

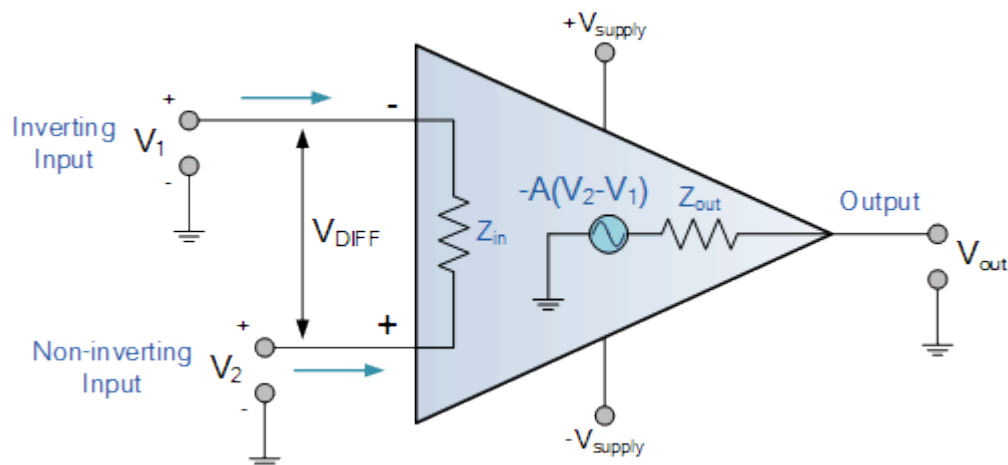
5. Operaatiovahvistin

5.1 Perusteita

Operaatiovahvistimet ovat seuraava askel transistorista monimutkaisempiin elektroniikan peruskomponentteihin. Operaatiovahvistin toteutetaan tyypillisesti vähintään kahdella transistorilla, mutta saattaa sisältää kymmeniä transistoreja. Silti sitä voi aina tarkastella yhtenä komponenttina ja sen käyttäytymisen hallitseminen matemaattisesti on paljon yksinkertaisempaa kuin esimerkiksi yksitransistorisen piirin virtojen ja jännitteiden laskeminen.

Operaatiovahvistimia on saatavissa sekä BJT:iin että FETiin pohjautuvina. Se on perusrompe kaikessa analogisessa mittaustekniikassa ja vahvistimissa. Esimerkkinä voisi mainita vaikkapa biosignaalien (EEG, EKG, EMG) mittaukset, RF-tekniikka ja erilaiset audiomikserit ja – vahvistimet.

Operaatiovahvistin on kolminapainen komponentti, jossa on kaksi suuri-impedanssista tuloa (*Input*) ja yksi pieni-impedanssinen lähtö (*Output*).



Kuva 57. Operaatiovahvistin

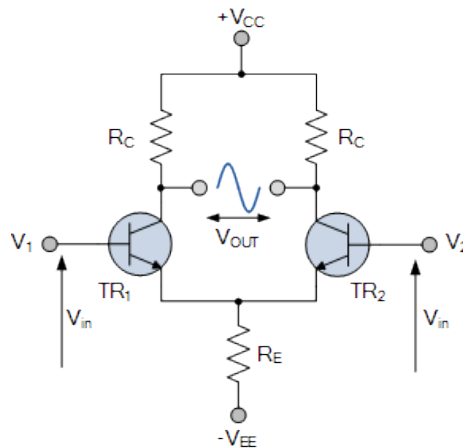
Kuvassa 57 on esitetty ideaalisen operaatiovahvistimen kaaviokuva.

Operaatiovahvistimen tulonavat:

- Positiivinen eli suora (*Non-inverting Input*) ei käännä jännitteen vaihetta
- Negatiivinen eli kääntävä (*Inverting Input*) kääntää jännitteen vaiheen
- Lähtöjännite (*Output*) on tulonapoihin tuotujen jännitteiden **erotus**.

Viimeisestä pallukasta seuraa, että operaatiovahvistin on luonteeltaan *differentiaalivahvistin* (Kuva 58).

Elektroniikan perusteet Osa 4: Operaatiovahvistin



Kuva 58. Differentiaalivahvistin kahdella NPN-transistorilla toteutettuna.

Kuvan 58 vahvistin tuottaa ulostulojännitteen V_{out} , joka on tulojännitteiden V_{in} ja V_{out} erotus.

Kuvan 58 vahvistimessa tuloapojen V_1 ja V_2 jännitteet V_{in} ja V_{out} ovat vastakkaisissa vaiheissa. Siten, jos TR_1 ja TR_2 ovat identtiset, yhteisellä emitterillä kulkee koko ajan vakiovirta. Ideaalisen operaatiovahvistimen lähtöjännite on nolla, jos tuloapoihin syötetään yhtä suuri vaihtojännite. Tämä ns. yhteismuotoinen vahvistus A_{cm} (Common Mode Gain) on siis ideaaliselle op ampille nolla. Todellisessa operaatiovahvistimessa on aina jonkin verran yhteismuotoisia signaaleja. Ne ovat signaaleja, jotka esiintyvät yhtä aikaa ja samassa vaiheessa molemmissa tuloissa.

Ideaaliselle operaatiovahvistimelle lähtöjännite $V_0 = A_d(V_+ - V_-)$, missä tulojännitteet ovat V_+ ja V_- sekä A_d differentiaalinen vahvistus. Todelliselle operaatiovahvistimelle lähtöjännitteeksi saadaan

$$V_0 = A_d(V_+ - V_-) + \frac{1}{2} A_{cm}(V_+ - V_-)$$

Yhteismuodon vaimennussuhde (Common Mode Rejection Ratio, CMMR) on

$$\text{CMMR} = \left(\frac{A_d}{|A_{cm}|} \right) = 10 \log \left(\frac{A_d}{A_{cm}} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{A_d}{|A_{cm}|} \right) \text{ dB}$$

CMMR tulee käsitteenä vastaan elektroniikassa hyvin usein. Mitä suurempi CMMR, sitä parempi. Käytännön sovellutuksissa yhteismuotoinen signaali on aina haitaksi ja se pyritään eliminoimaan. Esimerkkinä voisi mainita vaikkapa erilaiset balansoidut siirtolinjat, kuten soittajille ja laulajille tuttu XLR-mikrofoniliitäntä.

Ideaalisella operaatiovahvistimella on seuraavat ominaisuudet:

- **Tuloimpedanssi Z_{in} on ääretön, joten tuloapojen välillä ei kulje virtaa.**
- **Tuloapojen välinen jännite V_{DIFF} on nolla.**
- **Lähtöimpedanssi Z_{out} on nolla.**
- **Avoimen piirin vahvistus A_0 on ääretön.**
- **Kaistanleveys (BW) on ääretön.**
- **Offset-jännite (V_{io}) on nolla.**

Operaatiovahvistin toimii käytännössä lähes aina **takaisinkytkettynä (feedback)**. Se tarkoittaa, että osa lähtöjännitteestä palautetaan tulonastaan. Ilman takaisinkytkentää kyseessä on **avoimen piirin vahvistin**, jonka vahvistus kasvaa kontrolloimattomasti (teoriassa) äärettömäksi. Käytännössä

Elektroniikan perusteet Osa 4: Operaatiovahvistin

jännitteen kasvua rajoittaa käyttöjännitteet. Ikiliikkujaa ei ole edelleenkään keksitty.

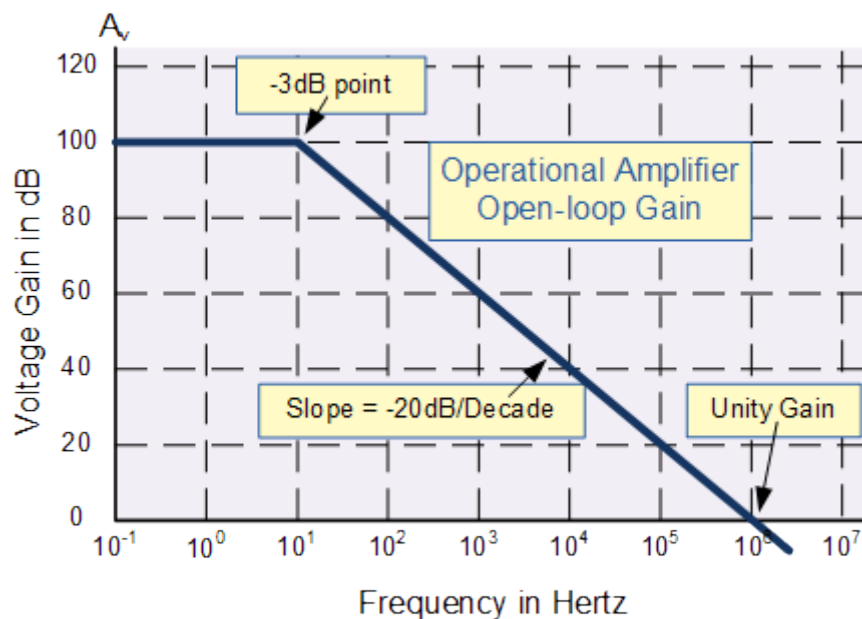
Operaatiovahvistimesta ei siis voi ottaa enemmän sähkötehoa kuin mitä sinne on käyttöjännitteillä syötetty. Jos vahvistimen vahvistus kasvaa niin suureksi, että se menee yli käyttöjännitteen, sanotaan että vahvistin **saturoituu** eli signaali leikkautuu maksimi/minimiarvoon.

Takaisinkytkentää voi verrata vaikkapa auton ohjaukseen. Mutkaisella tiellä rattia kääntämällä pitää korjata suuntaa kohti keskikaistaa, muuten mennään metsään. Samalla lailla sähköisessä piirissä takaisinkytkentä pyrkii palauttamaan signaalin haluttuun arvoon.

Operaatiovahvistimen **offset-jännite** on jännite lähdössä silloin kun tulojännitteet ovat molemmat nolliä.

Operaatiovahvistimen jännitevahvistuksen A_v voi takaisinkytkentätapauksessa laskea hyvinkin tarkasti ja yksinkertaisesti vastusten resistanssien suhteista.

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 20 \log \frac{V_{out}}{V_{in}} \text{ (dB)}$$



Kuva 59. Avoimen piirin vahvistimen taajusvaste ja GBP ("Unity Gain"). GBP on tässä tapauksessa noin 1 MHz.

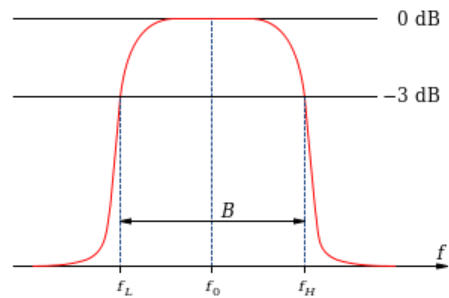
Ideaalinen operaatiovahvistin pystyy vahvistamaan kaikki taajuudet DC:stä (nollasta) äärettömän suuriin taajuuksiin samalla vahvistuksella. Silloin **kaistanleveys** (*Bandwidth*, BW) olisi ääretön. Käytännön opampeilla kaistanleveyttä rajoittaa vahvistuksen ja kaistanleveyden tulo (*Gain Bandwidth Product*, GBP). GBP on se taajuus, jolla jännitevahvistus $V_{out}/V_{in}=1$ ja sama suhde desibeleinä 0 dB (Kuva 59).

Elektroniikan perusteet Osa 4: Operaatiovahvistin

Yleisesti vahvistimen kaistanleveys määritellään -3 dB:n rajojen avulla. Rajataajuudet (yläraajataajuus f_H ja alarajataajuus f_L) ovat ne taajuuudet, joilla vahvistus on tippunut -3 dB maksimiarvosta. Kaistanleveys B on

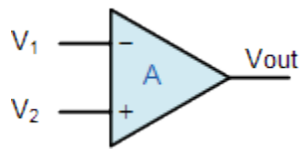
$$B = f_H - f_L$$

-3 dB vaimennus vastaa lähtöjännitteiden V_{out}/V_{in} suhdetta $0.707 = \sqrt{2}$



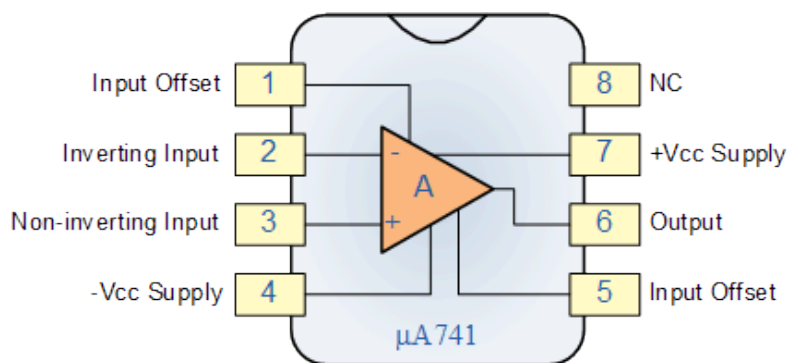
Operaatiovahvistimia on erilaisilla integroiduilla piireillä IC toteutettu tuhansittain. Vanhimmat ovat jo puoli vuosisataa vanhoja. Edelleen ainakin opetuskäytössä on paljon 741-sarjan operaatiovahvistimia, joka on tuotu markkinoille 70-luvulla.

Operaatiovahvistimen piirrossymboliin merkitään yleensä vain tulo- ja lähtönastat. Ei esimerkiksi käyttöjännitteitä. Mikäli kytkennässä ei vaadita jotain tietyn operaatiovahvistintyyppin erikoisominaisuuksia, voidaan opamp tarvittaessa yleensä korvata millä tahansa toisella opampilla. Kaikki lineaarisesti toimivat opampkytkennät, kuten vahvistimet, suodattimet, integraattorit, derivaattorit, ym. piirit voidaan analysoida kytkennässä kuvan 60 merkintöjen ja Kirchhoffin lakien avulla.



Kuva 60. Operaatiovahvistimen piirrossymboli.

Operaatiovahvistimet myydään useimmiten 8-nastaisessa DIL-kotelossa. Nastanumerointi saattaa vaihdella, mutta tyyppillisesti se on kuvan 60 mukainen. Ellei ole varma, pitää nastajärjestys ehdottomasti tarkistaa opparin datalehdessä !



Kuva 61. $\mu A741$ -tyyppisen operaatiovahvistimen nastajärjestys.

Labroissa tullaan 741:n tilalla käyttämään uudempaa, paremmilla spekseillä mutta samalla toiminnallisuudella ja nastajärjestyksellä varustettua [Texas Instrumentsin operaatiovahvistinta TL071](#).

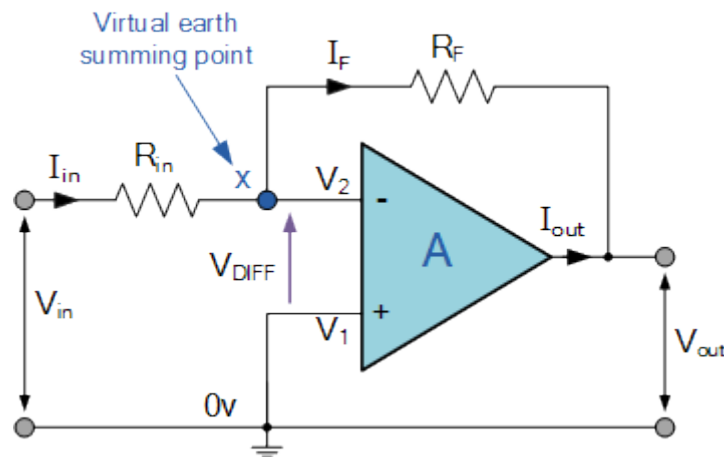
Elektroniikan perusteet Osa 4: Operaatiovahvistin

Muutama käytännön sananen käyttöjännitteistä. Operaatiovahvistimia on tarjolla sekä yksipuolisella (esim 0 ja +5V) tai kaksipuolisella jännitteenyötöllä (esim +/-15V). Yksipuoliset ovat monissa sovellutuksissa suositumpia niiden pienemmän virrankulutuksen ja käytettävyyden takia. Onhan tuollainen oppari helppo tökätä kiinni vaikka paristoon tai USB-väylään. Yksipuolisella opparilla on yksi vakava heikkous: Se ei käsittele (ainakaan ilman monimutkaisehkoja lisäkytkentöjä) negatiivisia jännitteitä. Operaatiovahvistinhan toimii vain ja ainoastaan käyttöjännitteensä rajoissa. Jos halutaan vahvistaa tai suodattaa vaihtojännitteitä, jotka ovat nollan suhteen symmetrisiä, on helpompi käyttää kaksipuolista jännitesyöttöä (kuten tällä kurssilla).

5.2 Operaatiovahvistimen kytkennät

5.2.1 Kääntävä vahvistin

Nimensä mukaisesti tämä vahvistin kääntää tulosignaalin vaiheen.



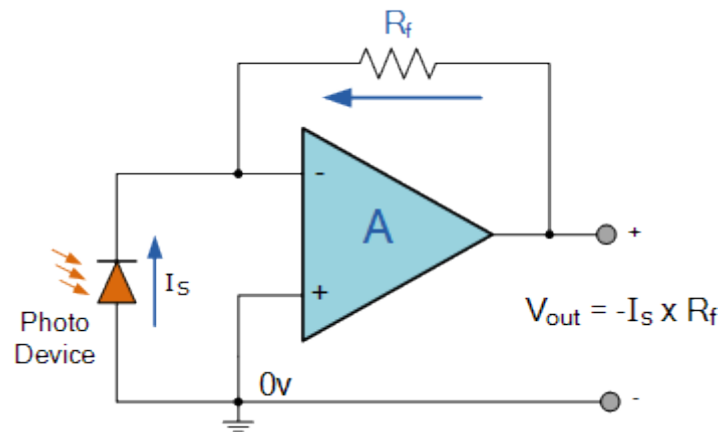
Kuva 62. Kääntävä operaatiovahvistin.

Idealiselle operaatiovahvistimelle todettiin, että tulonavoissa ei kulje virtaa ja että tulonapojen välinen jännite on nolla. Tästä seuraa, että tässä kytkennässä kääntävän tulonavan ja etuvastuksen R_{in} liitoskohta (X) on maan potentiaalissa (samassa kuin ei-kääntävä tulo). Pisteeseen X muodostuu ”virtuaalinen maapiste”, jolloin operaatiovahvistimen tuloimpedanssi on sama kuin etuvastuksen arvo. Vahvistus määräytyy takaisinkytkentävastuksen R_f ja etuvastuksen R_{in} resistanssien suhteesta.

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f}{R_{in}}$$

Miinusmerkki tarkoittaa sitä, että tulo- ja lähtösignaalit ovat vastakkaisissa vaiheissa. Kääntävän vahvistimen käytännön sovellutuksena on ns. transresistanssivahvistin, joka on periaatteessa virta-jännite-muuntaja. Sitä voidaan käyttää sovellutuksissa, joissa pitää muuttaa hyvin pieni virta järkevän kokoiseksi jännitteeksi. Esimerkiksi seuraavassa kuvassa 63 on valodiodi kytkettynä operaatiovahvistimeen.

Elektroniikan perusteet Osa 4: Operaatiovahvistin

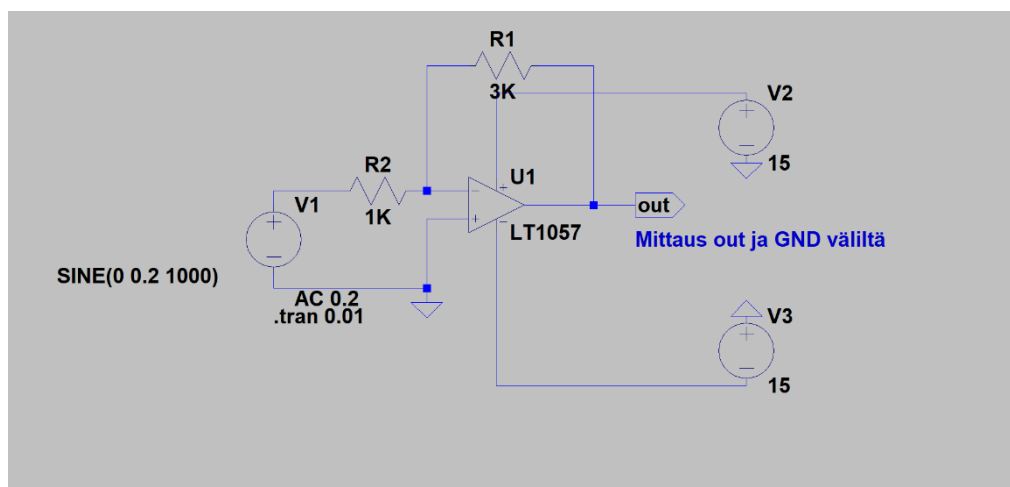


Kuva 63. Transresistanssivahvistimen käyttö valodiodin virran vahvistamiseen.

Kun tulevan valon energia ($E=hc/\lambda$) on riittävän suuri, elektroneja pääsee kulkemaan pn-rajapinnalla olevan tyhjennysalueen 0.7V:n kynnysjännitteen yli, jolloin diodi alkaa johtamaan antaa hyvin pienen kollektorivirran I_s . Lähtöjännite saadaan kaavasta $V_{out}=I_s R_f$. Lähtöjännite on siis verrannollinen diodivirtaan ja siten diodille tulevan valon määrään.

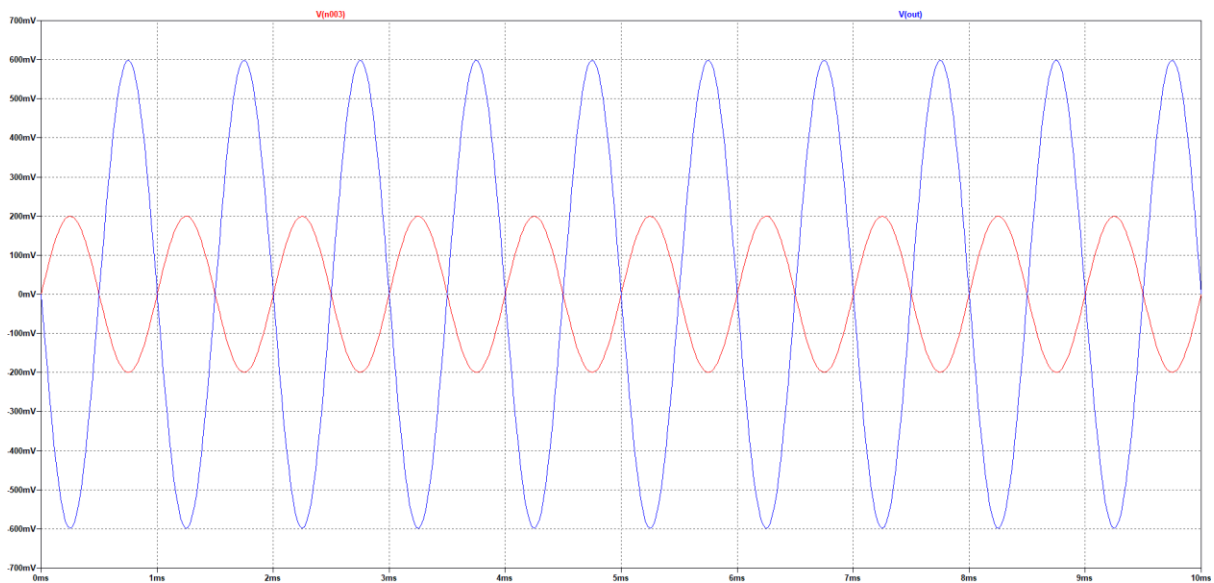
Seuraavassa on esitetty kääntävän vahvistimen simulointi LTSpicella. Pari huomautusta. LTSpice sisältää melkein yksinomaan Linear Technologyn (LTxxxx) piirejä. Siten esimerkiksi 741-sarjan oppareita (joka on alun perin National Semiconductorin valmistama piiri) ei LTSpicen kirjastoista löydy. Ei myöskään Texas Instrumentsin TL071-vahvistinta. Pienellä Google-haulla kuitenkin selviää, että LT1057 vastaa ominaisuuksiltaan TL071:tä, joten käytetään sitä.

Operaatiovahvistin vaatii simulointiin käyttöjännitteet, jotka on merkitty kuvaan symboleilla V2 ja V3. Lähtösignaalin mittausta tässä simuloinnissa tapahtuu labelista out. Tosipaikassa oskilloskooppi kytketään opparin nastan 6 ja maan välille. Jännitteenä on 1000 Hz sini, 0.2 Vpp. Transiettisimulointi 0.01 sekuntia pitkäältä ajalta, johon mahtuu 10 sinijaksoa.



Kuva 64. Kääntävän vahvistimen LTSpice-simulointi

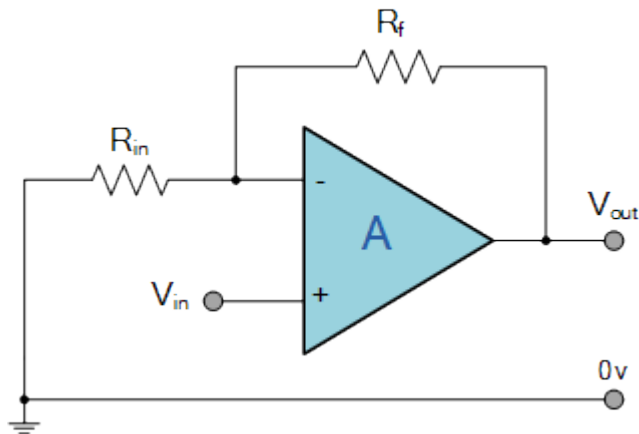
Elektroniikan perusteet Osa 4: Operaatiovahvistin



Kuva 65. Kääntävän vahvistimen tulo- ja lähtöjännitteetLTSpice-simuloinnista.

5.2.2 Ei-kääntävä vahvistin

Tulojännite ohjataan ei-kääntävään tulonapaan. Tulo ja lähtö ovat samassa vaiheessa. Kääntävästä saadaan ei-kääntävä vaihtamalla vastukset (-) tulosta (+)tuloon (nastasta 2 nastaan 3).



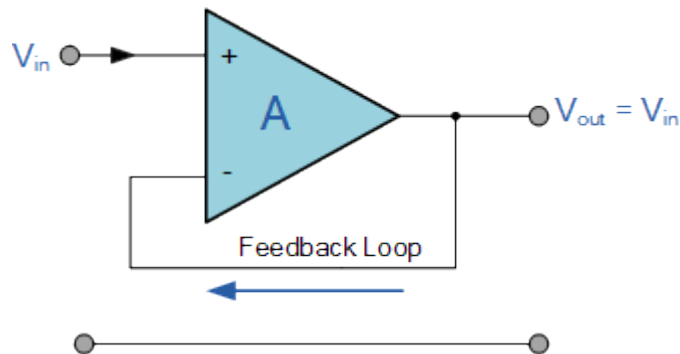
Kuva 66. Ei-kääntävä operaatiovahvistin.

Vahvistus saadaan kaavasta

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_{in}}$$

Elektroniikan perusteet Osa 4: Operaatiovahvistin

Sovellutuksena on jänniteseuraaja (*Voltage Follower, Unity Gain Buffer*). Kytkentä on äärimmäisen k. Kytkentä on äärimmäisen yksinkertainen:



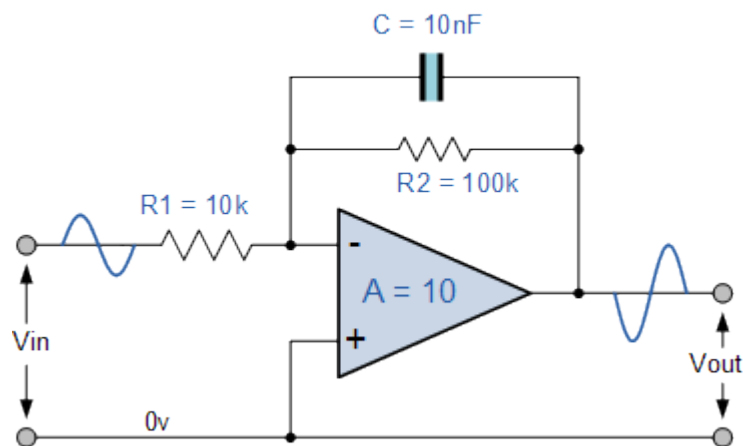
Kuva 67. Jänniteseuraaja

Tämä kytkentä päästää tulosignaalin muuttumattomana läpi. Toisin sanoen, tulosta lähtöön ei kulje virtaa mutta jännite säilyy muuttumattomana. Sen avulla voidaan tehdä impedanssisovitus tai kytkennän osien eristäminen tosistaan. [Tästä linkistä](#) voi lukea aiheesta lisää.

5.2.3 Alipäästösuodatin

Operaatiovahvistimilla toteutettuja aktiivisia¹ alipäästösuodattimia käytetään mm. audiovahvistimissa, ekvalisaattoreissa ja kaiuttimien jakosuotimissa. Jakosuotimessa esimerkiksi matalat taajuudet ohjataan subwooferille ja keski- ja korkeat taajuudet erillisille kaiuttimelementeille.

Kääntävä alipäästösuodatin saadaan lisäämällä kondensaattori takaisinkytkentävastuksen rinnalle. Se voidaan luonnollisesti toteuttaa joko kääntävänä tai ei-kääntävänä.

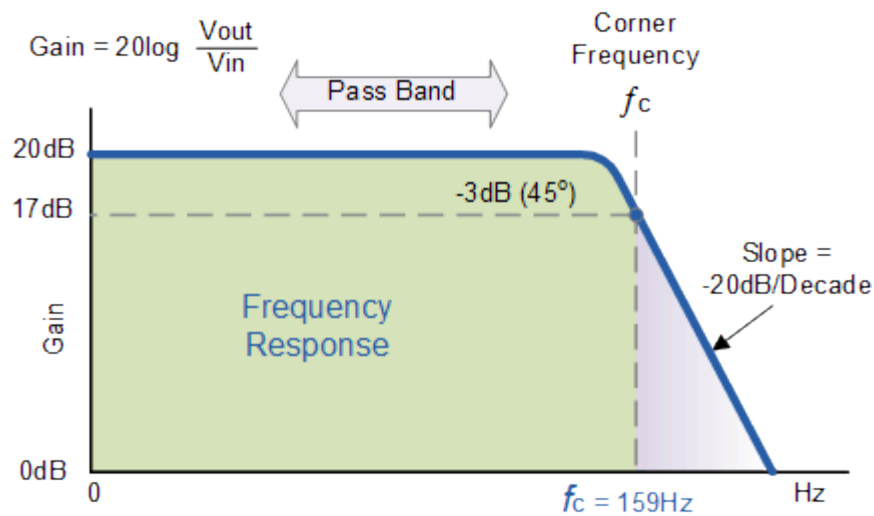


Kuva 68. Operaatiovahvistimella toteutettu alipäästösuodatin.

Alipäästösuodattimen taajuusvastekäyrä näyttää kuvan 69 kaltaiselta.

¹ Aktiivinen suodatin tarkoittaa sitä, että signaalia vahvistetaan jollain menetelmällä. Vastakohta on passiivinen suodatin, jossa on vain vastus ja kondensaattori ja joka ei vahvista tulosignaalia millään taajuudella.

Elektroniikan perusteet Osa 4: Operaatiovahvistin



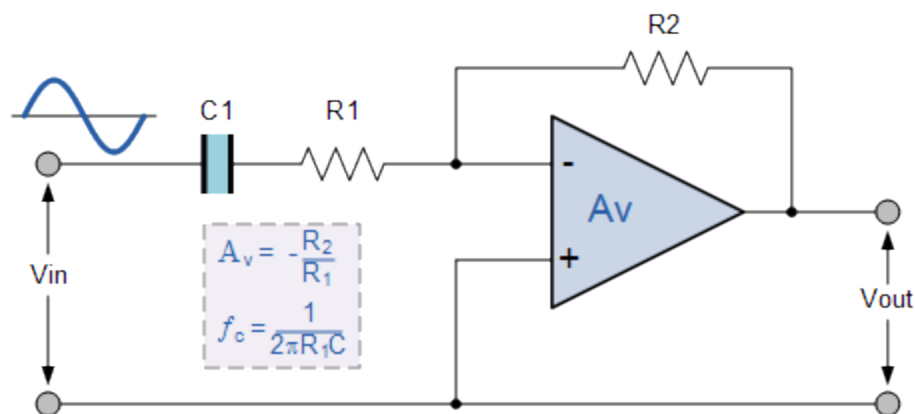
Kuva 69. Alipäästösuodattimen taajuusvaste.

Suodattimen rajataajuus f_c on se taajuus, jossa signaali on vaimentunut -3 dB (70.7%). Kuvan 68 merkinnöillä.

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C}$$

5.2.4 Ylipäästösuodatin

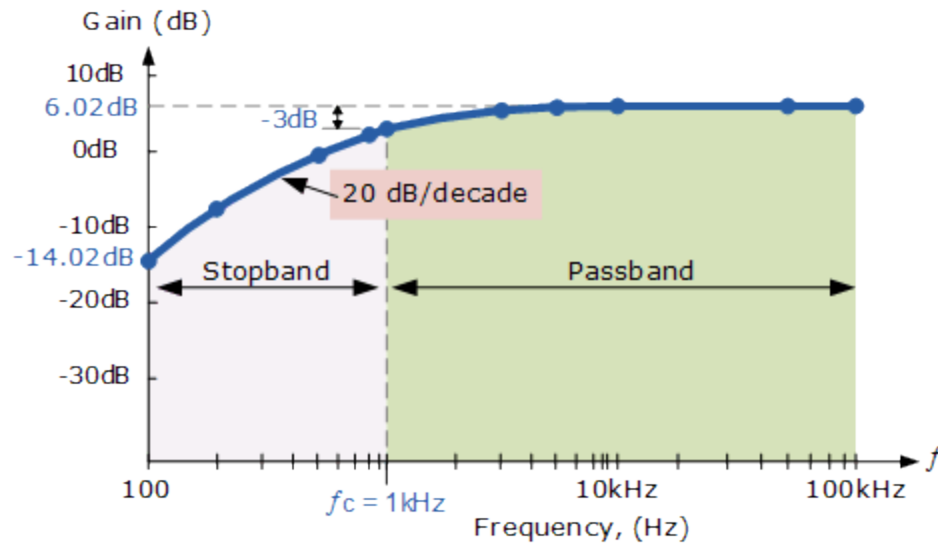
Vaihdetaan kondensaattori etuvastuksen eteen. Muistetaan tässä vaiheessa jälleen, mitä kondensaattori tekee: Se ei päästä tasajännitteitä läpi ja päästää sitä paremmin, mitä suurempi on tulojännitteen taajuus.



Kuva 70. Operaatiovahvistimella toteutettu ylipäästösuodatin.

Ylipäästösuodattimen taajuusvaste nähdään kuvassa 71.

Elektroniikan perusteet Osa 4: Operaatiovahvistin



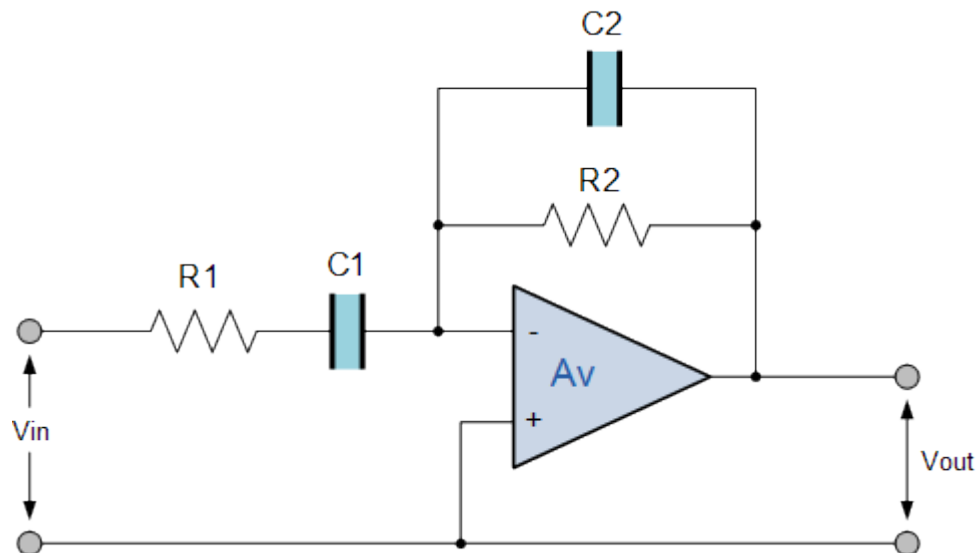
Kuva 71. Ylipäästösuodattimen taajuusvaste.

Rajataajuus on kuvan 70 merkinnöillä

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_1 C}$$

5.2.5 Kaistanpäästösuodatin

Vahvistin päästää ala- ja ylärajataajuuden välissä olevat taajuudet läpi ja vaimentaa muut.



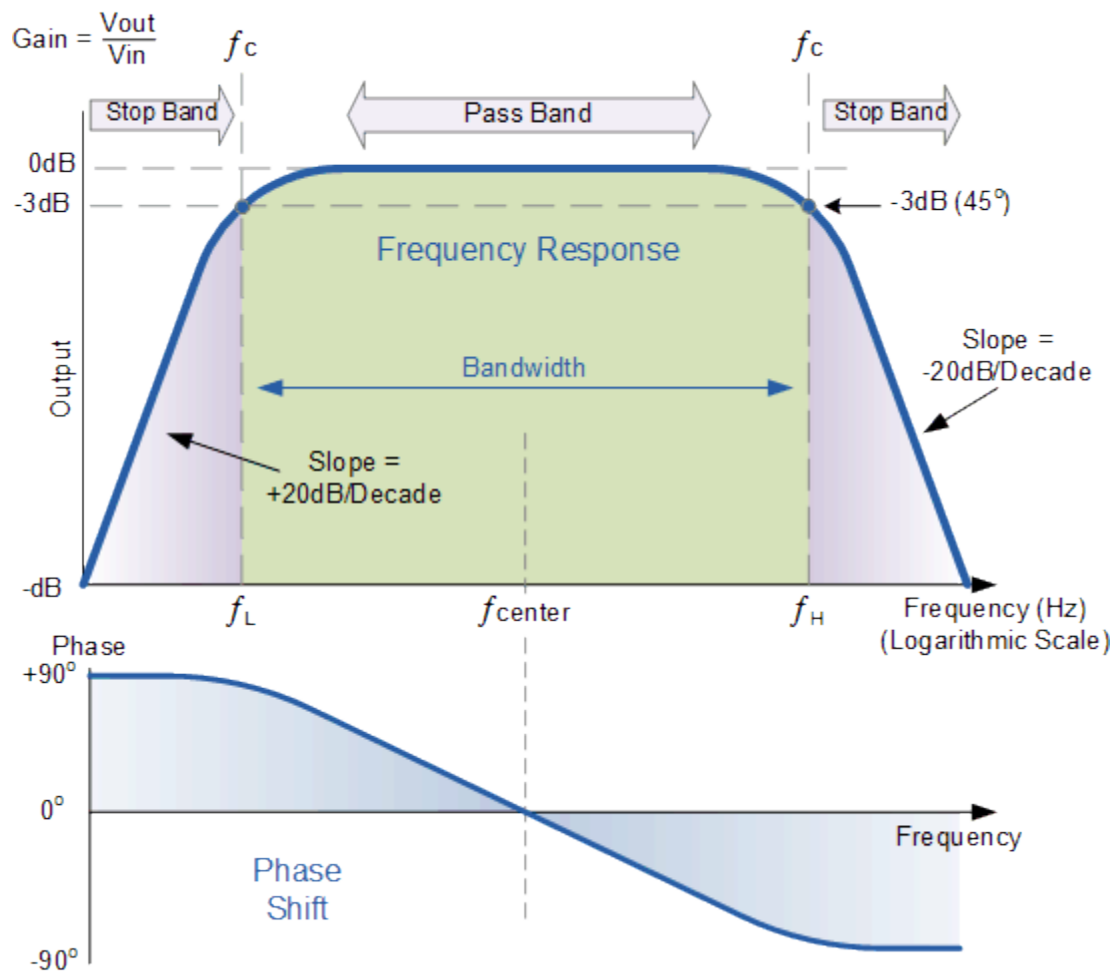
Kuva 72. Kaistanpäästösuodatin

Vahvistus ja rajataajuudet näkyvät seuraavassa kuvassa.

Elektroniikan perusteet Osa 4: Operaatiovahvistin

$$\text{Voltage Gain} = -\frac{R_2}{R_1}, \quad f_{c1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}, \quad f_{c2} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$$

Kuva 73. Kaistanpäästösuodattimen vahvistus ja rajataajuudet.



Kuva 74. Kaistanpäästösuodattimen taajuusvaste ja vaihevaste.

Kuvien merkinnöissä $f_{c1}=f_H$ ja $f_{c2}=f_L$

Taajuuskaistan keskitaajuudella vahvistus on suurimmillaan. Sitä kutsutaan resonanssitaajuudeksi ja se voidaan laskea kaavasta

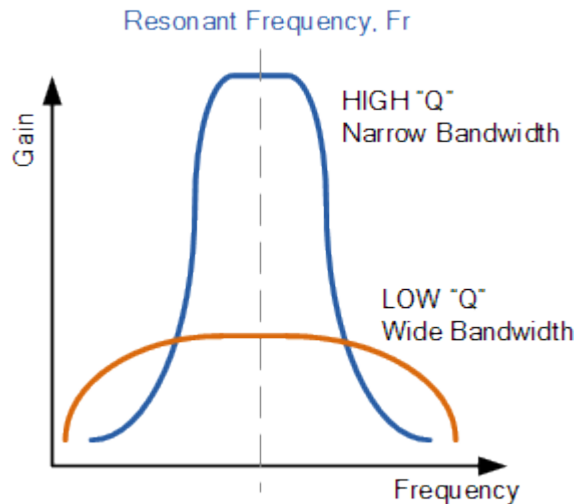
$$f_{center} = f_r = \sqrt{f_L f_H}$$

Suodattimen hyvyttä, eli kuinka "terävä" vaste käyrään saadaan, kuvataan hyvyysluvulla (*Quality Factor*) Q. Mitä suurempi Q, sitä kapeampi kaistanleveys ja päinvastoin.

Elektroniikan perusteet Osa 4: Operaatiovahvistin

Jos merkitään kaistanleveyttä $\Delta f = f_H - f_L$, niin Q-arvo määritellään resonanssitaajuuden ja kaistanleveyden suhteena kaavalla

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f}$$

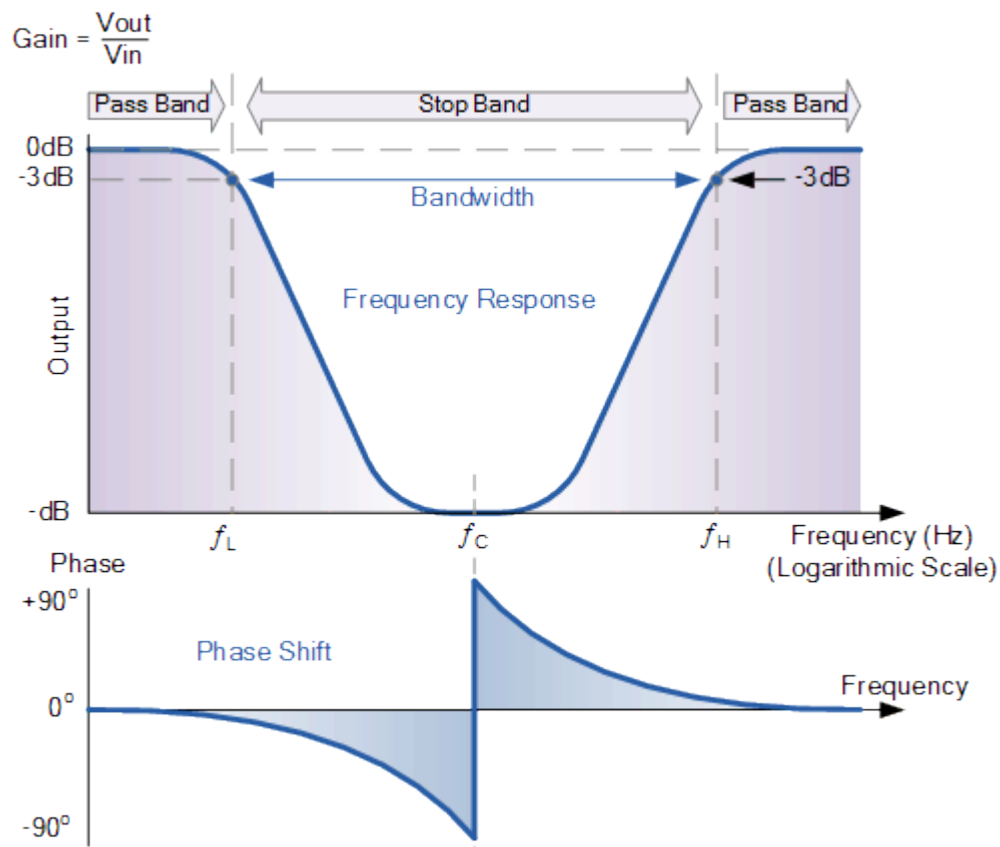


Kuva 75. Suodattimen Q-arvo

5.2.6 Kaistanestosuodatin

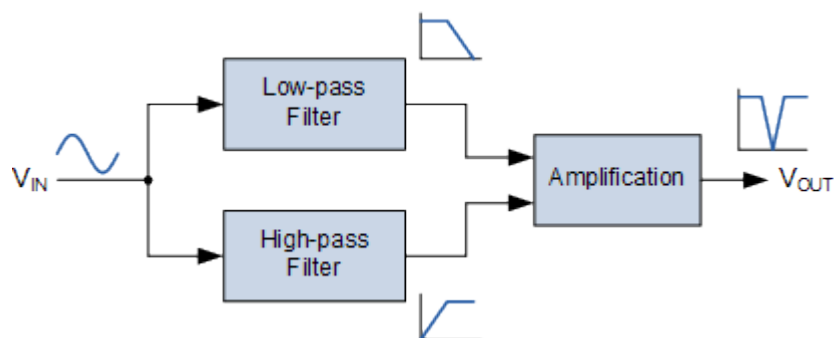
Ali- ja ylipäästösuodattimia yhdistelemällä saadaan myös kaistanestosuodatin, joka estää tietyn taajuuskaistan sisällä olevat taajuudet menemästä läpi mutta päästää kaistan ulkopuolella olevat taajuudet. Kaistanestosuodattimen eräs erikoistapaus on ns. *notch-suodatin*, joka suodattaa vain hyvin kapean taajuuskaistan, ideaalisessa tapauksessa vain yhden taajuuden. Sitä käytetään erityisesti 50Hz verkkohäiriön poistoon. Kuvassa 76 on esitetty kaistanestosuodattimen taajuus- ja vaihevasteet.

Elektroniikan perusteet Osa 4: Operaatiovahvistin



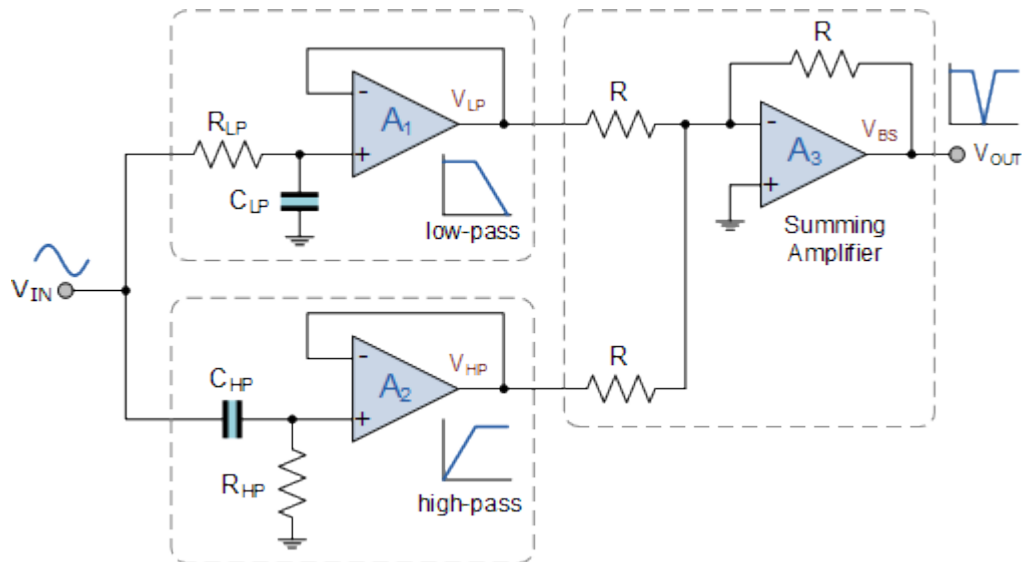
Kuva 76. Kaistanestosuodattimen taajuus- ja vaihevaste.

Kaistanestosuodattimelle on voimassa kaikki samat kaavat kuin kaistanpäästösuodattimellekin. Haluttu vaste saadaan kytkemällä ensin ali- ja ylipäästösuodattimet rinnan ja niiden perään summaava vahvistin.



Kuva 77. Kaistanestosuodattimen lohkokaavio.

Elektroniikan perusteet Osa 4: Operaatiovahvistin



Kuva 78. Kaistanestosuodatin.

Esimerkki: Halutaan tehdä kuvan 78 mukainen kaistanestosuodatin, jonka alarajataajuus on 200 Hz ja ylärajataajuus 800 Hz. Käytössä on 10 kΩ vastuksia ja 0.1μF kondensaattoreita. Lasketaan vastukset:

$$f_L = \frac{1}{2\pi R_L C} = 200\text{Hz} \quad \text{and} \quad C = 0.1\mu\text{F}$$

$$\therefore R_L = \frac{1}{2\pi \times 200 \times 0.1 \times 10^{-6}} = 7958\Omega \text{ or } 8\text{k}\Omega$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi R_H C} = 800\text{Hz} \quad \text{and} \quad C = 0.1\mu\text{F}$$

$$\therefore R_H = \frac{1}{2\pi \times 800 \times 0.1 \times 10^{-6}} = 1990\Omega \text{ or } 2\text{k}\Omega$$

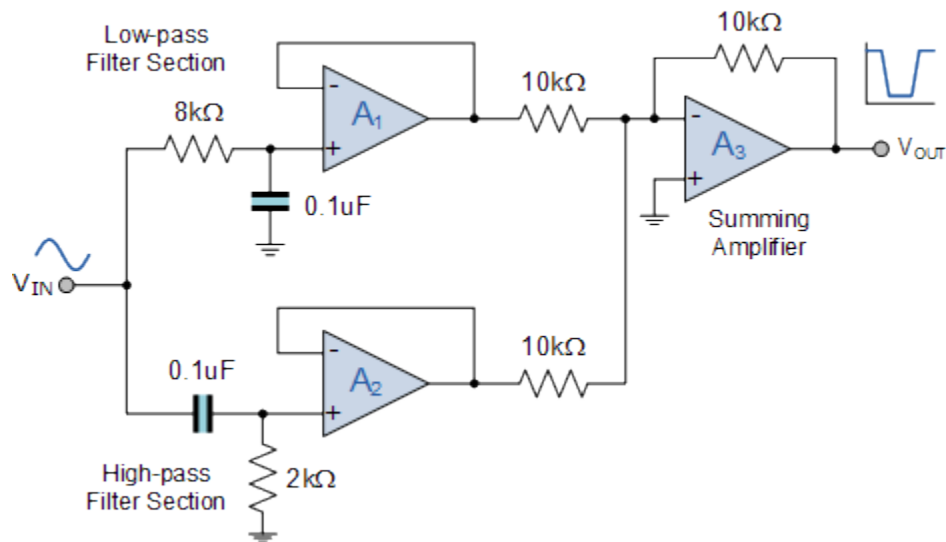
Keskitaajuus, kaistanleveys ja Q-arvo:

$$f_C = \sqrt{f_L \times f_H} = \sqrt{200 \times 800} = 400\text{Hz}$$

$$f_{BW} = f_H - f_L = 800 - 200 = 600\text{Hz}$$

$$Q = \frac{f_C}{f_{BW}} = \frac{400}{600} = 0.67 \text{ or } -3.5\text{dB}$$

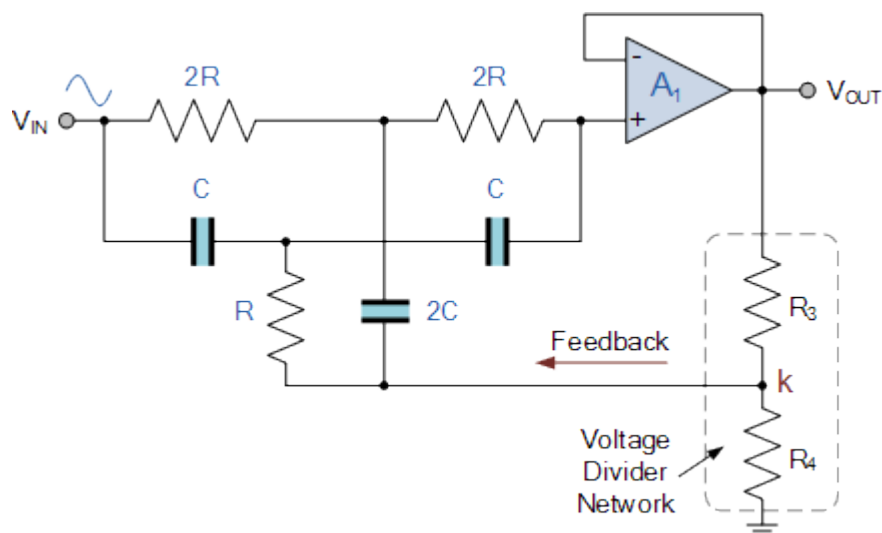
KytKentä on esitetty kuvassa 79.



Kuva 79. Esimerkissä mitoitettu kaistanestosuodatin.

Viimeisenä esimerkkinä suodattimista on Twin-T notch-suodatin. Sillä saadaan siis hyvin kapeakaistainen estokaista. Yläosan $2R$ -vastukset ja kondensaattori $2C$ muodostavat (paitsi T-kirjaimen myös) alipäästösuodattimen. Alaosan kondensaattorit C ja vastus R muodostavat (toisen T-kirjaimen ja) ylipäästösuodattimen. Taajuus, joka tällä kytkennällä poistetaan, saadaan yksinkertaisesti kaavasta

$$f_N = \frac{1}{4\pi RC}$$



Kuva 80. Twin-T suodatin.