa *Operational Amplifier Distortion (Samuel Groner)*, joka myös on ladattavissa netistä.

### 1.3 Invertoiva vahvistin

**Invertoiva vahvistin** (kuva 12) soveltuu operaatiovahvistimien peruskytkennoistä yleiskäyttöön ehkä parhaiten. Analysoidaan toiminta Kirchhoffin virtalain avulla olettaen, että invertoivan tulonavan potentiaali on sama kuin ei-invertoivan, eli tässä  $v_- = 0$ . Huomaa kuitenkin heti, että useimmissa muissa sovelluskytkennöissä tulonavat *eivät* ole nollapotentialissa!



**Kuva 12.** Invertoiva operaatiovahvistin. Maahan liitetyt pisteet on käytännössä yhdistetty toisiinsa, kuten vasemmalla olevassa piirissä. Vastus  $R$  ei **teoriassa** vaikuta piirin toimintaan, koska sen virta ja siten myös jännite ovat nollia. Jos  $R$ :n arvoksi valitaan  $R_1 || R_2$ , minimoituu tuloliitännöiden *bias*- eli esivirtojen aiheuttama virhe. Vastusten paikalla voi olla mitä tahansa impedansseja, kunhan kummastakin tulonavasta on edellä mainittuja esivirtoja varten **tasavirtatie maahan**. Lähtöliitännän ja  $R_2$ :n väliin voidaan teoriassa kytkeä lähes mitä tahansa toiminnan muuttumatta, kunhan oparin maksimilähtövirtaa ja -jännitettä ei ylitetä.

$$i_1 = \frac{u_I - \overbrace{v_-}^0}{R_1} \quad i_2 = \frac{\overbrace{v_-}^0 - u_O}{R_2} \quad (9)$$

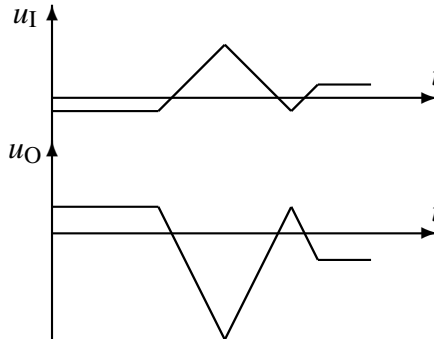
$$i_1 = i_2 \Rightarrow \frac{u_I}{R_1} = -\frac{u_O}{R_2} \Rightarrow \frac{u_O}{u_I} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (10)$$

tai yleisemmin kompleksisilla impedansseilla

$$\frac{u_O}{u_I} = -\frac{Z_2}{Z_1} \quad (11)$$

Vastusarvojen suhde määrää jännitevahvistuksen, mutta vastusten lukuarvot itsessään eivät ole kovin kriittisiä. Tyypillinen vastusarvo on esim. 10 k $\Omega$  (tai esim. 0,1 k $\Omega$  ... 1 M $\Omega$ ). Negatiivinen jännitevahvistus ja nimitys *invertoiva* tarkoittavat sitä, että  $u_I$  ja  $u_O$  ovat vastakkaismerkkiset (vaihtojännitteellä **vastakkaisvaiheiset**, kuva 13).

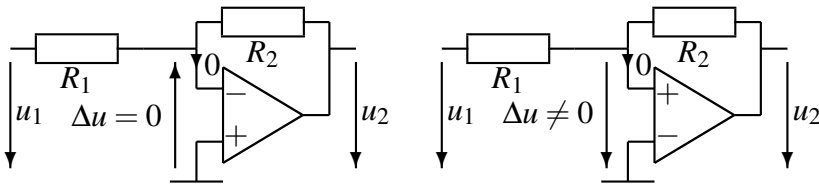
Takaisinkytketyn operaatiovahvistimen jännitevahvistus voidaan säätää vapaasti valitsemalla vastusten  $R_2$  ja  $R_1$  **suhde** sopivasti. Kytkemällä vastusten paikalle RC-piirejä syntyy erilaisia suodattimia. Kun suodattimen osana on signaalia vahvistavia komponentteja (kuten operaatiovahvistin), puhutaan aktiivisista suodattimista.



**Kuva 13.** Invertointi kääntää tasajännitteen etumerkin ja signaalin vaiheen. Suurilla taajuuksilla signaalin vaihesiirto alkaa poiketa 180:stä asteesta. Vahvistus muuttaa amplitudia eli käyrän korkeutta.

Kolmas vastus  $R$  ei vaikuta ideaalitapauksessa mitään, koska sen läpi ei kulje virtaa. Koska vahvistimen plus-tulonapa on kytketty maahan, on myös negatiivinen tulonapa maapotentiaalissa. Tästä käytetään nimitystä

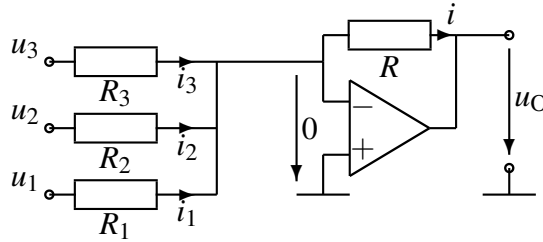
**virtuaalinen maa** (vrt. kuva 14). **Esi- eli biasvirtojen** vaikutusta voidaan pienentää valitsemalla  $R$ :n arvoksi rinnankytkentä  $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ , missä  $R_1$  sisältää edeltävän piirin tai signaalilähteen lähtöresistanssin. Jos signaalitiellä on sarjaankytketty kytkentäkondensaattori, valitaan  $R = R_2$ . Vastus  $R$  voidaan kuitenkin tyypillisesti korvata oikosululla. Koko vahvistimen tuloresistanssi (tuloimpedanssi) on yhtä suuri kuin  $R_1$  (tai  $Z_1$ ), mahdollinen  $R$  ei siihen vaikuta! Lähtöimpedanssi on teoriassa nolla, koska lähtösignaali otetaan ulos suoraan takaisinkytketyn vahvistimen annosta.



**Kuva 14.** Negatiivisen (vas.) ja positiivisen (oik.) takaisinkytkennän ero. Operaatiovahvistin pystyy ohjaamaan differentiaalisen tulojännitteen  $\Delta u$  nolaksi vain, jos se on oikeinpäin kytketty. Positiivisessa takaisinkytkennässä  $\Delta u$  määräytyy vastusten muodostamasta jännitejakajasta sekä tulo- ja lähtöjännitteestä; lähtöjännite asettuu tällöin yleensä jännitteestä  $u_1$  riippuen jompaankumpaan äärilaitaansa, jolloin myös  $u_2$  on tunnettu. Vasemmalla  $\frac{u_1}{R_1} = -\frac{u_2}{R_2}$ , mutta oikealla  $\frac{u_1 - \Delta u}{R_1} = -\frac{u_2 - \Delta u}{R_2}$ .

## 1.4 Summausvahvistin

Jo 1950-luvulla suunniteltiin analogisia tietokoneita. Niillä olisi mahdollista saavuttaa suuri nopeus, mutta tarkkuus on ratkaisevasti huonompi kuin digitaalisilla tietokoneilla. Analogiatietokoneita on käytetty lähinnä prosessien säätöön. Useammin kuitenkin seuraavassa mainitut lohkot esiintyvät erilaisissa signaalinmuokkaustehtävissä. Analogisen tietokoneen osia ovat mm. summaus- ja erotusvahvistin, integraattori ja derivaattori sekä analoginen kertoja ja jakaja. Integrointi ja derivointi perustuvat kondensaattorin virran ja jännitteen välisiin yhtälöihin. Analoginen kerto- ja jakolasku voidaan muodostaa logaritmien yhteen- ja vähennyslaskun avulla. Analoginen summain perustuu invertoivaan vahvistinkytkentään (kuva 15).

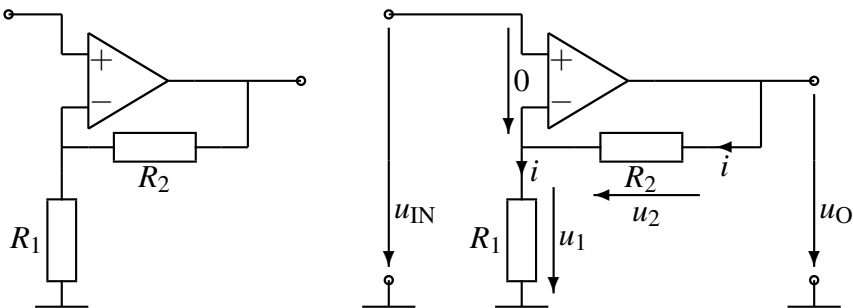


**Kuva 15.** Analoginen summain soveltuu esimerkiksi (signaalien) mikseriksi. Tulokanavia on mahdollista painottaa eri kertoimilla valitsemalla vastukset  $R_1 \dots R_3$  sopivasti

**Summausvahvistintinta** tarvitaan silloin, kun useampia signaaleja sekoitetaan toisiinsa (esim. äänityslaitteiden *mikserit*). Koska miinustulo on maapotentiaalissa ei signaalilähteestä toiseen tapahdu ylikuulumista vastusten  $R_i$  kautta. Vastuksia ja siis summattavia tuloja voi olla kuinka monta tahansa, eivätkä tuloliitännöihin kytketyt laitteet vaikuta muutenkaan toisiinsa. Ei-invertoivan vahvistimen pohjalta ei summainta voida tehdä kovin kätevästi.

## 1.5 Ei-invertoiva vahvistin

Toinen yleiskäyttöön sopiva kytkentä on kuvan 16 vahvistin, jossa signaalin invertoitumista ei tapahdu: lähtöjännite on aina samanmerkkinen kuin tulojännite.



**Kuva 16.** Ei-invertoivan vahvistimen etuna on erittäin korkea tuloimpedanssi. Jännitevahvistus on teoriassa aina vähintään yksi, koska vastusarvot eivät voi olla negatiivisia. Signaalissa ei tapahdu vaihesiirtoa, mikä voi olla joko etu, haitta tai usein täysin merkityksetön seikka. Todellisuudessa kaikissa vahvistimissa syntyy tulon ja lähdön välille vaihesiirtoa taajuuden kasvaessa; tähän ovat syynä mm.

vahvistimen sisäiset haja- ja puolijohteiden liitoskapasitanssit.

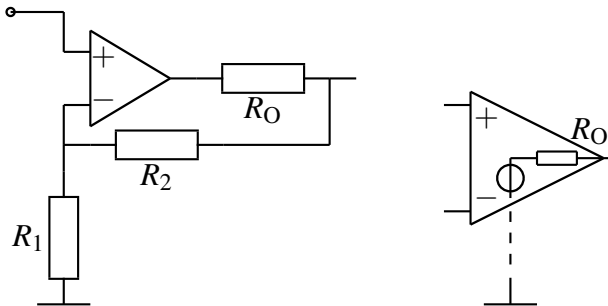
$$i = \frac{u_1}{R_1} \quad u_{\text{IN}} = u_1 + 0 \quad (12)$$

$$u_O = u_1 + u_2 = u_1 + R_2 i = u_1 + R_2 \frac{u_1}{R_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} u_1 \quad (13)$$

$$\frac{u_O}{u_{\text{IN}}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (14)$$

Tuloimpedanssi on nyt ääretön, koska signaali menee suoraan operaatiovahvistimelle. Lähtöimpedanssi on nytkin teoriassa nolla. Vähäisenä haittapuolena voisi mainita, että jännitevahvistusta ei voida säätää ykköistä pienemmäksi. Jänniteseuraaja, jonka jännitevahvistus on tasan yksi, on edellisen kytkennän yksinkertaistus.

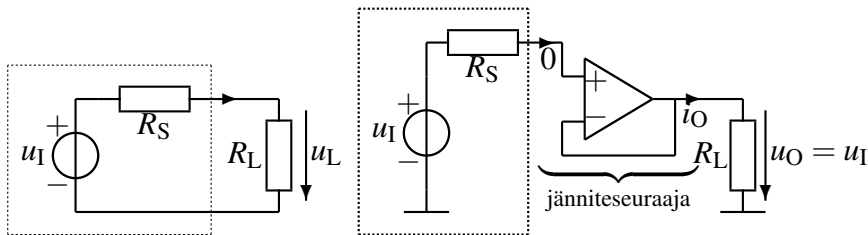
Jos operaatiovahvistimen lähtöliitäntään lisätään sarjavastus (kuva 17), ei toiminta ainakaan teoreettisesti katsottuna muutu, kunhan takaisinkytkentä otetaan koko piirin lähtöliitännästä eikä vastuksen ja operaatiovahvistimen välistä. Yllä olevat yhtälöt säilyvät täysin samoina. Voidaan myös ajatella, että kyseinen vastus  $R_O$  sijaitsee vahvistimen sisällä. Tällöin kyseessä on operaatiovahvistimen sisäinen lähtöresistanssi (esim.  $100 \Omega$ ), joka ei siis käytännössä juuri haittaa piirin toimintaa. On helppo osoittaa, että edellä mainittu haitta on sitä pienempi, mitä suurempi on raakavahvistus. Vastuksen  $R_O$  paikalla voisi olla jokin laajempikin piirin osa, kuten päätevahvistin, jonka lähdöstä takaisinkytkentäsignaali otettaisiin.



**Kuva 17.** Vahvistimen sisäinen lähtöresistanssi  $R_O$  ei vaikuta piirin toimintaan, jos avoimen silmukan jännitevahvistus on ääretön.

## 1.6 Jännitteenseuraja

Jos ei-invertoivassa kytkennässä vastus  $R_2$  oikosuljetaan, voidaan  $R_1$  jättää kokonaan pois, koska  $1 + \frac{0}{R_1} = 1 + \frac{0}{\infty} = 1$ . Kuvan 18 vahvistimen jännitevahvistus on siis yksi, eli kyseessä on operaatiovahvistimella toteutettu **jännitteenseuraja**. Jänniteseuraaaja käytetään puskurina (*buffer*), koska sen tuloimpedanssi on teoriassa  $\infty$  ja lähtöimpedanssi takaisinkytkennän ansiosta nolla. Kuormaan saadaan puskurivahvistimen kautta tarvittaessa suurehko virta ilman, että lähtöjännite putoaa signaalilähteen sisäisessä vastuksessa. Tällaisella toiminnalla on erittäin paljon käyttösovelluksia — usein puskureita käytetään jopa vain varmuuden vuoksi.



**Kuva 18.** Jänniteseuraaaja puskurina eli puskurivahvistimena. Ilman puskurointia jännite alenee lähteen sisäisen vastuksen  $R_S$  takia. Oikealla tätä ongelmaa ei ole, vaan  $u_O = u_I$ .