

6. Operaatiovahvistimen sovellutuksia

Edellä on jo käsitelty muutama tärkeä operaatiovahvistinsovellus, kuten

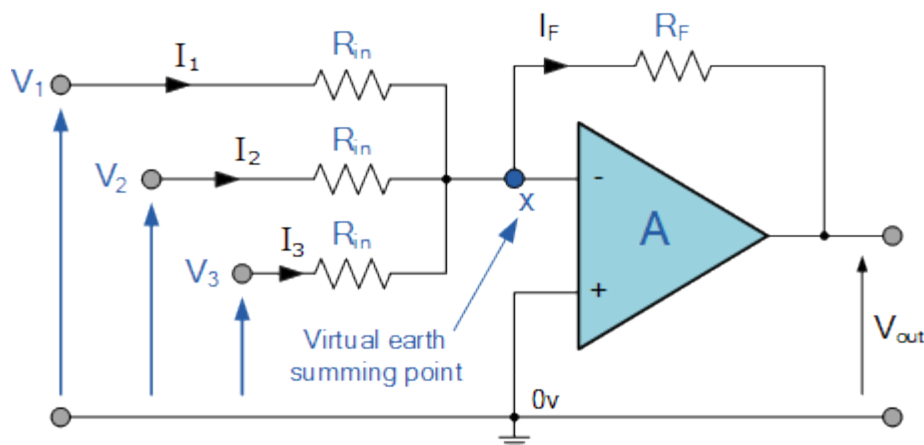
- Jänniteseuraaja
- Aktiiviset suodattimet

Katsotaan vielä kurssin lopuksi muutama keskeinen sovellus.

6.1 Summaaja

6.1.1 Summaajan perusteet

Kuvan 81 summaajassa lähtöjännite V_{out} on verrannollinen tulojännitteisiin V_1 , V_2 , jne.



Kuva 81. Jännitesummaaja

Kyseessä on kääntävä vahvistin ja jokainen tulo voidaan ajatella tulevan itsenäisesti kääntäen vahvistetuksi, joten

$$I_F = I_1 + I_2 + I_3 = \left[\frac{V_1}{R_{in}} + \frac{V_2}{R_{in}} + \frac{V_3}{R_{in}} \right]$$

$$-V_{out} = \frac{R_F}{R_{in}} V_1 + \frac{R_F}{R_{in}} V_2 + \frac{R_F}{R_{in}} V_3$$

$$-V_{out} = \frac{R_F}{R_{in}} [V_1 + V_2 + V_3 \dots]$$

Suora jännitesummaaja on myös mahdollista tehdä, jos resistanssit R_{in} on kaikille tulojännitteille sama ja lisäksi $R_F = R_{in}$.

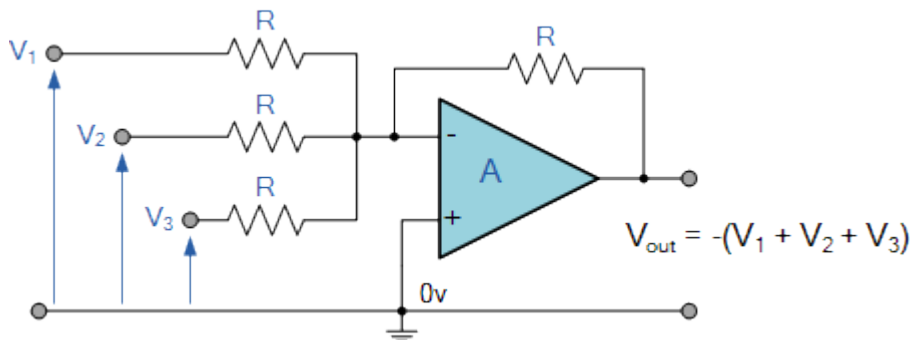
Jos tuloresistanssit eivät ole samoja, on kyseessä skaalaava summain ja edellinen yhtälö voidaan kirjoittaa muotoon

Elektroniikan perusteet Osa 5: Operaatiovahvistimen sovellutuksia

$$-V_{\text{out}} = \frac{R_F}{R_1} V_1 + \frac{R_F}{R_2} V_2 + \frac{R_F}{R_3} V_3 \dots$$

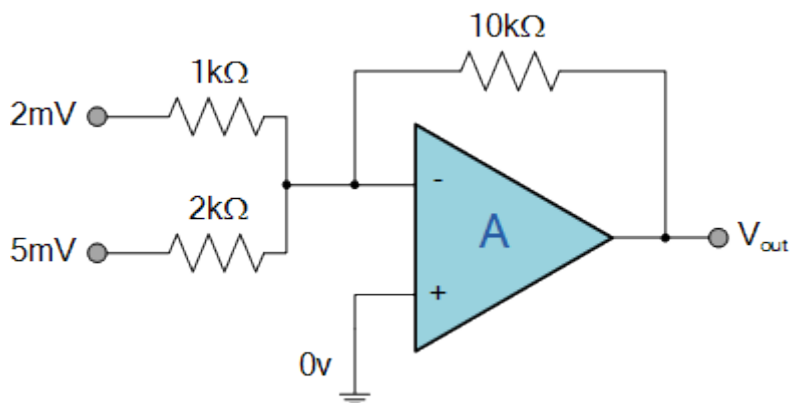
$$-V_{\text{out}} = R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \dots \right)$$

Jos halutaan ainoastaan summaus ilman vahvistusta, laitetaan tulovastukset ja takaisinkytkentävastus samaan arvoon (Kuva 82).



Kuva 82. Jännitesummaaja ilman vahvistusta

Esimerkki: Mikä on kuvan mukaisen summaajan lähtöjännite?

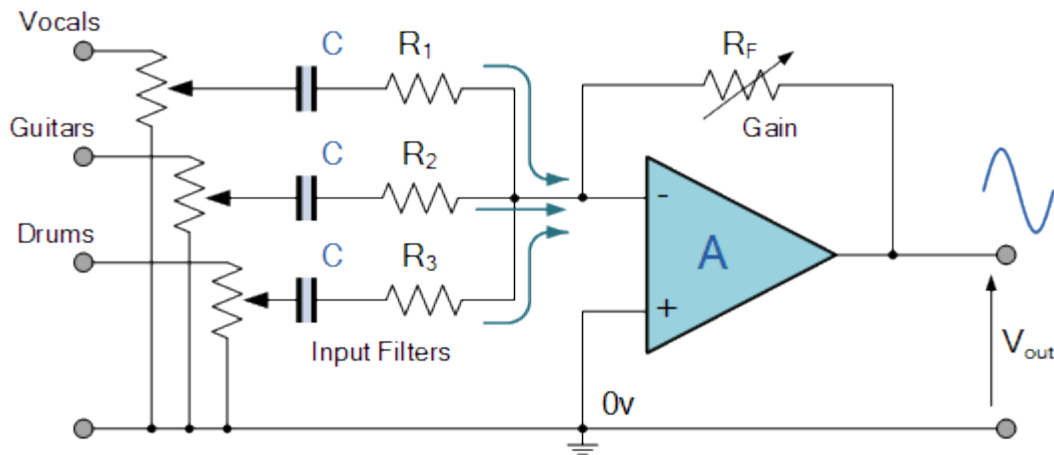


Lasketaan tunnilla. Vastaus -45 mV.

6.1.2 Audiomikseri

Kuvassa 83 vahvistimelle tuodaan signaalit laulumikiltä, kitaralta ja rummuilta. Signaalien voimakkuutta toisiinsa nähden voidaan säätää potentiometreillä eli säätövastuksilla (kuvassa nuolet vasemmalle). Summasignaali lähetetään vahvistimelle.

Elektroniikan perusteet Osa 5: Operaatiovahvistimen sovellutuksia

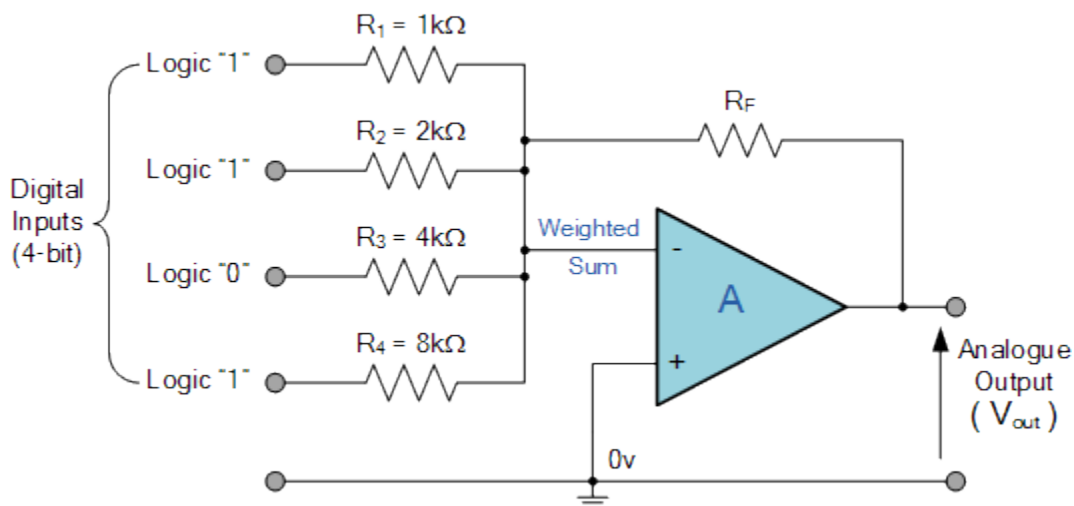


Kuva 83. Audiomikseri

6.1.2 Digitaal-analogimuunnin (DA-muunnin)

Jos käytetään musiikkihommia vielä esimerkkinä, niin esimerkiksi tietokoneen äänikortissa on DA-muunnin, joka muuttaa tietokoneessa digitaalisessa muodossa olevan signaalin analogiseksi ennen kuin se menee kaiuttimelle. Hifistit ostavat erillisiä USB-väylään kytkettäviä DA-muuntimia, jotka eristävät tietokoneen hurinat vielä tehokkaammin kuin tavallinen emolevylle liitetty äänikortti.

Kuvassa 84 on esitetty yksinkertaisuuden vuoksi 4-bittisen DA-muuntimen kytkentä. Vastusten arvo tuplaantuu jokaisessa tulossa. Jos tuloihin tuodaan digitaalinen 0 (=0 V) tai 1 (=5 V), on (analoginen) lähtösignaali painotettu summa digitaalisista tuloista.



Kuva 84. 4-bittinen DA-muunnin

Suurin resistanssi vastaa vähiten merkitsevää bittiä ja pienintä ulostulojännitettä. Oheisessa linkissä vielä esimerkki lukuarvoilla <https://hackernoon.com/making-a-dac-from-an-op-amp-8960c3addc28>

Elektroniikan perusteet Osa 5: Operaatiovahvistimen sovellutuksia

Analoginen jännite saadaan soveltamalla jo esillä ollutta kaavaa

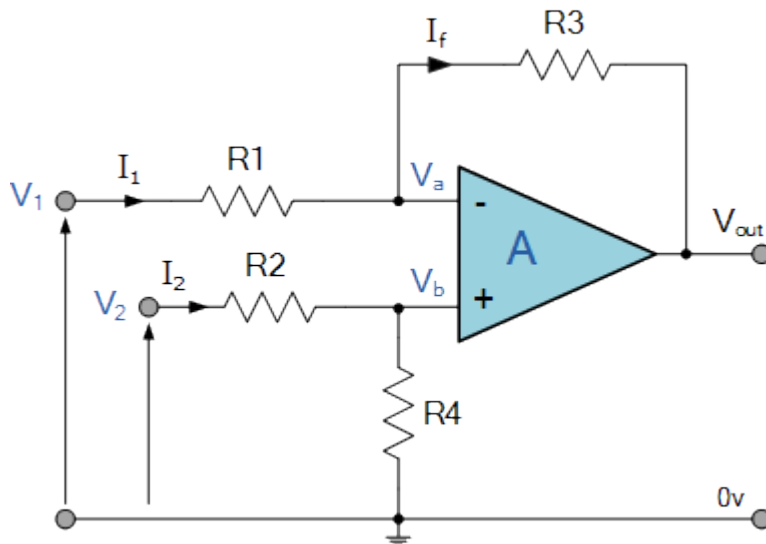
$$V_{\text{out}} = R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \dots \right)$$

missä jännite on joko 0 tai 5 V.

6.2 Differentiaalivahvistin

6.2.1 Perusteet

Tähän mennessä on tarkasteltu ainoastaan kytkentöjä, joissa käytetään toista tulonapaa. Jos molemmat kytketään yhtä aikaa, saadaan *differentiaalivahvistin*. Alussa jo todettiin, että kaikki operaatiovahvistimet ovat differentiaalivahvistimia, eli lähtö on tulojen erotus. Kun tulonapoihin tuodaan kaksi eri jännitettä, oppari vahvistaa niiden erotuksen.



Kuva 85. Differentiaalivahvistin

Menemättä tässä kaavan johtoon yksityiskohtaisemmin, saadaan lähtöjännite kaavasta

$$V_{\text{out}} = -V_1 \left(\frac{R_3}{R_1} \right) + V_2 \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \left(\frac{R_1 + R_3}{R_1} \right)$$

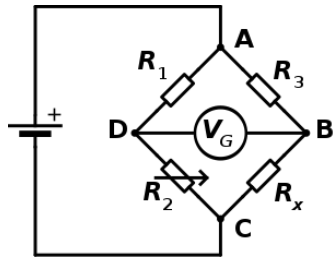
Jos $R_1=R_2$ ja $R_3=R_4$, kaava yksinkertaistuu muotoon

$$V_{\text{out}} = \frac{R_3}{R_1} (V_2 - V_1)$$

Jos kaikki vastukset ovat samoja, eli $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, kytkennästä tulee yksikkövahvistus-differentiaalivahvistin (*Unity Gain Differential Amplifier*) jolloin vahvistus A on 1 ja lähtöjännite $V_{\text{out}} = V_2 - V_1$.

6.2.2 Wheatstonen silta differentiaalivahvistimella

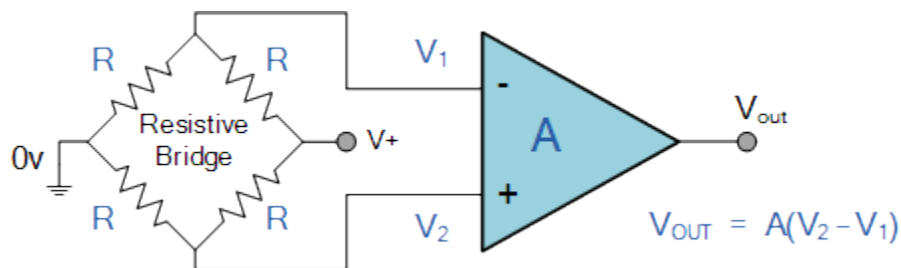
Wheatstonen siltakytkentä on hyvin yleinen sähkötekniikassa käytetty kytkentä, myös ilman vahvistinta.



Kuva 86: Wheatstonen silta

Perusidea on, että kun silta on tasapainossa, eli kaikki resistanssit ovat yhtä suuria, ei sillan keskihaarassa kulje virtaa. Kuvassa 86 keskihaaraan on sijoitettu tarkka virtamittari (V_G), *galvanometri*. Kun $R_2/R_1 = R_x/R_3$, tuntemattoman vastuksen R_x resistanssi voidaan määrittää säätämällä R_2 :lle sellainen arvo, että keskeltä V_G :n kautta kulkeva virta on nolla.

Kuvan 87 mukaisella differentiaalivahvistinkytkennällä voidaan havaita hyvin pieniä muutoksia sillan tasapainossa.



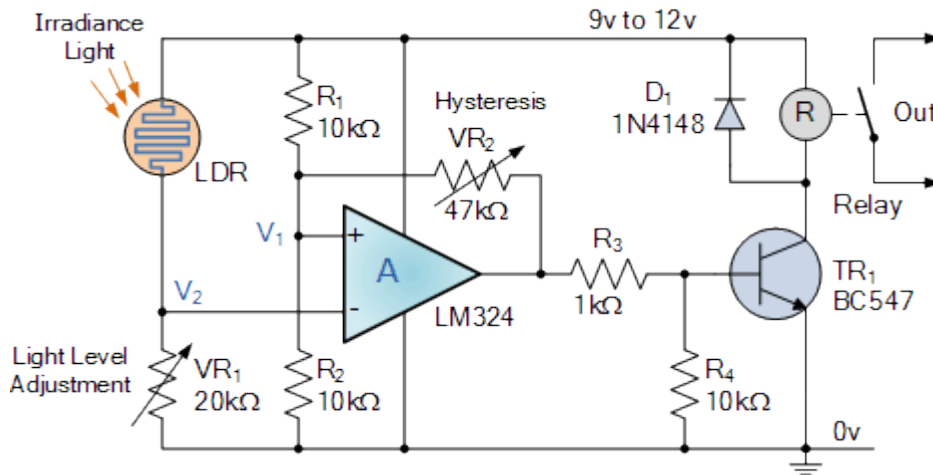
Kuva 87. Wheatstonen silta ja differentiaalivahvistin

Kytkeytys on differentiaalinen jännitevertaaja, joka vertaa tulojen jännitteitä. Jos toinen napa kytketään kiinteään referenssijännitteeseen ja toiseen tuodaan vaikkapa termistorin ja valodiodin tuottama jännite, kytkentä havaitsee joko lämpötilan tai valoisuuden muutoksia. Jälkimmäisestä esimerkki seuraavaksi.

6.2.4. Valolla aktivoituva differentiaalivahvistin

Kuvan 88 kytkentä toimii valolla aktivoituvana kytkimenä, joka kytkee releen (R) joko päälle tai pois. Kytkin menee auki tai kiinni kun valovastuksen (LDR) havaitseman valon määrä ylittää tai alittaa valitun kynnystason. Tulonapaan 3 on kytketty referenssijännite jännitteenjakokytkennän (R_1 ja R_2) kautta.

Elektroniikan perusteet Osa 5: Operaatiovahvistimen sovellutuksia



Kuva 88. Valolla aktivoituva kytkin

ON/Off-jännite määräytyy pisteen V₁ jännitteestä, jota säädetään vastuksella VR₂¹. Operaatiovahvistimen miinustulo on kytketty valokennoon, joka on tässä tapauksessa valovastus. LDR (*Light Dependent Resistor*)-vastuksen resistanssi riippuu siihen osuvan valon määrästä. Resistanssi on tyypillisesti (NORP12) auringonvalossa 500 Ω ja pimeässä >20kΩ.

Koska resistanssi riippuu valon määrästä, myös jännite V₂ riippuu valon määrästä. Sopivalla VR₂:n ja VR₁:n säädöillä saadaan rele kytkeytymään päälle tietyllä valon määrällä. Operaatiovahvistin voi ohjata relettä joko suoraan, tai jos siltä saatava virta ei riitä, transistorin kautta (kuvassa on muuten sama transistori, joka oli labratyössä 2).

Kuvan 88 kytkentää voidaan käyttää mittaamaan lämpötilaa vaihtamalla valokennon tilalle termistori. Termistori on siis vastus, jonka resistanssi riippuu lämpötilasta (NTC- ja PTC-vastukset).

Differentiaalivahvistimen heikkoutena on sen suhteellisen pieni tulonapojen resistanssi. Yksi tapa kasvattaa tuloimpedanssia on lisätä molempiin tuloihin jänniteseuraaja eli yksikköpuskuri. Sillähän oli suuri tuloimpedanssi, sen läpi ei kulje virtaa ja se säilyttää jännitteen ennallaan. Tästä päästäänkin sujuvasti seuraavaan aiheeseen, joka on...

6.3 Instrumentointivahvistin

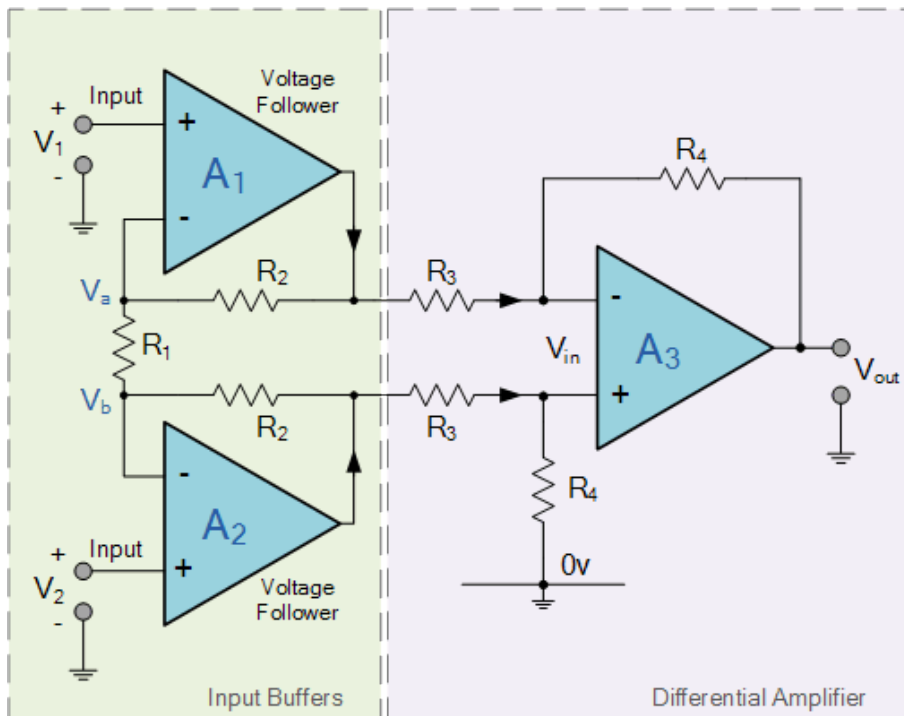
Instrumentointivahvistimen molempiin tuloihin on laitettu puskuripiiri, joka toimii kuten jänniteseuraaja. Instrumentointivahvistimilla saadaan hyvin suuri differentiaalinen vahvistus. Niitä käytetään havaitsemaan hyvin pieniä jännite-eroja.

- Erilaiset [biosignaali vahvistimet](#), kuten EEG-, EKG- ja EMG-vahvistimet.
- [Venymäliuskat](#) (*strain gauge*). Venymäliuskaassa siihen kohdistuvan voiman muutos aiheuttaa resistanssin muutoksen.
- [Termoparit](#) (lämpötila)
- Virran mittaus [moottoriohjauksessa](#)

¹ Hysteresis = Systeemin tila riippuu sen aikaisemmista tiloista

Elektroniikan perusteet Osa 5: Operaatiovahvistimen sovellutuksia

Instrumentointivahvistin on yleensä yksi komponentti, eli sitä ei rakenneta yksittäisistä operaatiovahvistimista vaan käytetään valmista lutikkaa. Siinä ei käytetä ulkoista takaisinkytkentää, vaan siinä on sisäinen takaisinkytkentävästus R_4 , joka on erotettu tuloista puskuriireillä.



Kuva 89. Instrumentointivahvistin koostuu puskuriireistä ja differentiaalivahvistimesta.

Koska tuloimpedanssi on hyvin suuri, ei yksikköpuskurivahvistimien tulonavoissa kulje virtaa, joten jännite V_a on sama kuin V_1 ja jännite V_b sama kuin V_2 . Edelleen, koska vahvistimet eivät ota virtaa, täytyy vastuksissa R_1 , R_2 ja R_3 kulkea sama virta (ovat sarjassa). Siten R_1 :n yläpään potentiaali on V_1 ja alapää on potentiaalissa V_2 . Vastuksessa R_1 syntyy jännitehäviö, joka on tulonapojen jännitteiden erotus. Lopputuloksena saadaan päätelmä, että puskuriiriltä saatava jännite V_{in} on tulojännitteiden erotus kerrottuna vahvistuskertoimella, joka määräytyy ainoastaan vastusten R_1 ja R_2 suhteesta.

Differentiaalivahvistimen vahvistus määräytyy kuten aikaisemminkin kääntävällä vahvistimella vastusten R_4 ja R_3 suhteesta.

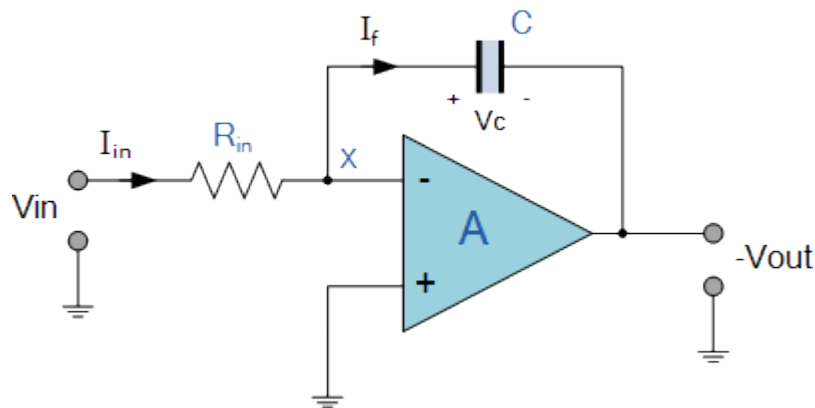
Lopullinen vahvistus on tulonapojen jännite-ero kerrottuna puskuriirin vahvistuksella kerrottuna differentiaaliasteen vahvistuksella:

$$V_{out} = (V_2 - V_1) \left[1 + \frac{2R_2}{R_1} \right] \frac{R_4}{R_3}$$

6.4 Integraattori ja derivaattori

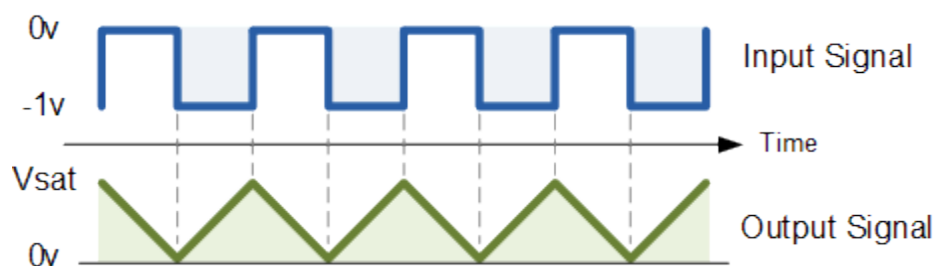
6.4.1 Integraattori

Integraattori on piiri, joka nimensä mukaisesti suorittaa numeerisen integroinnin. Toisin sanoen lähtöjännite on tulojännitteen integraali. Kytchentä muistuttaa kovasti alipäästösuodatinta, josta puuttuu takaisinkytkentävastus.



Kuva 90. Integraattorikytkentä

Lähtöjännite on suoraan verrannollinen aikaan, jonka tulojännite on "päällä". Jos tulonapaan syötetään kanttiaalto, kondensaattori latautuu ja purkautuu tulojännitteen "tahtiin". Lähtöjännite on sahalaita-aalto.



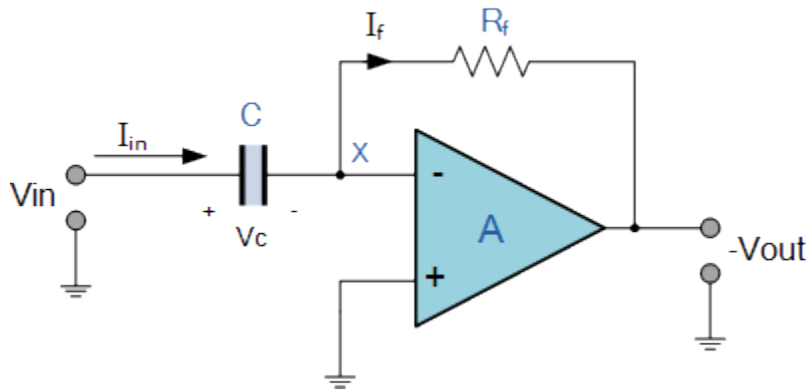
Kuva 91. Integraattorin tulo- ja lähtöjännitteet.

Lähtöjännite saadaan kaavasta

$$V_{\text{out}} = - \int_0^t V_{\text{in}} \frac{dt}{R_{\text{in}} C}$$

6.4.2. Derivaattori

Derivaattori laskee nimensä mukaisesti tulosignaalin derivaatan. Derivaattahan kuvaa signaalin muutosnopeutta.

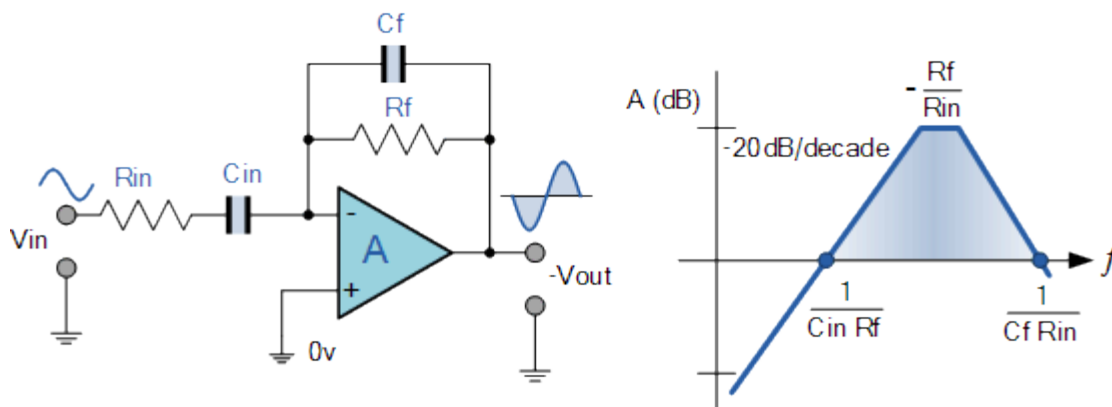


Kuva 92. Derivaattorikytkentä

Kondensaattori on nyt etuvastuksen paikalla. Kyseessä on siis ylipäästösuodatin. Kondensaattori blokkaa pienet taajuudet ja johtaa sitä paremmin mitä isompi taajuus on. Menemättä tässä matikkaan syvemmälle, riittänee tietää, että lähtöjännite saadaan kaavasta

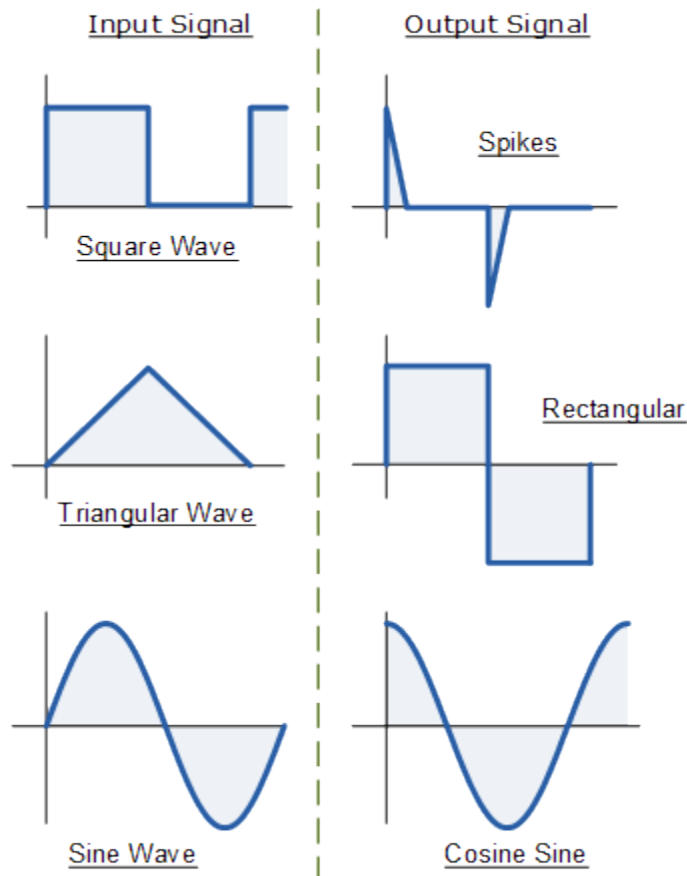
$$V_{out} = -R_f C \frac{dV_{in}}{dt}$$

Lähtöjännite on siis aikavakio $\tau = R_f C$ kerrottuna tulojännitteen muutosnopeudella. Tämä kytkentä on varsin herkkä kohinalle sun muille tulo häiriöille. Signaalia voidaan parantaa kytkemällä C:lle etuvastus. Kuvasta nähdään, että tähän on kaistanpäästösuodatin.



Kuva 93. Vastuksilla "paranneltu" derivaattori tuottaa tulokseksi kaistanpäästösuodattimen.

Elektroniikan perusteet Osa 5: Operaatiovahvistimen sovellutuksia



Kuva 94. Derivaattorin lähtösignaalit eri tulosignaaleille

6.5 Komparaattori

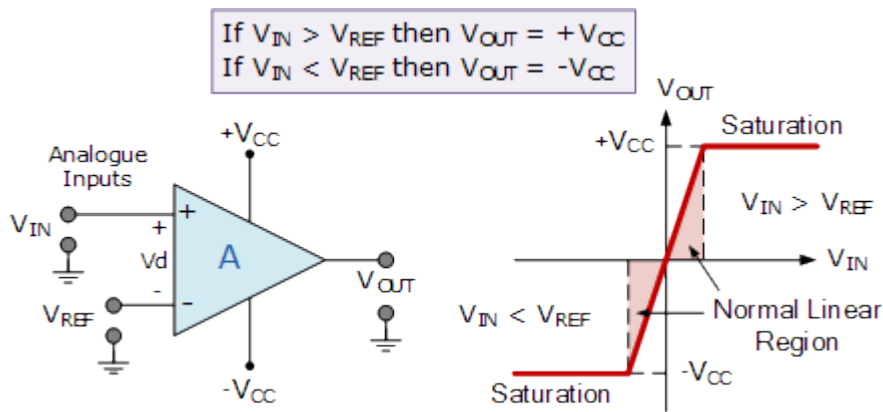
6.5.1 Perusteita

Analoginen operaatiovahvistimilla toteutettu komparaattori eli jännitevertaaja vertaa kahta jännitetasoa toisiinsa. Lähtöjännite riippuu vertailun tuloksesta ja on käytännössä jompikumpi käyttöjännitteistä (*rail-to-rail voltages*).

Tähän mennessä lähes aina kytkennässä on ollut negatiivinen takaisinkytkentä, eli osa lähtöjännitteestä palautetaan miinustuloon. Komparaattori käyttää joko positiivista takaisinkytkentää ("ohjataan autoa vielä enemmän ojaa kohti") tai avoimen piirin vahvistusta (ei takaisinkytkentää ollenkaan). Tästä aiheutuu, että tulojännite singahtelee positiivisen ja negatiivisen käyttöjännitteen väliä kyllästystilasta toiseen (*rail-to-rail swing*).

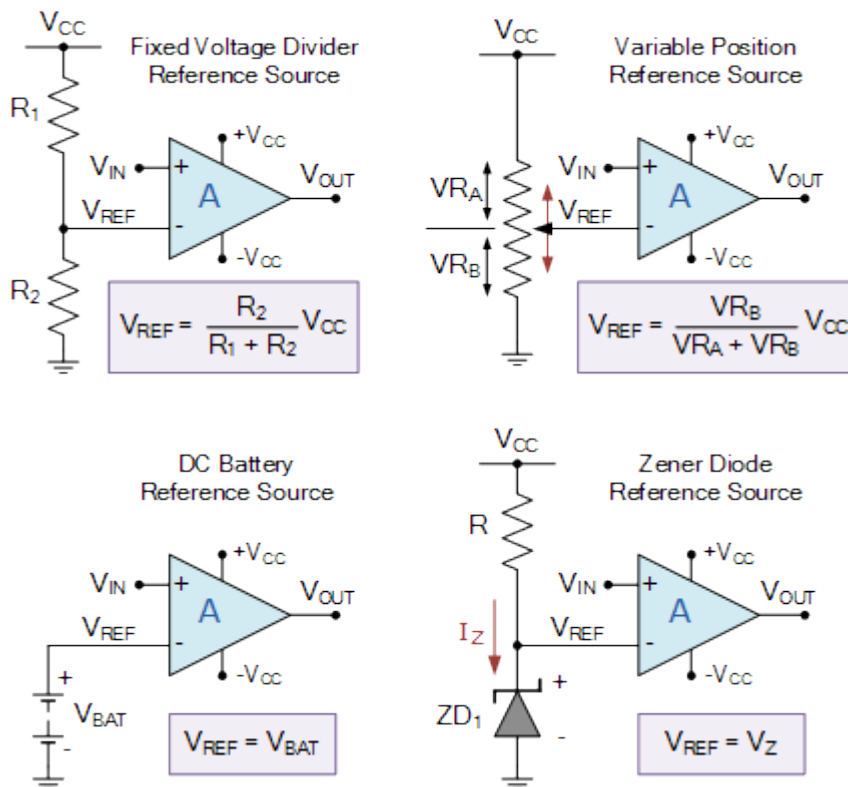
Komparaattori on 1-bittinen AD-muunnin. Tulojännite on analoginen, mutta lähdöllä on vain kaksi mahdollista (binääristä) tilaa.

Elektroniikan perusteet Osa 5: Operaatiovahvistimen sovellutuksia



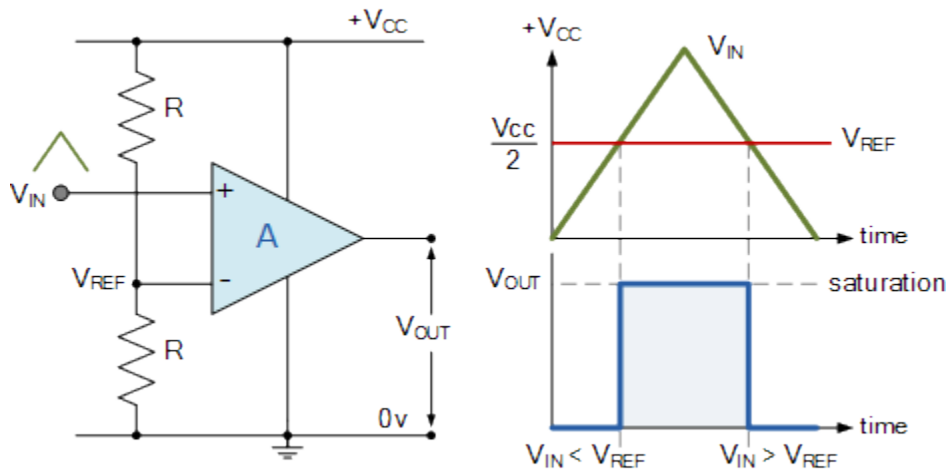
Kuva 95. Komparaattorin kytkentä sekä tulo- ja lähtöjännitteiden kuvaaja.

Käytännössä jännitteitä ei viedä suoraan tulonapoihin, vaan jännitteenjakajan, pariston, potentiometrin tai Zener-diodin kautta (Kuva 96.)



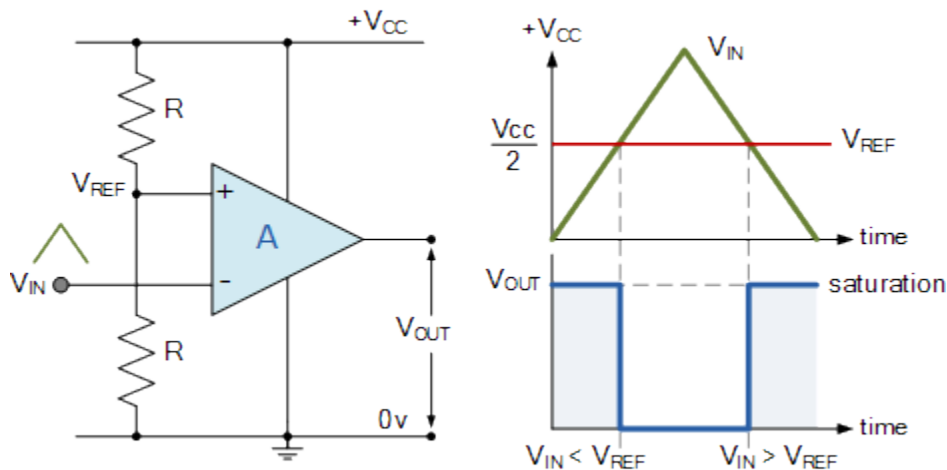
Kuva 96. Komparaattorin tulojännitteiden kytkeminen eri menetelmillä

Elektroniikan perusteet Osa 5: Operaatiovahvistimen sovellutuksia



Kuva 97. Positiivisen jännitteen komparaattorikytkentä sekä kolmioaaltomuodon tulo- että lähtöjännitteet.

Kuvan 97 kytkennässä lähtö V_{OUT} on positiivisessa kyllästystilassa, kun tulojännite V_{IN} ylittää referenssitason V_{REF} (tässä esimerkissä $+V_{CC}/2$).



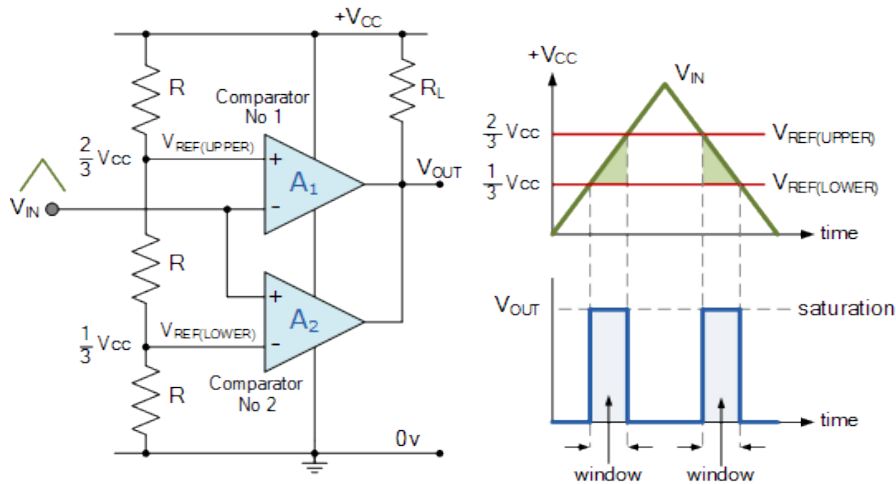
Kuva 98. Negatiivisen jännitteen komparaattorikytkentä sekä kolmioaaltomuodon tulo- että lähtöjännitteet.

Kuvassa 98 toiminta on päinvastainen verrattuna kuvaan 97. Tulosignaalien navat on vaihtuneet. Tässä on syytä huomata, että negatiivisen kyllästystilan jännite riippuu siitä, onko oppari varustettu yksipuoleisella käyttöjännitteellä, kuten tässä, vai kaksipuoleisella. Jälkimmäisessä tapauksessa negatiivinen kyllästystila on teoriassa korkeintaan $-V_{CC}$, käytännössä muutama voltti vähemmän.

6.5.2 Ikkunakomparaattori

Kuvan 99 kytkennässä, kun V_{IN} menee alle alemman referenssitason, komparaattori liipaisee itsensä alempaan kyllästystilaan. Vastaavasti kun V_{IN} nousee yli ylemmän referenssitason, liipaistaan ylempään kyllästystilaan.

Elektroniikan perusteet Osa 5: Operaatiovahvistimen sovellutuksia

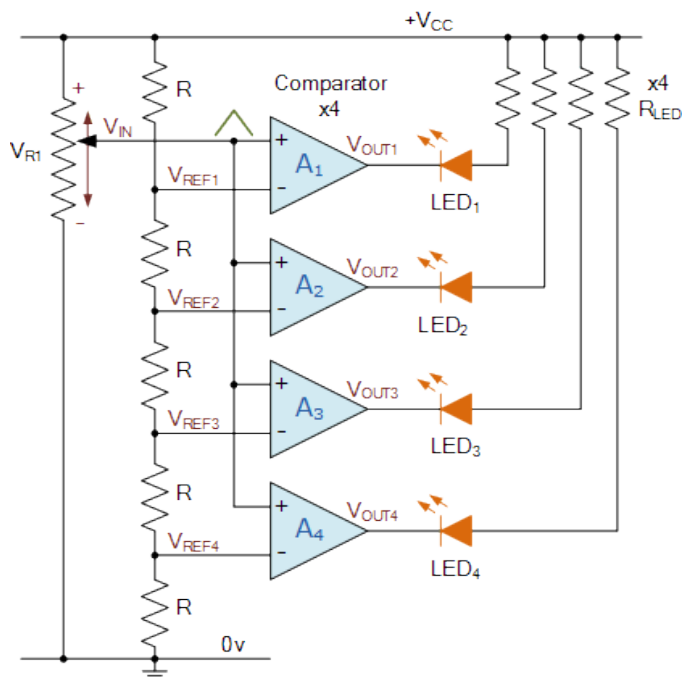


Kuva 99. Ikkunakomparaattori-kytkentä sekä kolmioaaltomuodon tulo- että lähtöjännitteet.

Käytettäessä kaksipuolista käyttöjännitettä, voidaan tätä kytkentää käyttää nollakohdan ilmaisimena (*zero crossing detector*), eli lähdön tila vaihtuu (LOW \rightarrow HIGH tai HIGH \rightarrow LOW) aina, kun tulosaalili vaihtaa merkkiään.

6.5.3 Komparaattorilla toteutettu jänniteilmaisim

Kaikki ovat varmaan nähneet akkulaturin, jossa on tosi viileet ledivalot ilmaisemassa varausastetta. Mitä useampi palaa, sitä korkeampi varaus. Monesti vielä matala varaus ilmaistaan punaisilla ledeillä ja korkea vihreillä. Tällainen jänniteilmaisim voidaan toteuttaa soveltamalla edellä esitettyä ikkunakomparaattoria (Kuva 100).

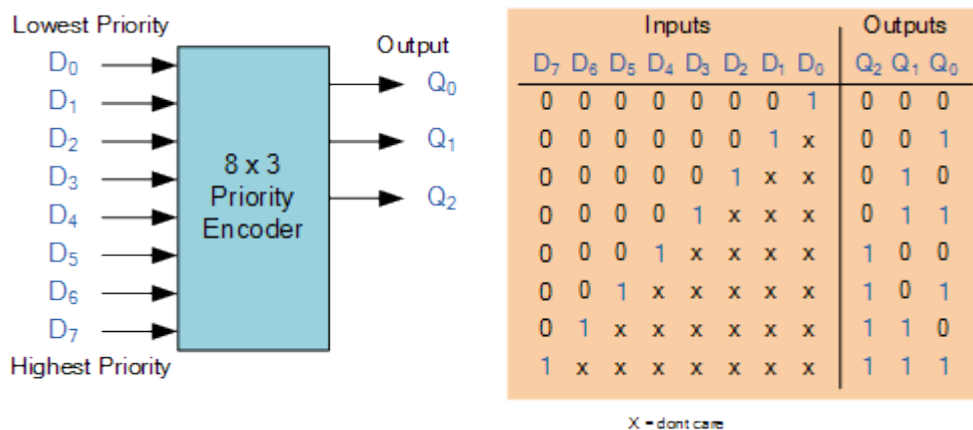


Kuva 100. Jänniteilmaisim

Elektroniikan perusteet Osa 5: Operaatiovahvistimen sovellutuksia

Jännitteenjakoketjulla asetetaan jännitteen referenssitaset, eli milloin mikäkin ledi syttyy. Vastusten välisten liitäntöjen yli vaikuttaa aina $1/5$ käyttöjännitteestä (tietenkin vastuksia voi olla enemmänkin). Siis kuvan 100 merkinnöillä $V_{ref4}=1/5V_{CC}$, $V_{ref3}=2/5V_{CC}$ jne jolloin ylimmän vastuksen yläpää on käyttöjännitteessä ja alimman vastuksen alapää maissa.

Edellä kuvattua menetelmää voidaan käyttää myös AD-muuntimena. Jos ketjutetaan 8 komparaattoria ja syötetään lähtösignaali [8x3 bittiselle binäärienkooderille](#), saadaan muunnin, joka muuntaa analogisen tulosignaalin 3-bittiseksi binääriluvuksi.



Kuva 101. 8x3 bittinen binäärienkooderi

6.6 Multivibraattorit

Operaatiovahvistimen avulla voidaan tehdä erilaisia värähtelypiirejä eli vibraattoreita. Multivibraattori voidaan toteuttaa myös transistoreilla, digitaalisilla logiikkapiireillä tai erillisillä dedikoiduilla piireillä (esim NE555). Tarkastellaan tässä kuitenkin operaatiovahvistimilla toteutettuja piirejä. Tässä esitellyn astabiilin multivibraattorin lisäksi on olemassa:

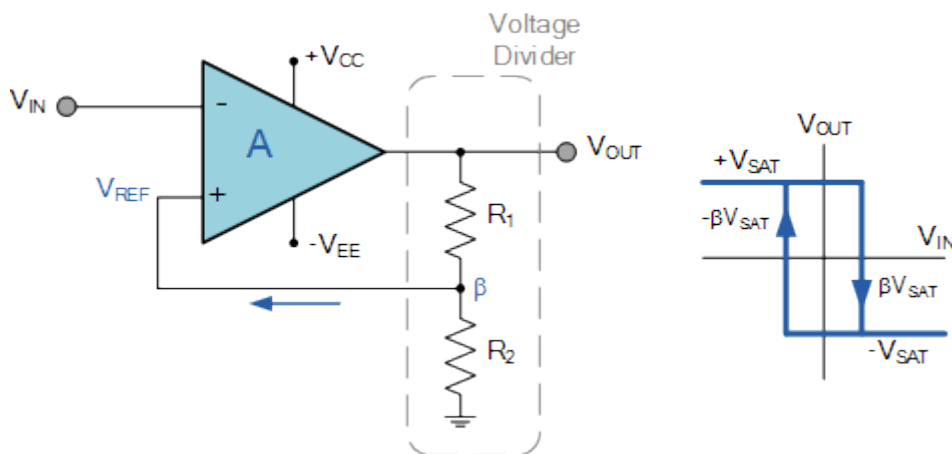
- Monostabiili multivibraattori, joka on toteutettu tyypillisesti N-kanava MOSFETilla. Piirillä on vain yksi stabiili tila, johon se liipaistaan ulkoisella jännitepulssilla.
- Bistabiili multivibraattori, jolla on kaksi stabiilia tilaa. Se perustuu transistorin (yleensä BJT) toimintaa kytkimenä (ON/OFF).

6.6.1 Astabiili multivibraattori

Yksi erittäin hyödyllinen värähtelijä on *astabiili multivibraattori*. Termi astabiili tarkoittaa, että piirin lähtösignaali ei ole stabiili, vaan heilahtelee ylä- ja alakyllästystilan välillä. Valitsemalla piiriin sopivan vastuksen ja kondensaattorin yhdistelmän, saadaan piiri tuottamaan *kanttiaaltoja*. Oppari toimii kytkennässä komparaattorina ja liipaisee lähdön jompaankumpaan kyllästystilaan. Tämä kytkentä alkaa käyttäytyä helposti holtittomasti referenssijännitteen läheisyydessä, ts. se ei tiedä kummassa tilassa sen pitäisi olla. Siksi astabiili multivibraattori toteutetaan Schmitt-liipaisin-piirinä (*Schmitt-Trigger Circuit*).

6.6.2 Schmitt-liipaisin-komparaattori

Kuvan 102 komparaattori on konfiguroitu Schmitt-liipaisimeksi, joka käyttää vastusten R_1 ja R_2 muodostamaa positiivista takaisinkytkentää hysteresisominaisuuden synnyttämiseen.



Kuva 102. Schmitt-liipaisin sekä tulo- ja lähtösignaalit

Kun piiri saturoituu positiiviseen kyllästystilaan, takaisinkytkentä palauttaa osan lähtöjännitteestä positiiviseen tulonapaan, joka kasvattaa referenssijännitteen arvoa, jolloin piiri liipaisee itsensä negatiiviseen kyllästystilaan. Takaisinkytkentä pienentää referenssijännitteen arvoa (lähemmäs nollaa) jolloin piiri liipaisee itsensä takaisin positiiviseen kyllästystilaan jne.

Se, kuinka suuri osa lähtöjännitteestä palautuu, määräytyy jännitejaosta vastuksissa. Takaisinkytkentäkerroin β määritellään kaavalla

$$\beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_{OUT} = V_{SATURATION}$$

$$V_{REF} = V_{OUT} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \beta V_{SAT}$$

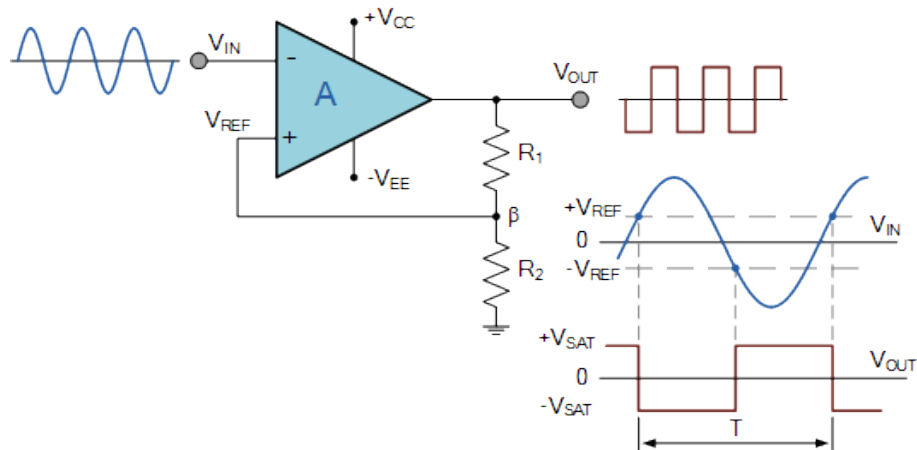
$$\text{Therefore: } \frac{+V_{REF}}{-V_{REF}} = \frac{+\beta V_{SAT}}{-\beta V_{SAT}}$$

Nähdään, että jos V_{in} ylittää positiivinen referenssijännitteen $+V_{REF}$, oppari vaihtaa tilaansa ja lähtöjännite V_{out} tipahtaa negatiiviseen kyllästysarvoon $-V_{SAT}$ ja päinvastoin. Hysteresisjännite määräytyy referenssijännitteistä:

$$V_{HYSTERESIS} = +V_{REF} - (-V_{REF})$$

Yksi Schmitt-liipaisimen sovellus on siniaallon muuttaminen kanttiaalloksi.

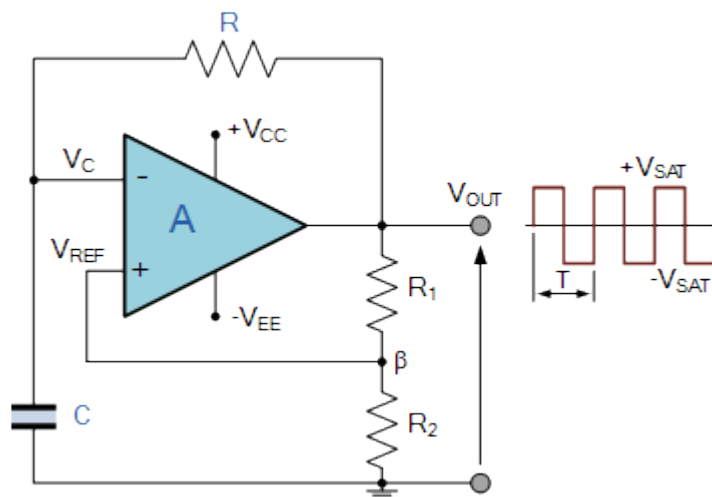
Elektroniikan perusteet Osa 5: Operaatiovahvistimen sovellutuksia



Kuva 103. Siniaallon muuttaminen kanttiaalloksi Schmitt-liipaisimella.

6.6.3. RC-multivibraattori

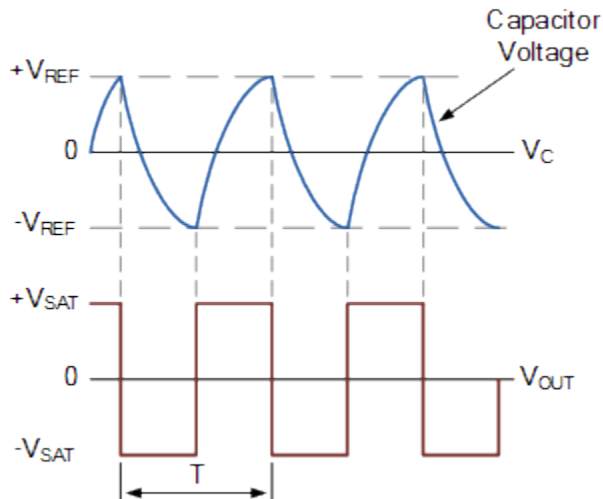
Korvataan tulojännite RC-piirillä kuvan 104 mukaisesti. Liipaisu tapahtuu nyt kondensaattorin latausjännitteen V_C tahdistamana.



Kuva 104. RC-piirillä ajastettu multivibraattori

Liipaisu positiiviseen tilaan saa kondensaattorin latautumaan aikavakiolla $\tau=RC$. Kondensaattori haluaisi latautua täyteen (joka kestää 5τ). Nyt kuitenkin, kun jännite ylittää referenssijännitteen, liipaisin heilauttaa lähtöjännitteen negatiiviseen kyllästystilaan, mikä pakottaa kondensaattorin purkautumaan (kuva 105). Vastaavasti, kun negatiivinen referenssijännite ylittyy, lähtö vaihtuu positiiviseen kyllästystilaan ja kondensaattori alkaa taas latautua jne.

Elektroniikan perusteet Osa 5: Operaatiovahvistimen sovellutuksia



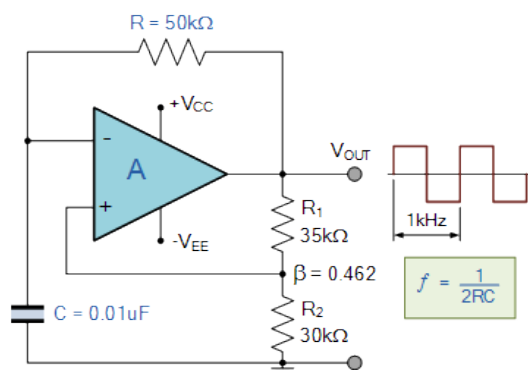
Kuva 105. Kondensaattorin jännite sekä lähtöjännite RC-multivibraattorissa.

Jos oletetaan, että positiivinen ja negatiivinen kyllästystila ovat yhtä pitkiä ajalliselta kestoltaan ja yhtä suurilla jännitteillä, saadaan jaksonaika ($T=1/f$) kaavasta

$$\beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$T = 2RC \ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right) \quad \therefore f = \frac{1}{T}$$

Esimerkki: RC-multivibraattori on rakennettu käyttäen seuraavia komponenttiarvoja: $R_1=35 \text{ k}\Omega$, $R_2=30 \text{ k}\Omega$, $R=50 \text{ k}\Omega$, $C=0.01 \mu\text{F}$. Laske piirin värähtelypiirin tuottaman lähtösignaalin taajuus.



$$\beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{30 \text{ k}\Omega}{35 \text{ k}\Omega + 30 \text{ k}\Omega} = 0.462$$

$$T = 2RC \ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right) = 2RC \ln\left(\frac{1+0.462}{1-0.462}\right)$$

$$T = 2 \times (50 \text{ k}\Omega \times 0.01 \mu\text{F}) \times \ln(2.717)$$

$$\therefore T = 0.001 \times 1 = 0.001 \text{ Sec or } 1 \text{ mS}$$

$$\therefore f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.001} = 1,000 \text{ Hz or } 1 \text{ kHz}$$