



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

Oskillaattorit ja multivibraattorit

ELEC-C3230 Elektronikka I (Ryynänen Kosunen)

Luennon pääkohdat

- **Oskillaattorilajit**
- **Takaisinkytkentämalli ja 1-porttimalli**
- **Oskillaatioehto (Barkhausenin kriteeri)**
- **Operaatiovahvistinpohjaisia oskillaattoreita**
 - Wienin-silta
 - Vaihesiirto-oskillaattori
 - Kvadratuuri-oskillaattori
 - Kaistanpäästö-oskillaattori
- **LC-oskillaattorit (Colpitts)**
 - Kideoskillaattori
- **Multivibraattorit**
 - Bistabiili, astabiili, monostabiili

Oskillaattorilajit

- Oskillaattorit voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään:

1. Lineaariset oskillaattorit

- Värähtelytaajuus analysoitavissa s-tasossa.
- Syntyvä signaali likimain sinimuotoista.
- Heikko epälineaarisuus tarvitaan oskillointiampplitudin rajoittamiseksi.

2. Epälineaariset oskillaattorit

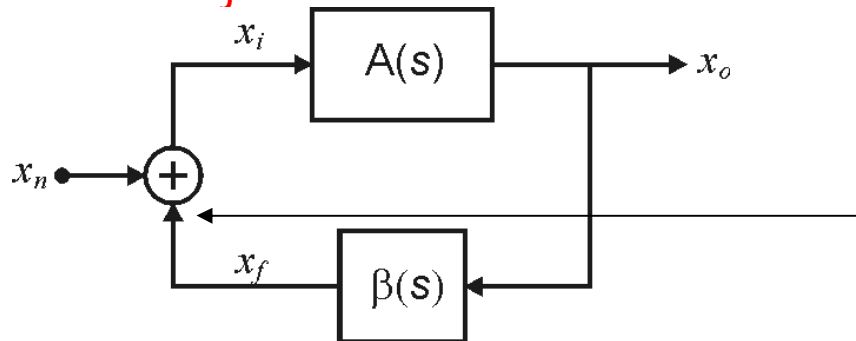
- Kutsutaan myös multivibraattoreiksi tai relaksaatio-oskillaattoreiksi.
- Toiminta perustuu hystereesiin.
- Voimakkaan epälineaarisuuden takia toiminta on tarkoituksenmukaista analysoida aikatasossa.
- s-tason analyysiä ei (periaatteessa) voi käyttää, jos piensignaaliapproksimaatio ei päde.
- Aaltomuoto tyypillisesti suorakaide- tai kolmioaaltoa.

Barkhausenin kriteeri

- Lineaariset oskillaattorit voidaan nähdä epästabiilina takaisinkytkettynä systeeminä.
- Barkhausenin kriteeri oskilloinnille:

$$L(j\omega_0) \equiv A(j\omega_0)\beta(j\omega_0) = 1$$

- Silmukavahvistuksen pitää oskillointitaajuudella olla 1.
- Silmukavahvistuksen vaihesiirron pitää oskillointitaajuudella olla 0.
- Ehtojen pitää täytyä vain yhdellä taajuudella, muutoin oskillointitaajuuksia voi olla monta.



Sedran konvention takia takaisinkytkentä on positiivinen.

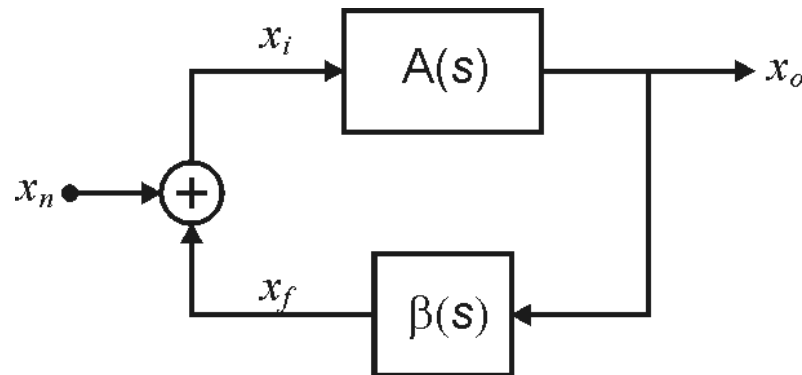
Oskillaattorin navat

- Koska piiri on nyt positiivisessa takaisinkytkennässä on suljetun silmukan vahvistus:

$$A_f = \frac{A}{1 - \beta A}$$

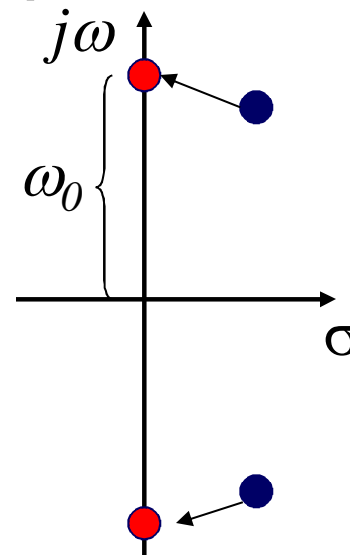
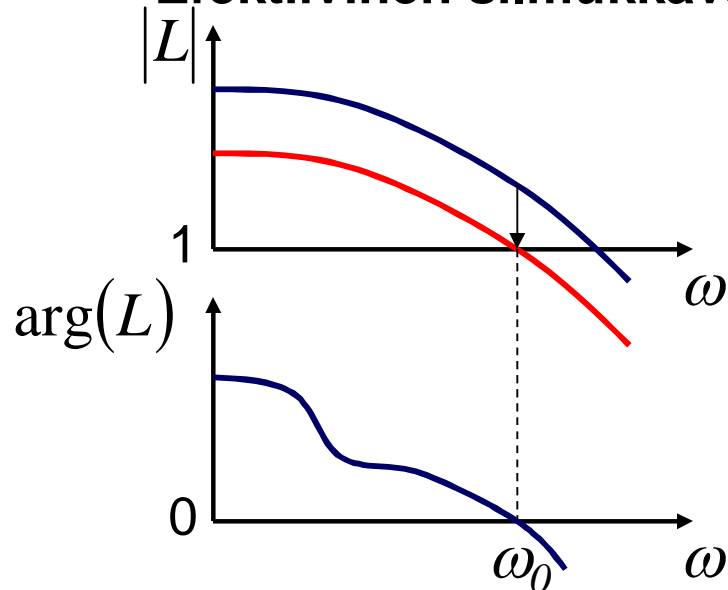
- **Systemin navat eivät riipu signaalista (tai siitä mistä se syötetään).**
- **Oskillaattorin navat saadaan yhtälöstä:**

$$D = 1 - \beta A = 0$$



Amplitudin stabiloituminen

- Barkhausenin kriteeriä ei tietenkään voi täsmälleen täyttää pelkästään tarkalla suunnittelulla.
 - Käytännössä silmukavahvistus suunnitellaan aina oskillointitaajuudella suuremmaksi kuin 1.
- Amplitudi kasvaa, kunnes piirin epälineaarisuus rajoittaa sitä.
- Efektiiivinen silmukavahvistus putoaa arvoon 1.



Suljetun silmukan navat ovat oikeassa puolitasossa.

Vahvistuksen pieneneminen vetää navat $j\omega$ -akselille.

Signaalin puhtaus

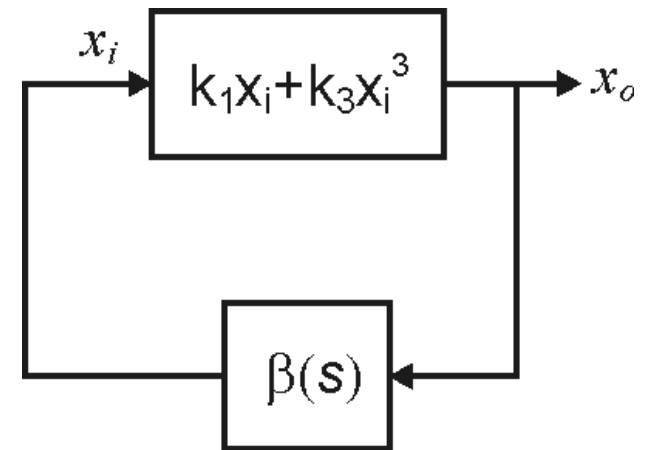
- **Vahvistus rajoittuu epälineaarisuuden takia, joten harmonisia taajuuksia on pakko syntyä.**
- **Oletetaan vahvistimelle kolmannen asteen epälineaarisuus**

$$v_o(t) = k_1 \hat{v}_i \sin(\omega_0 t) + k_3 [\hat{v}_i \sin(\omega_0 t)]^3$$
$$= \left(k_1 \hat{v}_i + \frac{3k_3}{4} \hat{v}_i^3 \right) \sin(\omega_0 t) - \frac{k_3}{4} \hat{v}_i^3 \sin(3\omega_0 t)$$

Epälineaarisuus pienentää vahvistusta perustaajuudella.

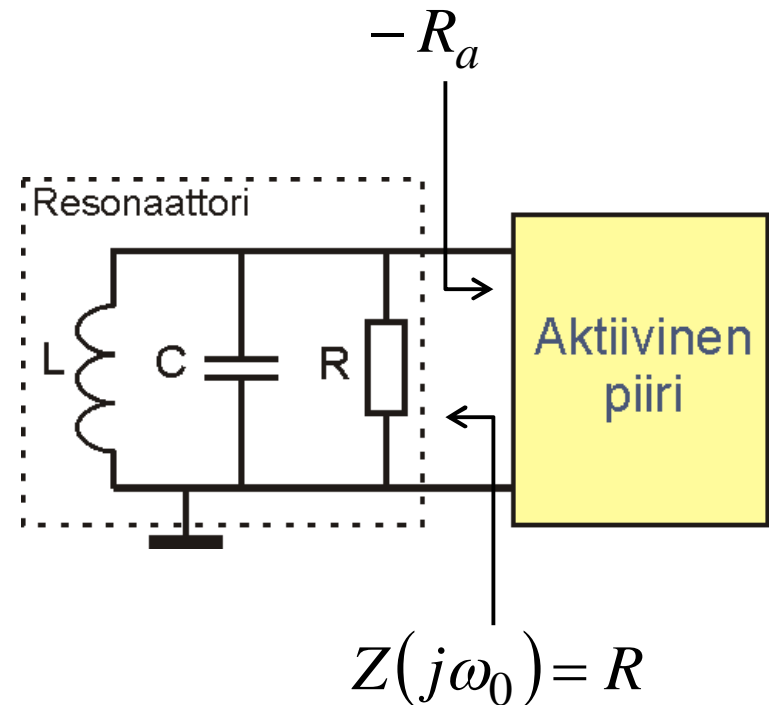
Mitä enemmän vahvistimen pitää kompressoitua täyttääkseen Barkhausenin kriteerin, sitä korkeampi on särö lähdössä.

Kompressoituvalla vahvistimelle k_3 ja k_1 ovat eri merkkisiä.



1-portti malli

- Passiivisen resonaattorin oskilloinnin amplitudi vaimenee ajan funktiona.
- Oskillointia voidaan pitää yllä kompensoimalla häviöt aktiivisella piirillä.
- Resonaattorin keskitäajuudella sen impedanssi on reaalinen.
- Aktiivisen piirin pitää keskitäajuudella näyttää matalammalta ja negatiiviselta resistanssilta.
 - Tasapainossa resistanssit ovat tietenkin yhtä suuret.



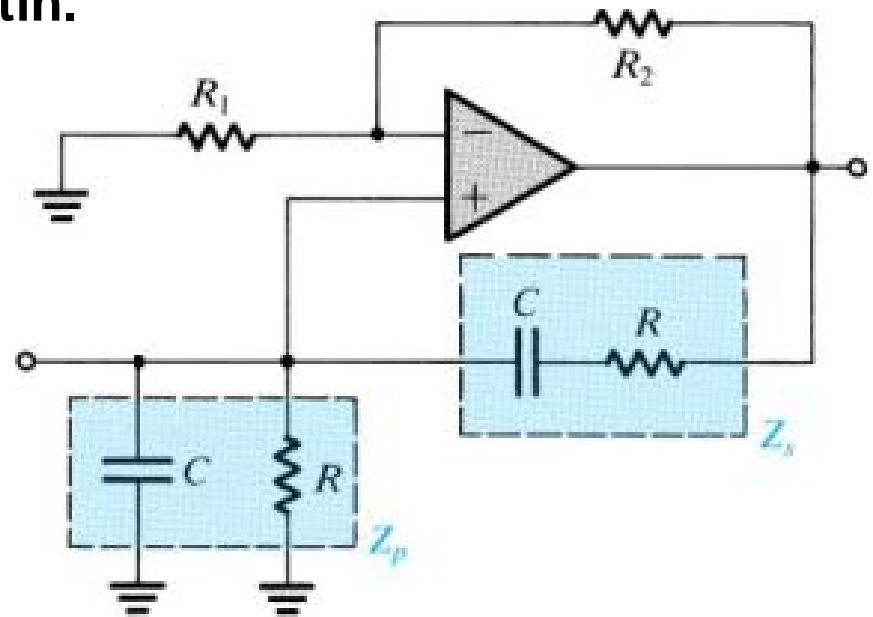
Wien-silta oskillaattori

- Operaatiovahvistin ei-invertoivassa kytkennässä.
- Voisi olla myös transistorivahvistin.
- RC-verkko takaisinkytkennässä.
- Lasketaan silmukavahvistus:

$$L(s) = K \frac{Z_p}{Z_p + Z_s} \quad K = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$Z_p = \frac{R}{1 + sRC} \quad Z_s = \frac{1 + sRC}{sC}$$

$$L(s) = K \frac{Z_p}{Z_p + Z_s} = K \frac{\frac{R}{1 + sRC}}{\frac{R}{1 + sRC} + \frac{1 + sRC}{sC}} = \frac{K}{3 + sRC + 1/sRC}$$



Wien-silta oskillaattori

- Oskillointitaajuudella silmukavahvistuksen pitää olla reaalinen (eli vaiheen nolla):

$$L(j\omega) = \frac{K}{3 + j(\omega RC - 1/\omega RC)}$$

$$\omega_0 RC - \frac{1}{\omega_0 RC} = 0 \quad \Rightarrow \quad \omega_0 = \frac{1}{RC}$$

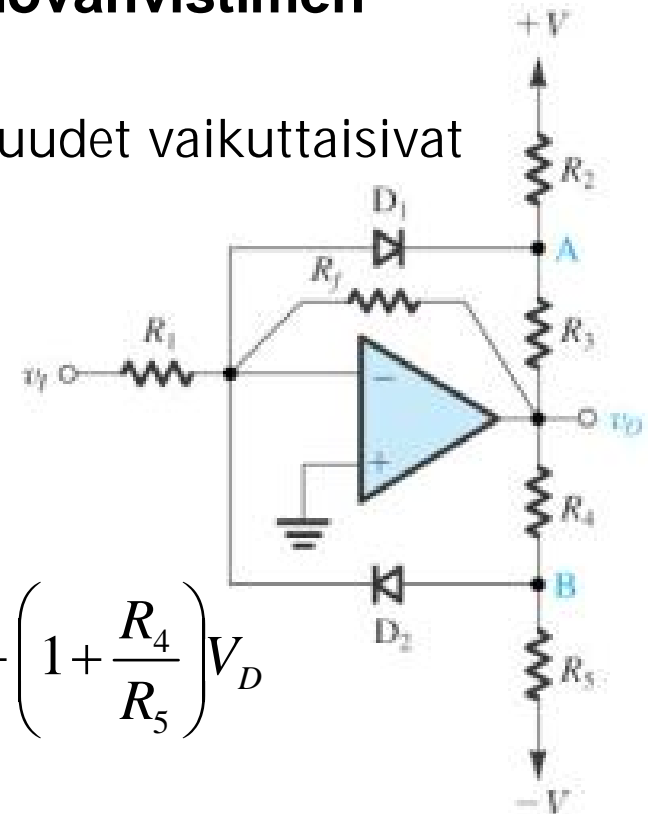
- Vahvistuksen pitää olla 1:

$$L(j\omega_0) = \frac{K}{3} = 1 \Rightarrow K = 3 \quad \Rightarrow \quad R_2/R_1 = 2$$

- Jotta oskilloinnin amplitudi varmasti ei vaimene, pitää K suunnitella hiukan isommaksi kuin 3.

Amplitudinrajoitin

- **Amplitudin voisi antaa rajoittua operaatiovahvistimen käyttöjännitteisiin.**
 - Operaatiovahvistimen suursignaaliominaisuudet vaikuttaisivat oskillointitaajuuteen.
- **Vahvistusta voi rajoittaa kytkemällä toisen vastuksen takaisinkytkentään, kun lähtösignaali on kyllin suuri.**



D_2 johtaa kun: $V_B > V_D$

$$\frac{R_4}{R_4 + R_5}(-V) + \frac{R_5}{R_4 + R_5}v_o > V_D \Rightarrow v_o > -\frac{R_4}{R_5}(-V) + \left(1 + \frac{R_4}{R_5}\right)V_D$$

v_o/v_i :n kulmakerroin kynnnyksen jälkeen: $\frac{dv_o}{dv_i} = -\frac{R_4 \parallel R_f}{R_1}$

Wien-silta oskillaattori amplitudin rajoituksella

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} = 6250 \text{ rad} / \text{s}$$

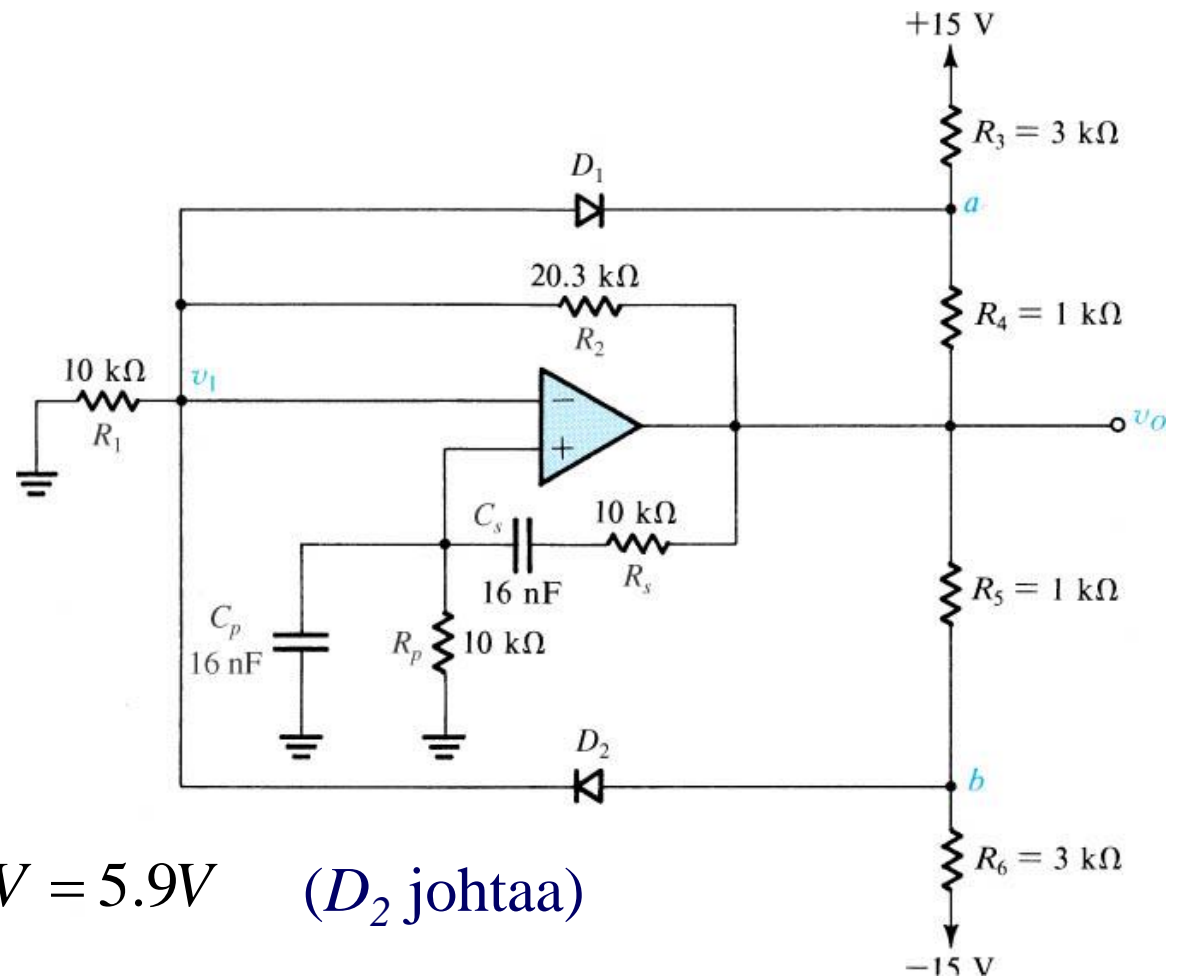
$$K = 1 + \frac{20.3}{10} = 3.03$$

$$K_L = 1 + \frac{20.3 \parallel 1}{10} \approx 1.1$$

Vahvistus putoaa melko voimakkaasti.

⇒ Paljon säröä, tarkka amplitudi.

$$V_L = \frac{R_5}{R_6} 15V + \left(1 + \frac{R_5}{R_6} \right) 0.7V = 5.9V \quad (D_2 \text{ johtaa})$$



Vaihesiirto-oskillaattori

- Vahvistin on inverttoiva.
- Takaisinkytkentäverkon pitää kääntää vaihetta yli 180° .
 - Tarvitaan vähintään kolme napaa.

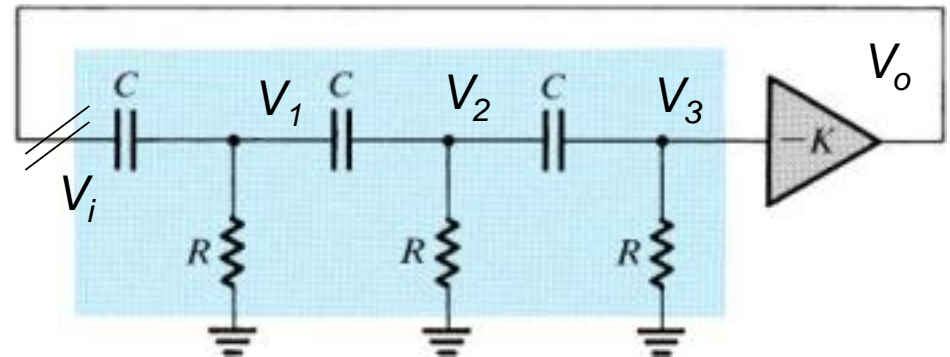
$$V_3 = \frac{R}{R + 1/sC} V_2$$

$$\left[\frac{1}{R} + s2C \right] V_2 - sCV_1 - sCV_3 = 0$$

$$\left[\frac{1}{R} + s2C \right] V_1 - sCV_i - sCV_2 = 0$$

Vaivalloisen laskun jälkeen saadaan:

$$\frac{V_o}{V_i} = - \frac{K(sRC)^3}{5(sRC)^3 + 8(sRC)^2 + 5sRC + 1}$$



Vaihesiirto-oskillaattori

- Jaetaan sRC:llä ja sijoitetaan $j\omega$:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K(\omega RC)^2}{-5(\omega RC)^2 + 5 + j\left(8\omega RC - \frac{1}{\omega RC}\right)}$$

- Oskillaatiotaajuus:

$$8\omega_0 RC - \frac{1}{\omega_0 RC} = 0 \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{2\sqrt{2}RC}$$

- Minimivahvistus:

$$\frac{V_o}{V_i}(j\omega_0) = \frac{1}{8} \frac{1}{5} \frac{K}{1 - 1/8} = 1 \Rightarrow K = 35$$

Vahvistusta täytyy olla melko paljon.

Vaihtoehtoinen topologia

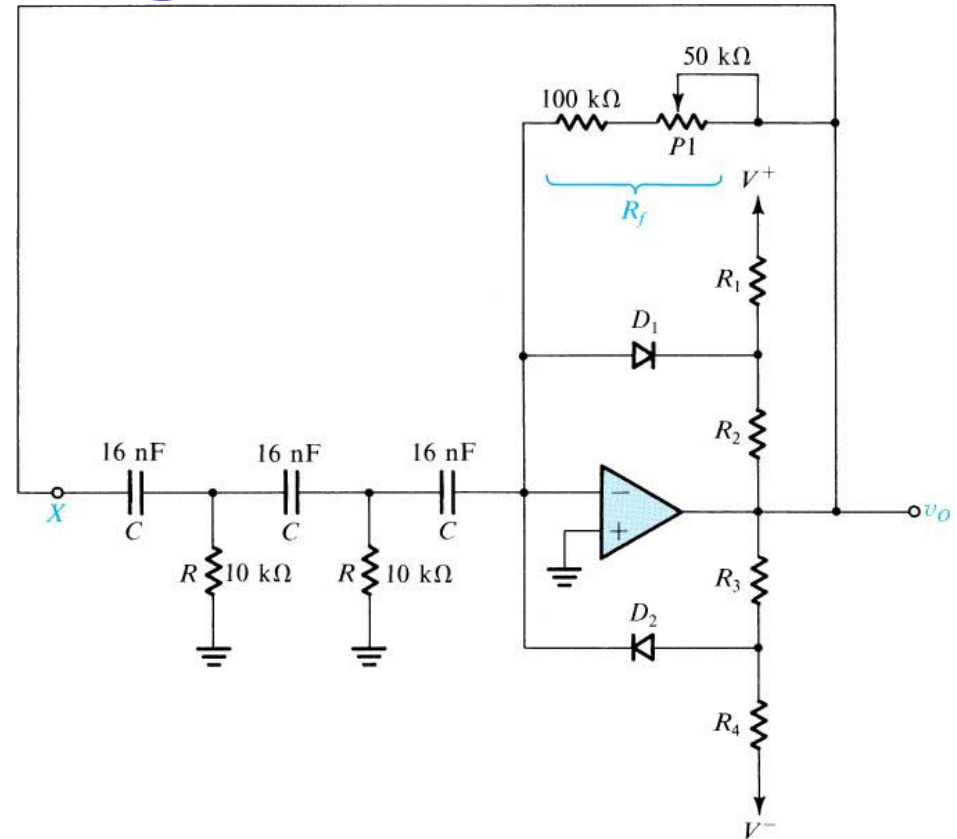
- Viimeinen aste aktiivinen derivaattori.

- Silmukkahavvistus:

$$L(j\omega) = \frac{\omega^2 C^2 R R_f}{4 + j \left(3\omega RC - \frac{1}{\omega RC} \right)}$$

Oskillaatiotaajuus: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{3RC}}$

Minimivahvistus: $R_f = 120k\Omega$



Piirissä ei ole enää jännitevahvistinta vaan transresistanssi, joten vertailu ei ole aivan aukoton.

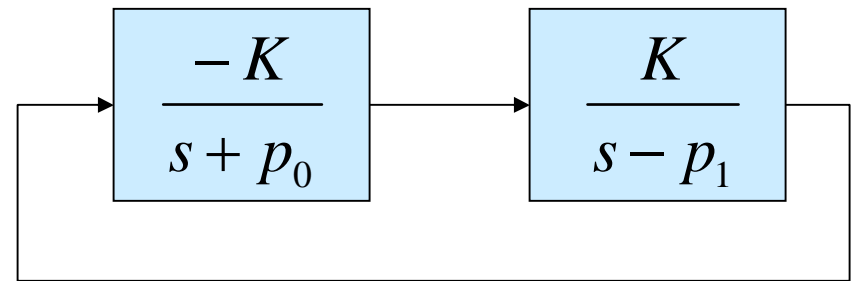
Kvadratuorioskillaattori

- **Kahden integraattorin silmukka.**
 - Kvadratuorioskillaattori-nimi ei liity toimintaperiaatteeseen vaan siihen, että piiri tuottaa kaksi 90° vaihesiirrossa olevaa signaalia.
- **Toisen integraattorin napa on siirretty oikeaan puolitasoon.**
 - Epästabiili.

Suljetun systeemin navat:

$$D(s) = (s + p_0)(s - p_1) + K^2$$

$$D(s) = s^2 + s(p_0 - p_1) + K^2 - p_0 p_1$$



Jos ensimmäisen asteen kerroin on negatiivinen, $Q < 0$ ja navat ovat oikeassa puolitasossa. Ehto:

$$\Rightarrow p_1 > p_0$$

Kaistanpäästöskillaattori

Toisen asteen kaistanpäästöfunktio:

$$H(j\omega) = \frac{jK\omega\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2 + j\omega\frac{\omega_0}{Q}} \quad H(j\omega_0) = KQ$$

$$H(s) = \frac{Ks\omega_0}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$$

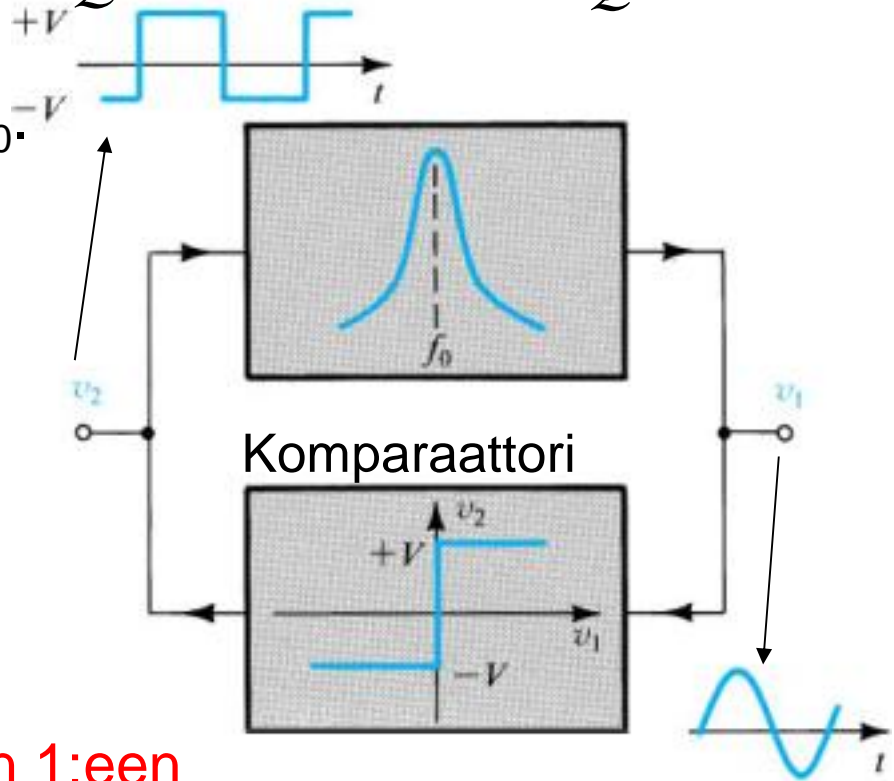
Reaalinen vain keskitäajuudella ω_0 .

→ Positiivinen takaisinkytkentä.

Tulossa: $v_{2,\omega_0} = \frac{4}{\pi} \hat{V}$

Lähdössä: $v_{1,\omega_0} = \frac{4}{\pi} KQ \hat{V}$

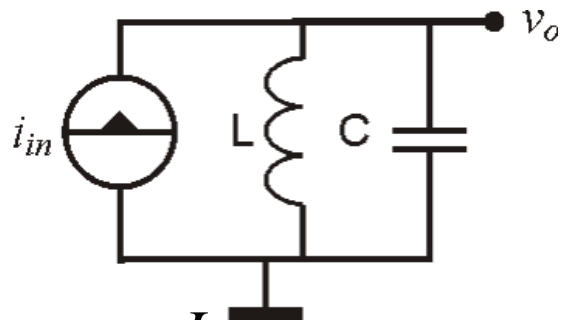
Komparaattorin "vahvistus": $\frac{1}{KQ}$



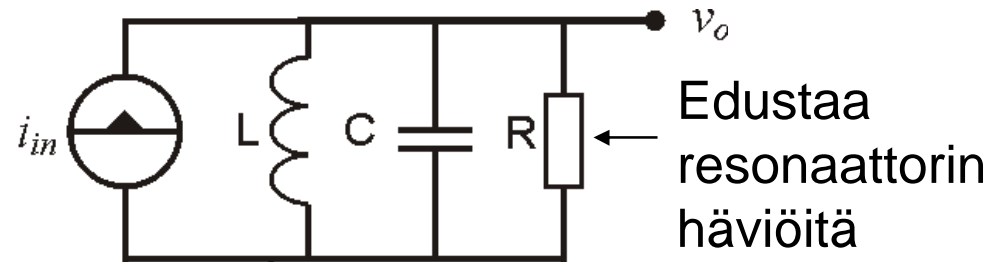
Silmukavahvistus säättyy itsestään 1:een

LC-oskillaattorit

- **LC-piiri on luonnostaan lähellä oskillaattoria.**
- **Aktiivikomponentti tarvitaan vain kompensoimaan häviöitä, ei synnyttämään napoja.**
- **Toiminta mahdollista korkeilla taajuuksilla.**
 - Taajuusalue 1MHz-10GHz...yläraja riippuu teknologiasta.
- **Signaalin puhtaus parempi kuin muilla toteutustavoilla.**



$$\frac{v_o}{i_{in}} = \frac{sL}{1 + s^2 LC} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$



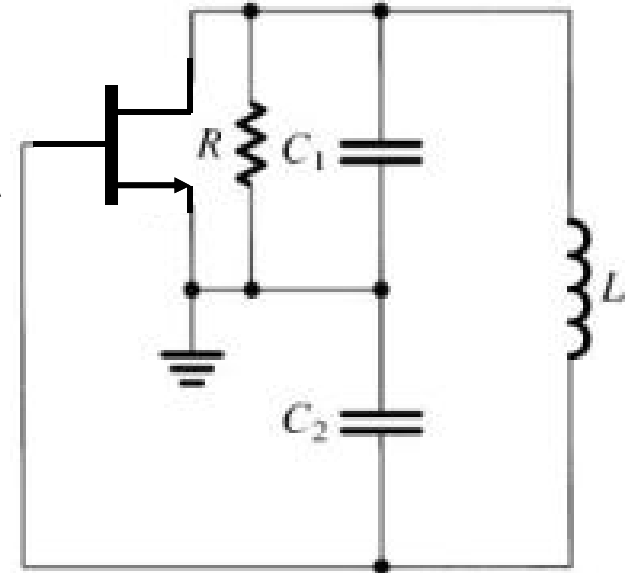
$$\frac{v_o}{i_{in}} = \frac{s/C}{s^2 + s \frac{1}{RC} + \frac{1}{LC}} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Colpitts

- Colpitts oskillaattorissa resonaattori on jaettu kahteen osaan, jotta MOS:n kannalle saadaan 180 vaihesiirto.
- Kasvu MOS:n DS-jännitteessä pienentää sen virtaa.
 - Negatiivinen resistanssi.
- R:ään on siirretty kaikkien komponenttien häviöt. (sitä ei siis ole piirissä).
- Negatiivisen resistanssin pitää olla matalampi kuin R.

C_1 ja C_2 sarjassa. Resonanssitaajuus:

$$\omega_0 = 1 / \sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}$$



Colpitts: Barkhausenin kriteeri

- Katkaistaan silmukka hilalta

$$\left(\frac{1}{R} + sC_1 + \frac{1}{sL} \right) v_c - \frac{v_o}{sL} = -g_m v_\pi$$

$$\left(sC_2 + \frac{1}{sL} \right) v_o - \frac{v_c}{sL} = 0$$

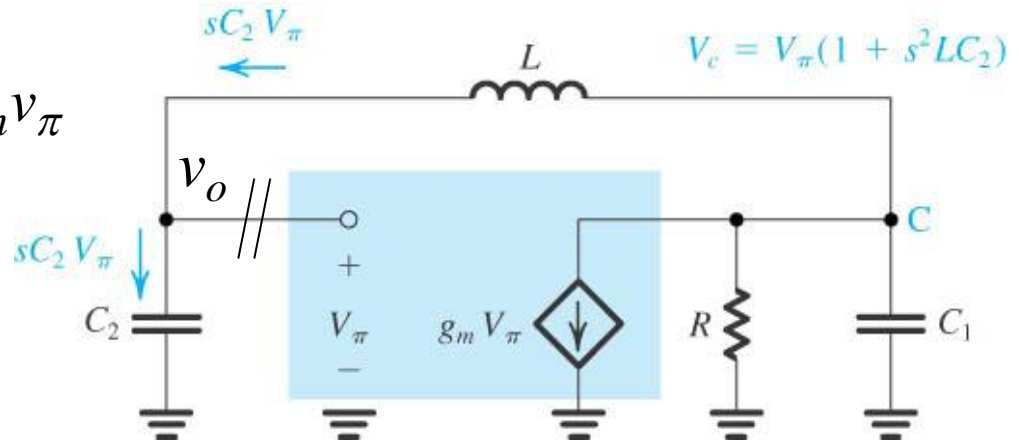
Vaivalloisen laskun jälkeen:

$$\frac{v_o}{v_\pi} = \frac{-sRLg_m}{\left(s^2 RLC_1 + sL + R \right) \left(1 + s^2 LC_2 \right) - R}$$

Sijoitetaan keskitaajuus:

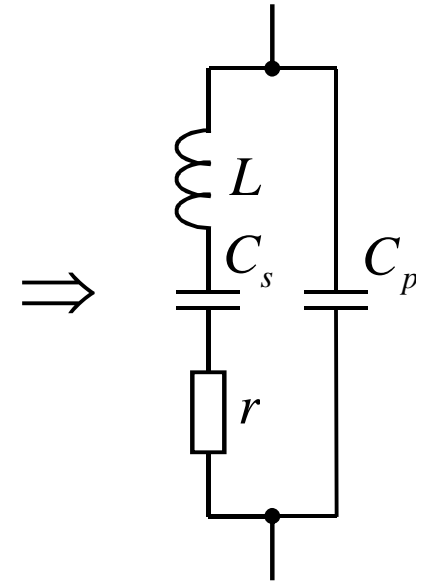
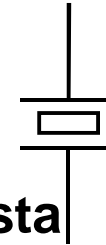
$$\frac{v_o}{v_\pi} = \frac{C_1}{C_2} g_m R = 1 \quad g_m = \frac{C_2}{C_1} \frac{1}{R}$$

Luonnollisesti g_m :n pitää olla suurempi, jotta oskillointi varmistuu



Kideoskillaattori

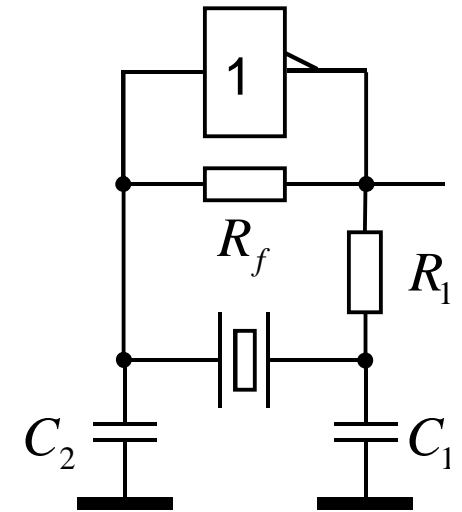
- Kvartsikide on pietsosähköinen mekaaninen resonaattori.
- Hyvin heikko lämpötilariippuvuus ja suuri Q .
- Sarjaresonanssitaajuus määräytyy dimensioista
 - Hyvä tarkkuus.
- Sarjaresonanssin yläpuolella voidaan virittää rinnakkaisresonanssiin.
- Kuvan Pierce-oskillaattorissa invertteri toimii aktiivisena komponenttina.
- R_1 ja C_1 estävät kidettä oskilloimasta korkeammalla harmonisella.



$$Q = \frac{\omega_0 L}{r} \propto 10^5$$

$$C_s \ll C_p$$

$$\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{LC_s}}$$



Bistabiili multivibraattori (Schmitt-trigger)

Tutkitaan piirin toimintaa olettamalla aluksi:

$$V_o = L \quad V_{in} = -L$$

$$\Rightarrow V_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} L \quad \pm L \text{ on lähdön alue}$$

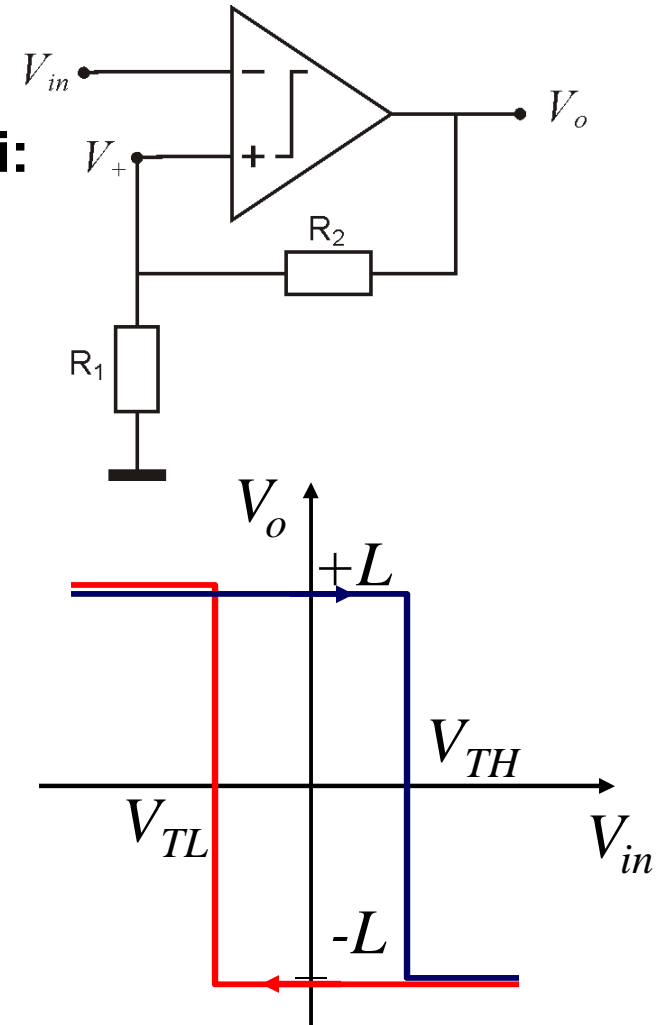
Piiri vaihtaa tilaa, kun $V_{in} > \frac{R_1}{R_1 + R_2} L$

Lähdetään päinvastaisesta tilasta:

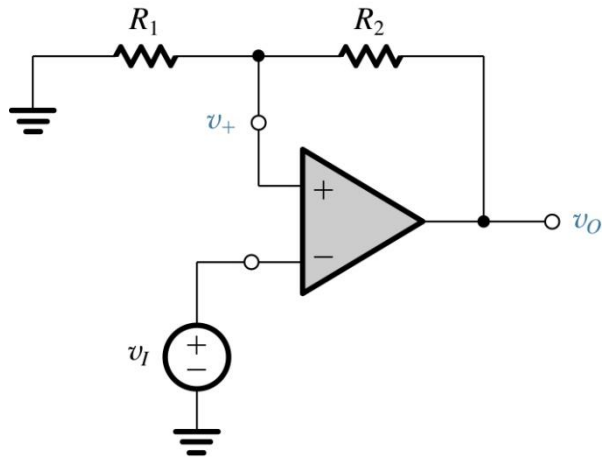
$$V_o = -L \quad V_{in} = L$$

Jos tulosignaali laskee tästä tilasta, lähtö

vaihtaa tilaa kun $V_{in} < -\frac{R_1}{R_1 + R_2} L$



Bistabiili multivibraattori

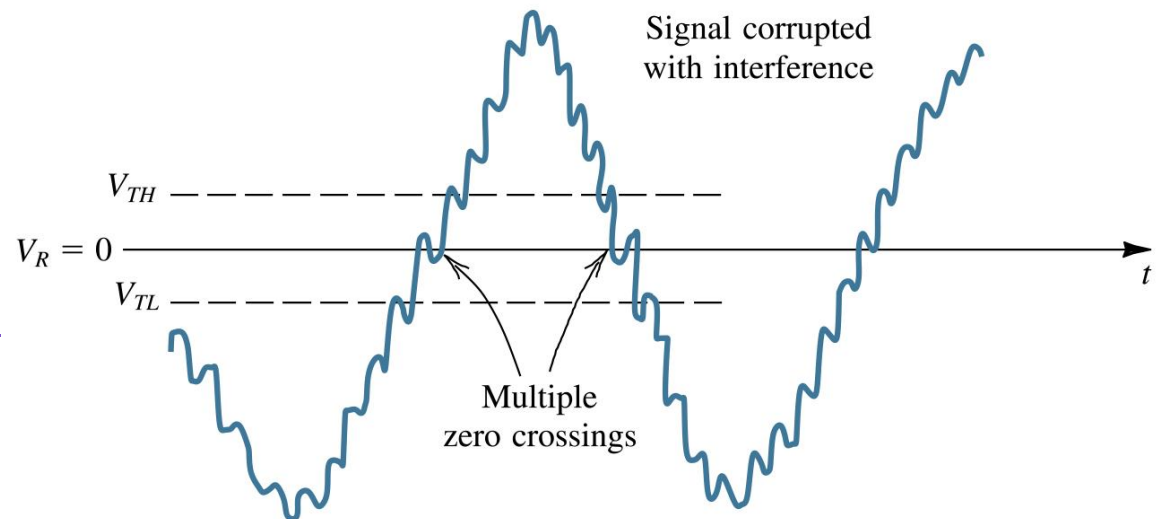
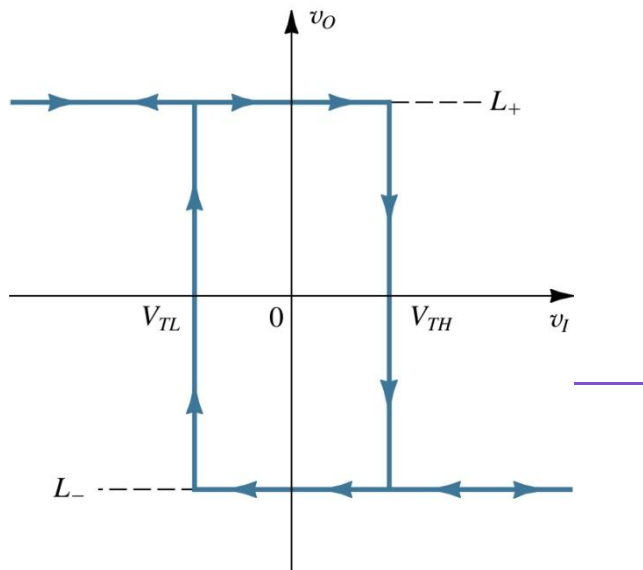


Lähdöllä kaksi stabiilia tilaa.

Positiivinen takaisinkytkentä aiheuttaa hystereesin.

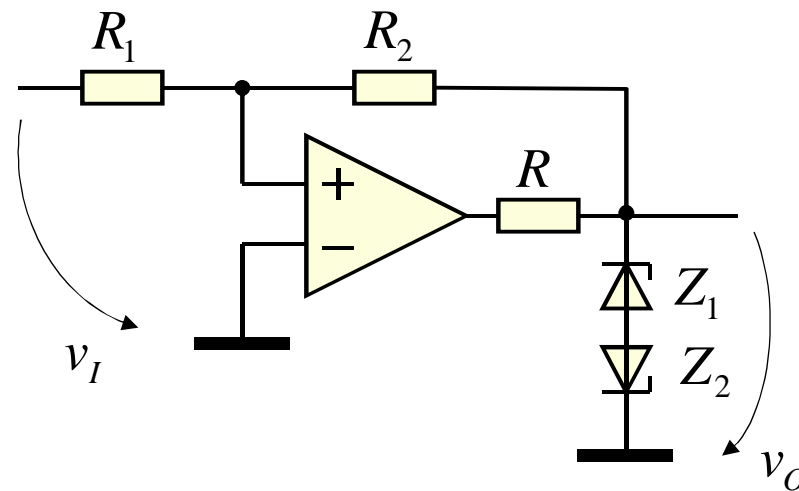
- Siirtofunktio riippuu lähdön tilasta.
- Piirissä on muistia.

Hystereesiä käytetään komparaattoreissa vähentämään herkkyyttä häiriöille.



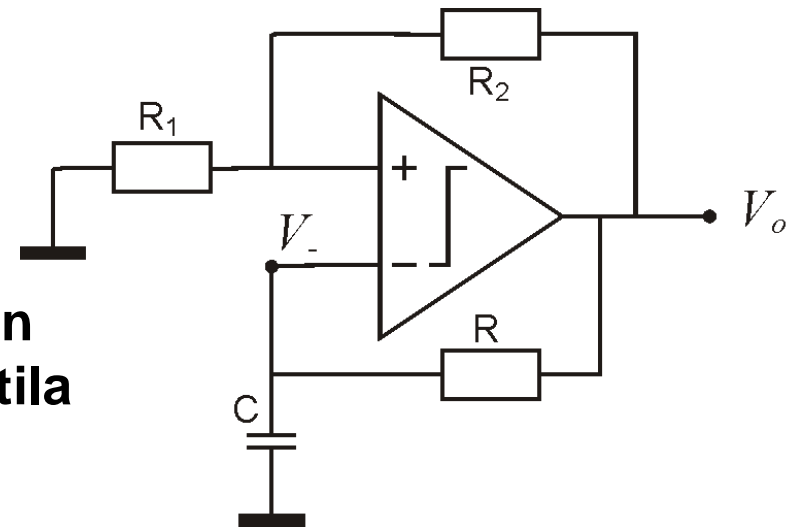
Lähdön tasojen kontrollointi

- Bistabiilin lähtötasot voidaan rajoittaa vastuksen ja kahden zener-diodin avulla helposti.
- Usein ei ole suotavaa, että lähtötasot ovat käyttöjännitteissä saakka.
- Lineaarisissa oskillaattoreissa käytetty diodi-rajoitin ei tähän sovellu, koska piirin lähtö hakeutuisi kuitenkin käyttöjännitteisiin.



Astabiili multivibraattori (relaksaatio-oskillaattori)

- Kytketään bistabiili multivibraattori negatiiviseen takaisinkytkentään.
- Piirillä ei ole yhtään stabiilia tilaa.
- Piiri pysyy yhdessä tilassa RC-lenkin määräämän viiveen, minkä jälkeen tila invertoituu.



Solmun V_+ jännite aikatasossa kun:

$$V_- = -V_T \quad V_o = -L \rightarrow +L$$

$$V_-(t) = L - (L + V_T)e^{-t/\tau}$$

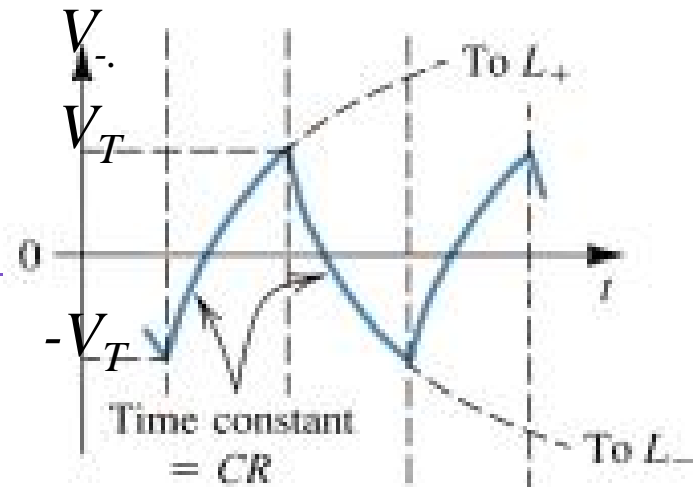
yleinen tapaus

$$y(t) = Y_\infty - (Y_\infty + Y_{0+})e^{-t/\tau}$$

Ylempi kynnyks saavutetaan kun

$$t = \tau \ln\left(\frac{L + V_T}{L - V_T}\right)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{f_{osc}} = 2RC \ln\left(\frac{L + V_T}{L - V_T}\right)$$



Monostabiili multivibraattori

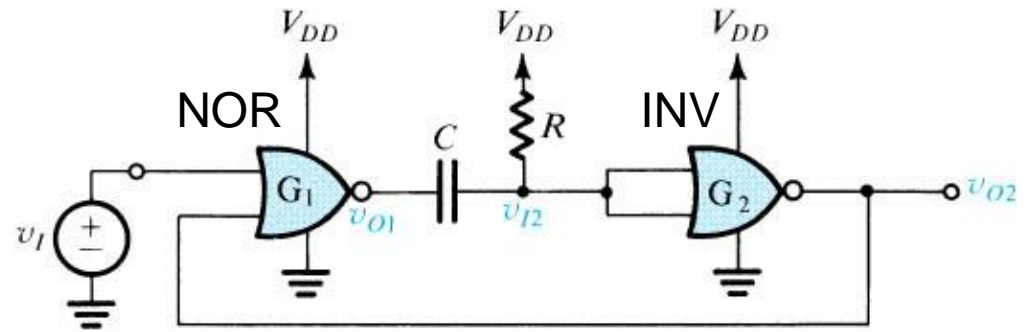
- Monostabiililla on vain yksi stabiili tila, johon se palaa automaattisesti vakioviiveen kuluttua.

$$V_{i2} = V_{DD} \quad V_{o2} = 0$$

$$V_{o1} = V_{DD} \quad V_i = 0 \rightarrow V_{DD}$$

Tästä seuraa:

$$V_{o1} \rightarrow 0, V_{o2} \rightarrow V_{DD}$$



R lataa C:tä kohti V_{DD} :tä. Kun $V_{i2} > V_T$ lähdön tila palaa ennalleen.

$$V_{i2}(t_w) = V_{DD} \left(1 - e^{-t_w/\tau}\right) = V_T = \frac{V_{DD}}{2}$$

Tässä on jätetty G_1 :n antoimpedanssi kokonaan huomiotta.

Lähtöpulssin pituus $t_w = RC \ln 2$

Tavoitteet

- **Tietää**

- Oskillaatioehto (Barkausenin kriteeri)
- Esitetyt operaatiovahvistinpohjaiset oskillaattoritopologiat
- Colpitts-oskillaattori
- Komparaattoripohjainen multivibraattori

- **Ymmärtää**

- Epälineaarisuuden amplitudia rajoittava vaikutus.
- Silmukkavahvistuksen ja syntyvän särön yhteys.
- Hystereesi bistabiilissa multivibraattorissa.

- **Soveltaa**

- Mitoittaa tunnettu oskillaattoritopologia halutulle taajuudelle ja oskillaatioehdon täyttäväksi.
 - Mitoittaa bistabiili, astabiili ja monostabiili multivibraattori.
 - Mitoittaa tunnettu diodeihin perustuva amplitudinrajoitin.
-