

# ISC0100 KÜBERELEKTROONIKA

---

Kevad 2025

Tagasiside ja operatsioonvõimendi

Martin Jaanus

NRG-308

[martin.jaanus@ttu.ee](mailto:martin.jaanus@ttu.ee)

56 91 31 93

Õppetöö : <http://isc.ttu.ee>

Õppematerjalid : <http://isc.ttu.ee/martin>

# Tagasiside

Tagasiside on süsteemi väljundi toime tema sisendile.

- **Negatiivsel** tagasisidel (vastuside) mõjub väljundi suurenemine sisendit vähendavalt.  
See võimaldab süsteemil tasakaalustuda. (aktsiisid, euribori reguleerimine)
- **Positiivse** tagasiside (päriside) korral mõjub väljundi suurenemine sisendit suurendavalt.  
(ebastabiilsus, generaatorid, lõhkeseadeldised, majanduskasv laenurahaga).

Vastusidestatud süsteemi korral

- **Mida mõõdame, seda saame** (Automaatikute vanasõna)
- Tahtsime parimat, aga välja kukkus nagu alati.



By Lee Jordan - Flickr, CC BY-SA 2.0,



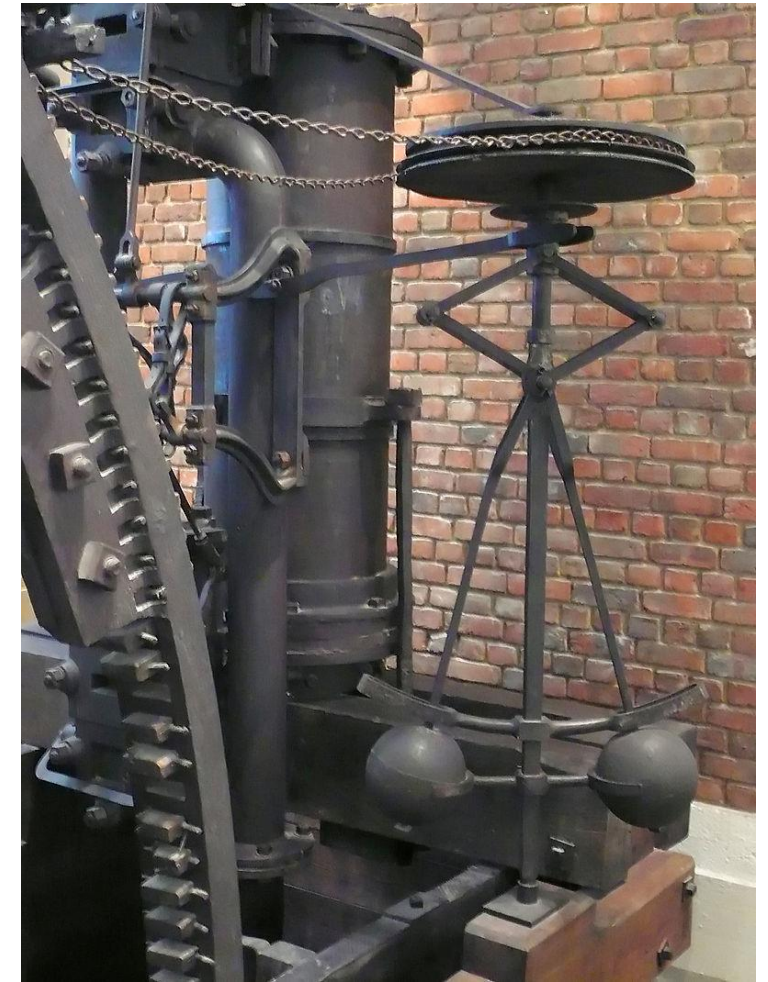
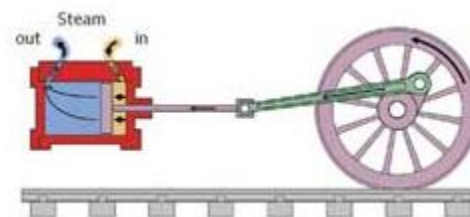
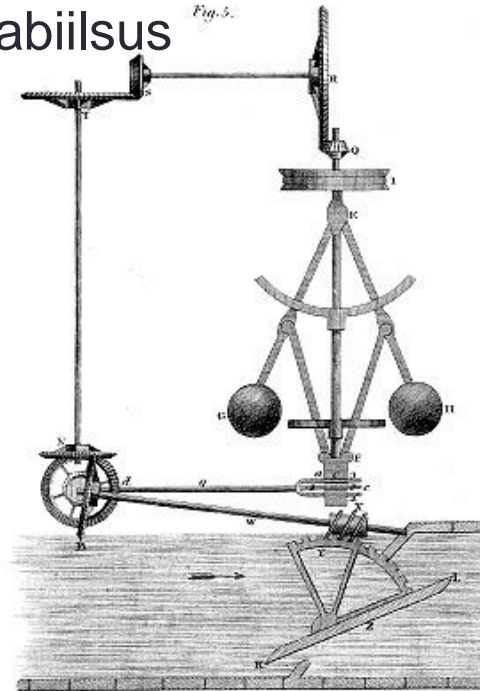
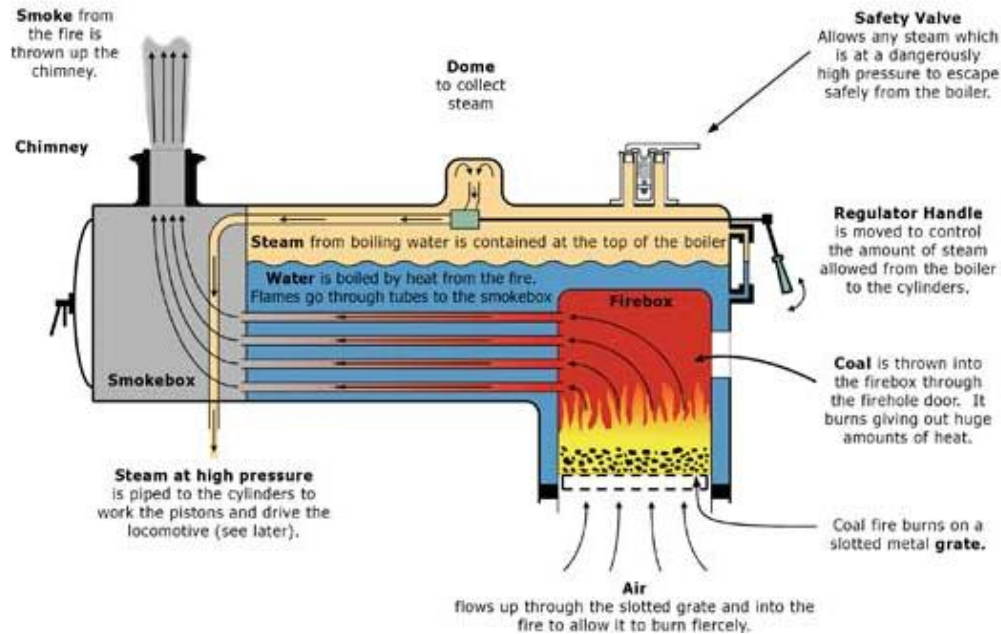
By Andy Docker from England - Stampede

# Mehaaniline tagasiside

## Näide – aurumasin, 1781

- Aurumasinat suur probleem – ebastabiilsus
- 1781 Mehaaniline tagasiside (kiiruse stabilisaator, James Watt, patent)

### The Boiler - How the Locomotive Makes Its Steam



Mehaaniline tagasiside  
pöörlemiskiiruse stabilisaator

Pildid: wikipedia ja

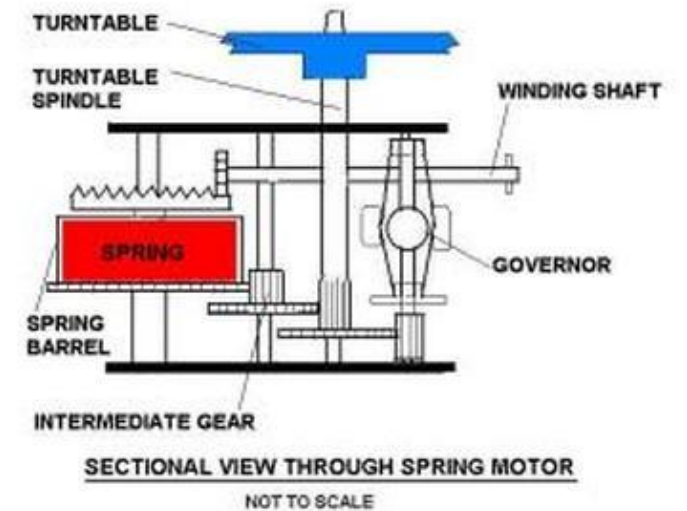
<https://petersrailway.com/how-it-works/>

# Näide - Vändaga grammofon

- 1905 (Charlesa Pathé – patefon)
- Plaadi pöörlemisageduse tsentrifugaalstabilisaator
- Mehaaniline vedruajam



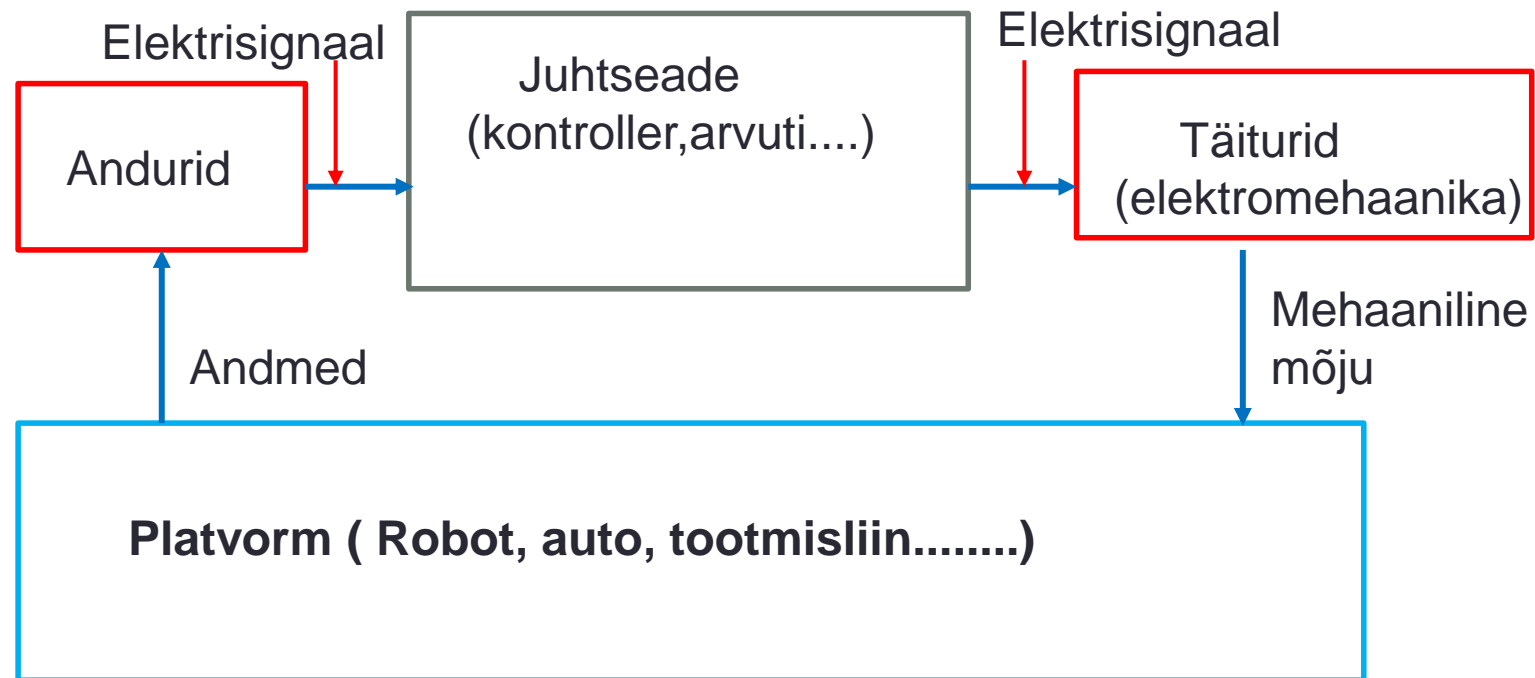
Pildid:wikipedia



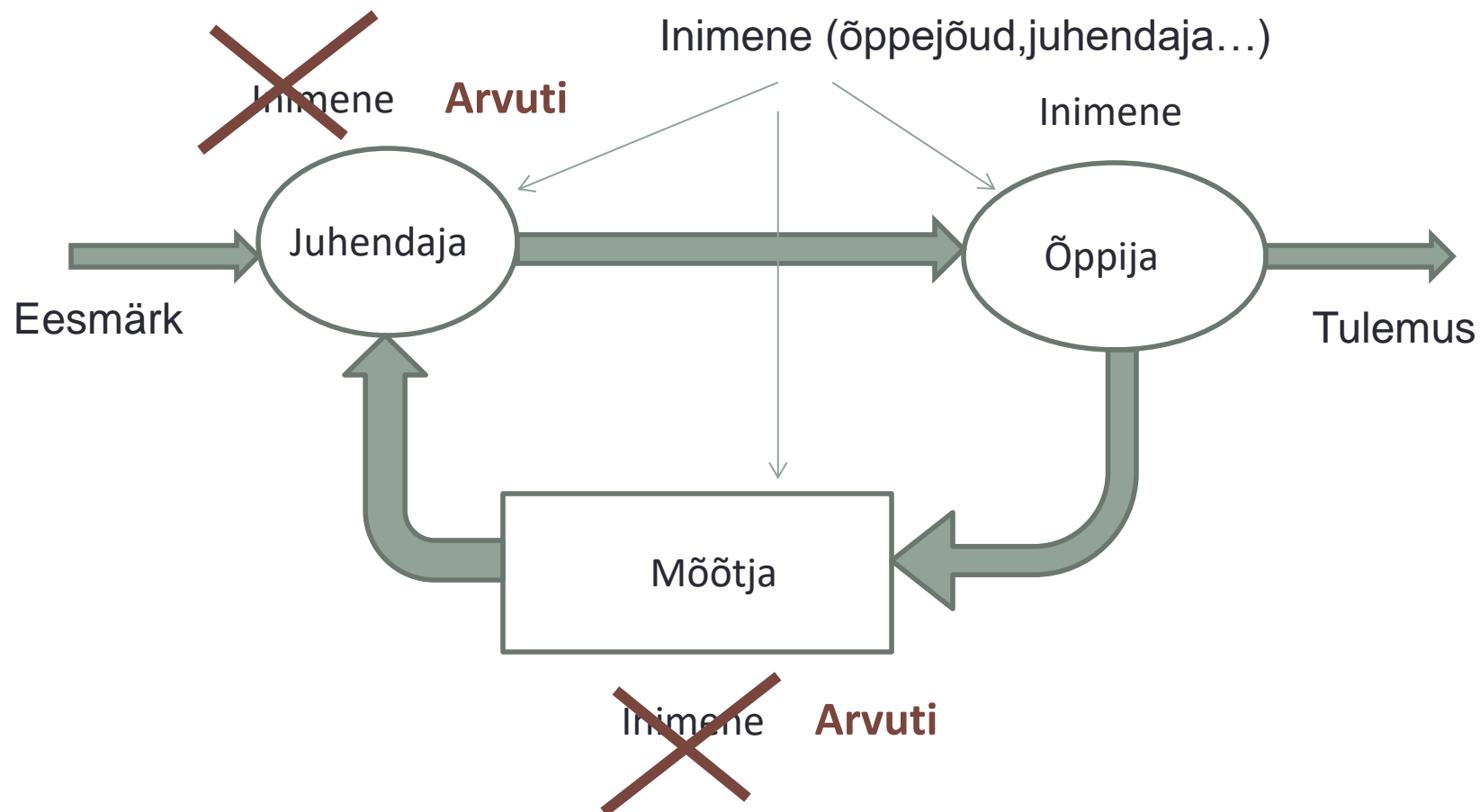
Pilardi mootor

# Näide tänapäeva tavalisest süsteemist

- See on tagasisidestatud süsteem !



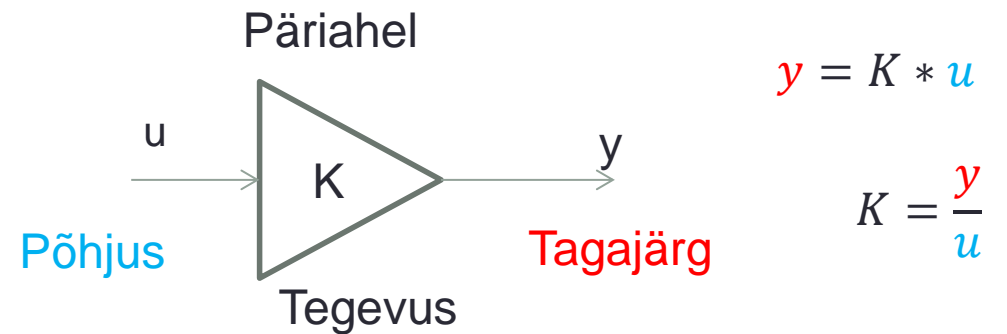
# Näide, kuidas tudengid õpivad



Mõõdetakse ära õppurite praktiliste ülesannete lahendamisoskused. Lõppkokkuvõttes tulemus peaks = eesmärk.

# Negatiivne tagasiside (vastuside)

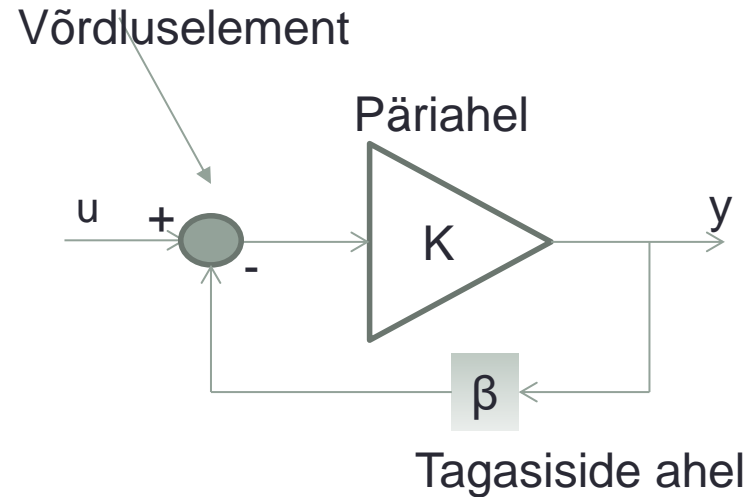
- $u$  – sisend ( **vaba** muutuja)
- $y$  – väljund ( **sõltuv** muutuja)
- (NB ! **Mittepööratavus** !)
- $K$  – päriahela **ülekanne**



- Ülekanne on defineeritud  $\frac{\text{Väljund}}{\text{Sisend}}$  ehk lihtsamal juhul on tegu korrutamisega, aga võib olla tegu ka muu funktsiooniga, mida saab matemaatiliselt kirjeldada.
- Matemaatiliselt on korrektne ka  $u = \frac{y}{K}$ , aga reaalses elus realiseerimine raske.
- Sisend ning väljund ei pruugi olla vaid elektrilised suurused vaid ka mehaanilised, majanduslikud, poliitilised (raha, tehase toodang, ülikooli lõpetajad.....)

# Negatiivne tagasiside (vastuside)

- $u$  – sisend ( **vaba** muutuja)
- $y$  – väljund ( **sõltuv** muutuja)  
(NB ! Mittepööratavus !)
- $K$  – päriahela **ülekanne**
- $\beta$  – tagasisideahela **ülekanne**

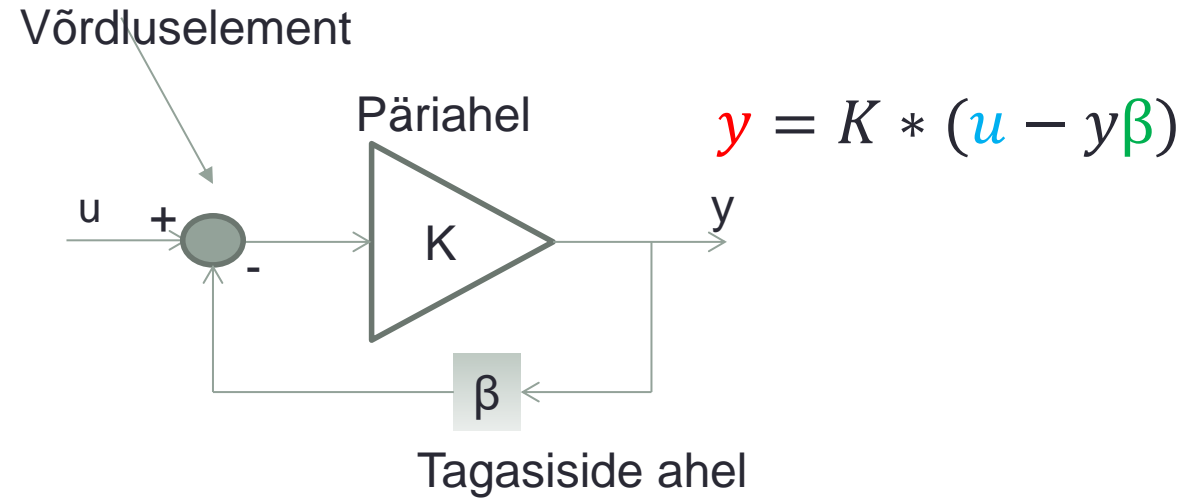


- Ülekanne on defineeritud  $\frac{\text{Väljund}}{\text{Sisend}}$  ehk lihtsamal juhul on tegu korrutamisega
- Sisend ning väljund ei pruugi olla vaid elektrilised suurused vaid ka mehaanilised, majanduslikud, poliitilised (raha, tehase toodang, ülikooli lõpetajad.....)
- Automaatjuhtimises  $y$  teisendatakse tagasi  $u$  –ga **võrreldavasse kujusse (sama dimension)** ja neid võrreldakse
- **Automaatjuhtimise alus (automaatregulaatori põhiskeem) !**



# Negatiivne tagasiside (vastuside)

- $u$  – sisend (vaba muutuja)
- $y$  – väljund (sõltuv muutuja)
- $K$  – päriahela ülekanne
- $\beta$  – tagasisideahela ülekanne
- $K\beta > 0$  !



- Väljundi ja sisendi vahel kehtib järgmine seos :
- $y = K * (u - y\beta)$  Päriahela sisendis toimub lahutamine !
- $y = Ku - Ky\beta \rightarrow y + Ky\beta = Ku \rightarrow y(1 + K\beta) = Ku \rightarrow$
- $\rightarrow y = u * \frac{K}{1+K\beta} \rightarrow \frac{y}{u} = \frac{K}{1+K\beta}$  ja kui  $K\beta \gg 1$  siis  $\frac{y}{u} = \frac{1}{\beta}$

- Olulisim efekt -  $y/u$  pole tundlik  $K$  suhtes kui see on piisavalt suur !

# Näide 1

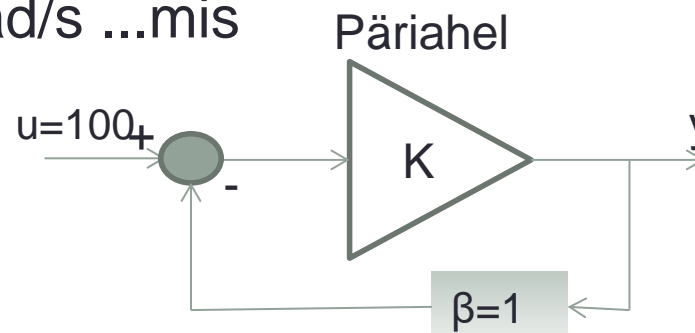
Olgu meil

- $u = 100$  ( mV, ainepunkt, majandusnäitaja, rad/s ...mis iganes)

- $\beta = 1$

$K$  – võimekus, võimendustegur:

- $K=10$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{10}{1+10*1} = 90.9..$
- $K=100$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{100}{1+100*1} = 99.0099..$
- $K=1000$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{1000}{1+1000*1} = 99.8999..$
- $K=10000$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{10000}{1+10000*1} = 99.99...$



Tagasiside ahel

$$y = u * \frac{K}{1+K\beta} \rightarrow \frac{y}{u} = \frac{K}{1+K\beta}$$

- Mida suurem on  $K$ , seda paremini toimib. Sestap üritatakse teha  $K$  võimalikult suur , samas ta võib ta muutuda väga suurtes piirides!

# Näide 2 – lisame juurde häire

Olgu meil

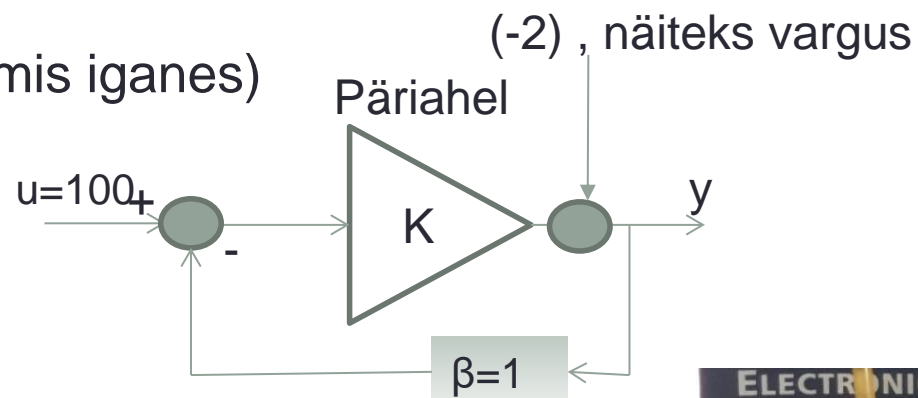
- $u = 100$  ( mV, ainepunkt, majandusnäitaja, rad/s ...mis iganes)
- $\beta = 1$

$K$  – võimekus, võimendustegur:

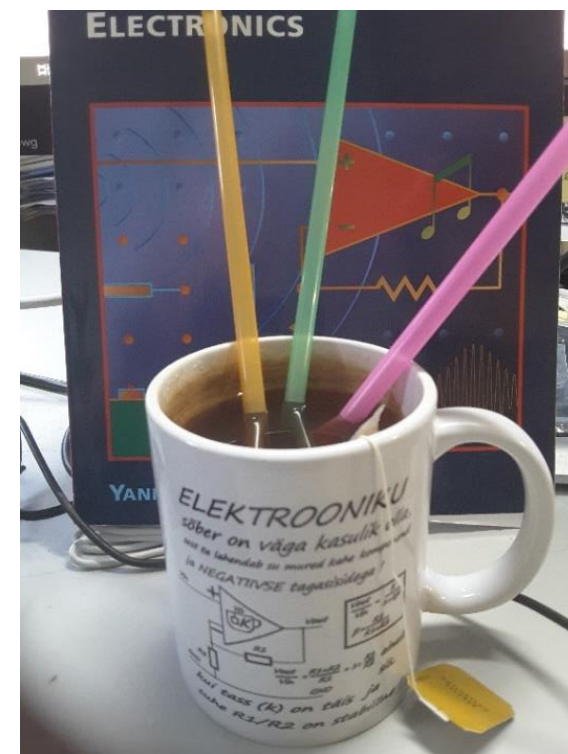
- $K=10$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{(10-2)}{1+(10-2)*1} = 88.8..$
- $K=100$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{(100-2)}{1+(100-2)*1} = 98.98..$
- $K=1000$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{(1000-2)}{1+(1000-2)*1} = 99.89..$
- $K=10000$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{(10000-2)}{1+(10000-2)*1} = 99.99...$

- Päriahela võimendus väheneb 2 võrra !
- Mida suurem on  $K$ , seda rohkem väljundi häireid maha surutakse.

$$y = u * \frac{K}{1+K\beta} \rightarrow \frac{y}{u} = \frac{K}{1+K\beta}$$



Tagasiside ahel



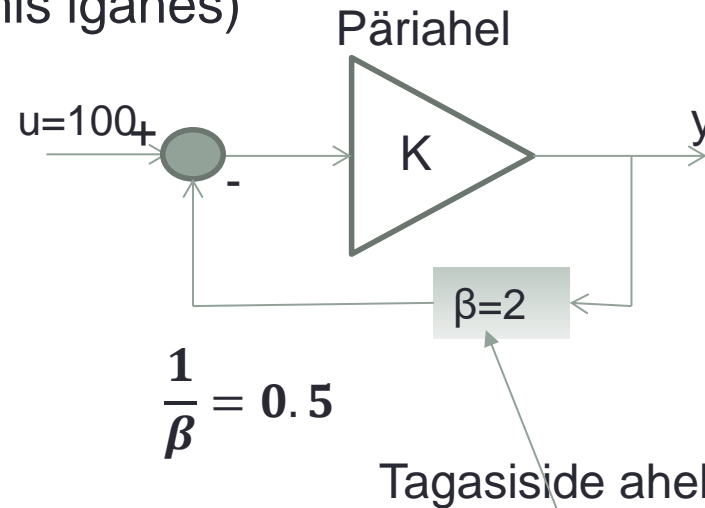
## Näide 3 – valetamine (juurdekirjutus, korda)

Olgu meil

- $u = 100$  ( mV, ainepunkt, majandusnäitaja, rad/s ...mis iganes)
- $\beta = 2$

$K$  – võimekus, võimendustegur:

- $K=10$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{10}{1+10*2} = 19.6..$
- $K=100$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{100}{1+100*2} = 49.7..$
- $K=1000$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{1000}{1+1000*2} = 49.97..$
- $K=10000$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{10000}{1+10000*2} = 49.99...$



\*2 tegin **2 korda** rohkem

$$y = u * \frac{K}{1+K\beta} \rightarrow \frac{y}{u} = \frac{K}{1+K\beta}$$

- Väljundi väärtus sõltub peamiselt  $\beta$  suurusest

- Järeldus : **tuleb valida selline  $\beta$ , et saaksime soovitud tulemuse** (soovitud tulemuse pöörduurus kui  $K$  on piisavalt suur)

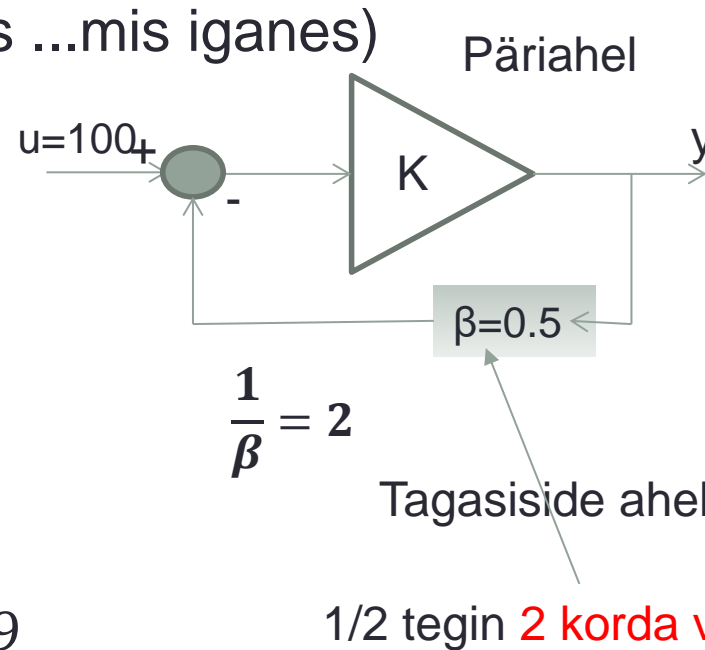
Spikerdamisel on siis mõte kui õpitakse emale, vanaemale, sponsorile.....

## Näide 3 – valetamine (juurdekirjutus, korda)

Olgu meil

- $u = 100$  ( mV, ainepunkt, majandusnäitaja, rad/s ...mis iganes)
- $\beta = 0.5$
- $K$  – võimekus, võimendustegur:

- $K=10$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{10}{1+10*0.5} = 166.666..$
- $K=100$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{100}{1+100*0.5} = 196.07$
- $K=1000$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{1000}{1+1000*0.5} = 199.6$
- $K=10000$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{10000}{1+10000*0.5} = 199.9$



$$y = u * \frac{K}{1+K\beta} \rightarrow \frac{y}{u} = \frac{K}{1+K\beta}$$

- See on tegelikult see, mida me automaatjuhtimisüsteemilt soovime saada, soovitud väljund !
- **$\beta$  võib olla suvaline tegevus .**  
Valetage, et õppisite 2 x vähem – tulemus:  
teid sunnitakse 2x rohkem õppima ehk saate 2x rohkem targemaks

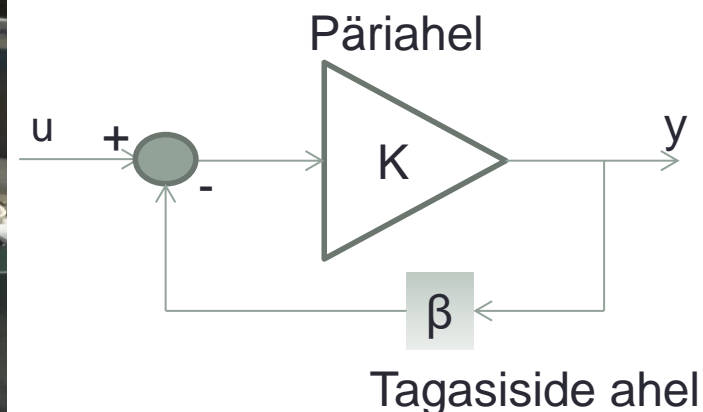
# Tagasiside, näiteid reaalelust

- Milline peab olema sisend  $u$ , et  $y$  oleks selline, nagu meil vaja ?  $u=y*\beta$
- Mis seadesuurus tuleb kontrolleriile anda, et robot liiguks ühtlase kiirusega 5 m/s ?
- Milline peab olema anduri väljundpinge ?

Aga ka:

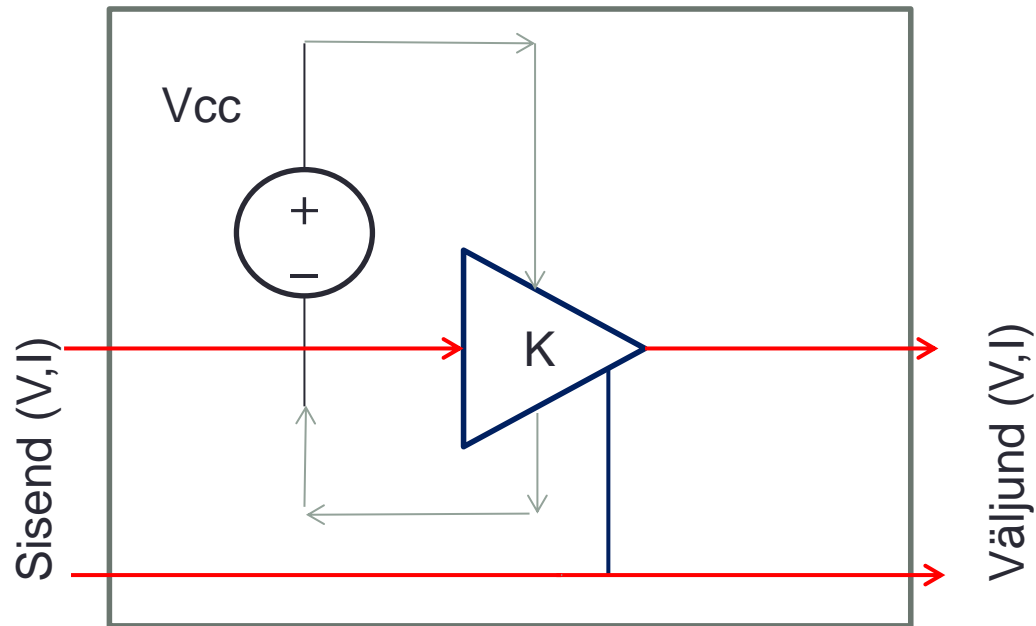
- Mitu last ma pean tegema, et saada toetust 500 eurot kuus ?
- Mitu punkti ma pean koguma, et saada hinne 5 ?
- Kui palju tuleks X aktsiisi kergitada, et teenida riigikassasse  $y$  miljonit eurot ?

Valetamine töötab vaid siis kui  
sihtmärk seda ei tea !



# Võimendi

- Võimendi on seadis, mis välist energiaallikat kasutades tõstab signaali võimsust.
- Saab käsitleda kui **mittepööratavat** kaksporti, vajab **aktiivkomponenti** .



- Pingevõimendi
- Vooluvõimendi
- V-I muundur (ülekanne - juhtivus)
- I-V muundur (ülekanne - takistus)

Ülekanne (võimendus)

$$K_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} , K_V(\text{dB}) = 20 * \log(K_V)$$

$$K_I = \frac{I_{out}}{I_{in}} , K_I(\text{dB}) = 20 * \log(K_I)$$

$$K_V \text{ ei pea } = K_I$$

Võimsusvõimendus

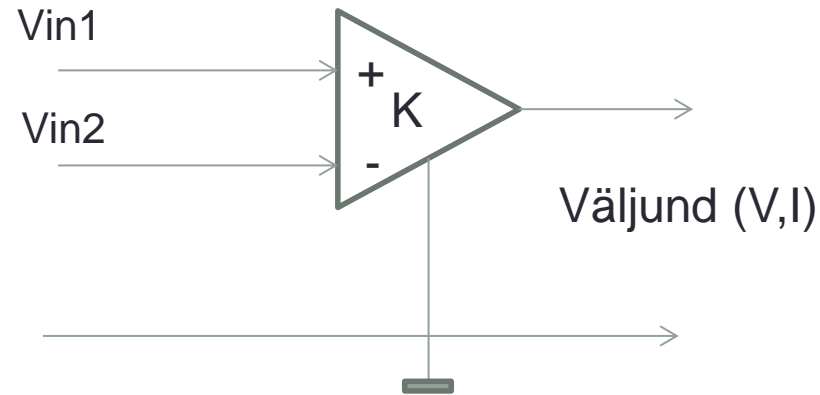
$$K_P = \frac{P_{out}}{P_{in}} , K_P(\text{dB}) = 10 * \log(K_P)$$

**Võimsus on võrdeline pinge (ja ka voolu ) ruuduga !**

# Operatsioonõimendi

Idee 1930 ndatest aastatest, patent 1941,1947.

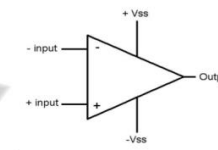
Võimendab vaid **sisendsignaalide vahet** (diferentsiaalvõimendi).



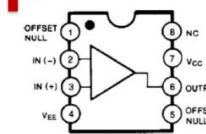
*Väljundpinge*

$$V_{out} = K * (V_{in1} - V_{in2})$$

- K on väga suur (kuni 100 000)
- Mõõtevõimenditel K fikseeritud
- Väga universaalne
- Kui on negatiivselt tagasisidestatud, omandab väljund väärtuse (V või I), et  $V_{in1} = V_{in2}$  .



**OP-AMP**



**Opvõimendiga saab analoogelektronikas praktiliselt kõike teha !!!**

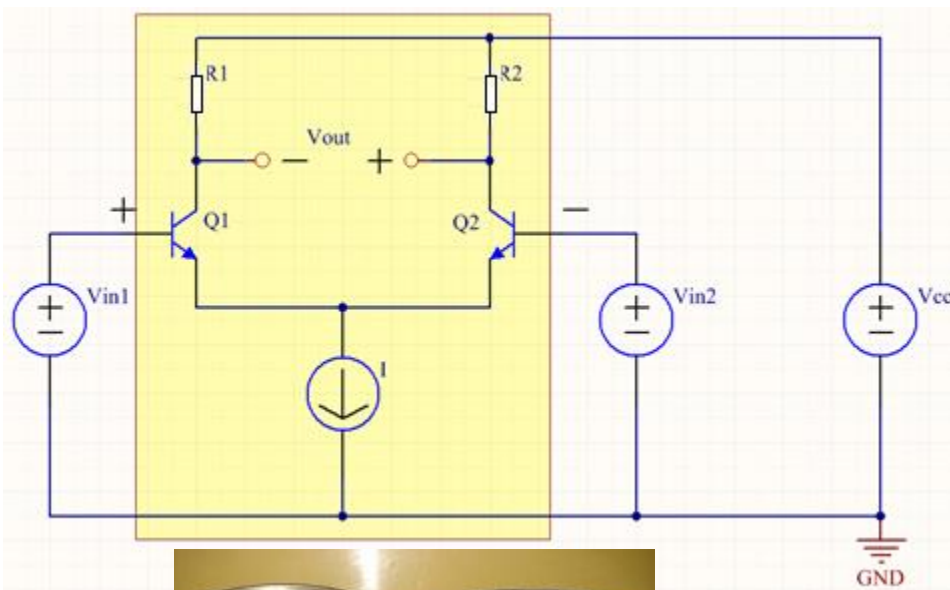
Kõiki difsisendiga võimendeid saab käsitleda OVna (helivõimsusvõimendid)

OV-I võivad olla lisaklemmid korrektsioonideks.



# Diferentsiaalaste

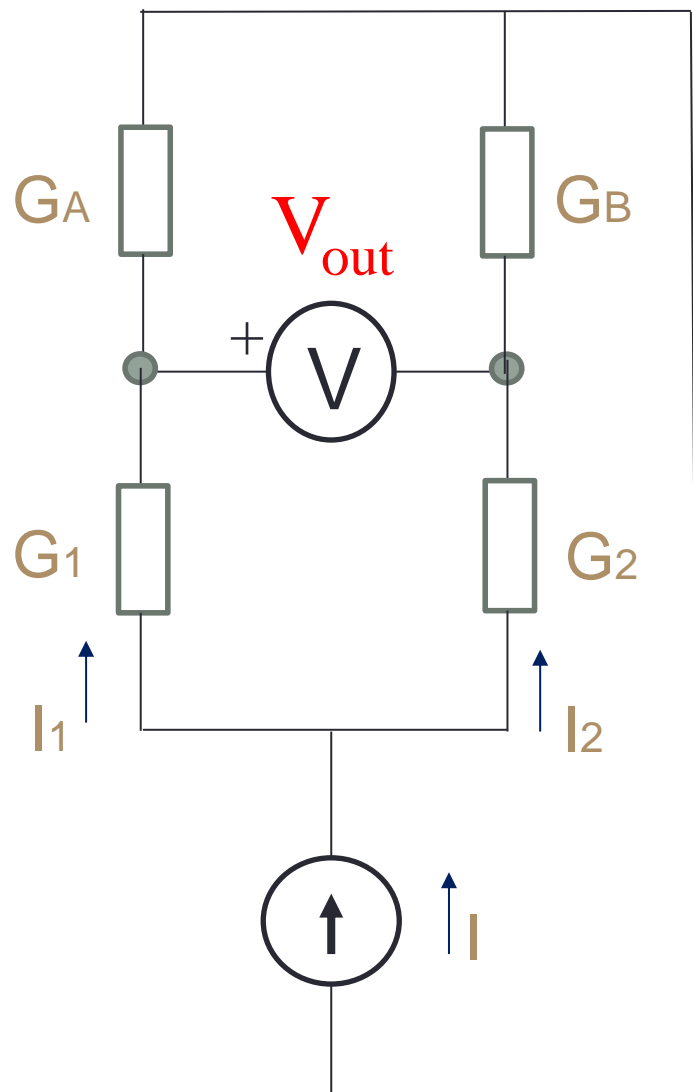
- Operationvõimendi sisendaste ehk elektrooniline “kaal”



Pilt:osta.ee

- Transistorid on toiteahela suhtes rööbiti.
- Väljundpinge on kollektorpingete vahe.
- Transistorid peavad olema sarnaste parameetritega ning temperatuuriga.
- Sisenditele rakendatud samas faasis ühesuguseid pingeid ei võimendata.
- Võimendatakse sisendpingete **erinevust!**

# Diferentsiaalaste



Tööpõhimõtte selgitus:

Asendame transistorid muudetavate juhtivustega  $G_1$  ja  $G_2$   
 $G_A$  ja  $G_B$  on transistoride kollektorkoormustakistid

Täidetud on igal juhul tingimus :  $I_1 + I_2 = I = \text{const}$

Praktilistel kaalutlustel võetakse  $G_A = G_B$

Kui transistorid on ühesugused,

siis sarnaste väliste mõjurite puhul  $G_1 = G_2$

Väljundpinge avaldub (üks võimalik avaldamisviis)

$$V_{out} = I * \frac{G_1 * G_B - G_2 * G_A}{G_1 * G_A(G_2 + G_B) + G_2 * G_B(G_1 + G_A)}$$

Asendame  $G_B \rightarrow G_A$  (võrdsed)

$$V_{out} = I * \frac{G_A * (G_1 - G_2)}{2 * G_1 * G_2 * G_A + G_A^2 * (G_1 + G_2)}$$

Siit on näha, et väljund on 0 kui  $G_1 = G_2$

# Diferentsiaalaste

Asendame  $G_B \rightarrow G_A$  (võrdsed)

$$V_{out} = I * \frac{G_A * (G_1 - G_2)}{2 * G_1 * G_2 * G_A + G_A^2 * (G_1 + G_2)}$$

Oletame, et  $G_A = G_B = G_0 = 1mS$

Allika vool  $I=1mA$

Kui sisendpinged muutuvad võrdselt, muutuvad  $G_1$  ja  $G_2$  samapalju ja väljund on 0 V

$$G_1 = G_0 + V_{in1} * X$$

$$G_2 = G_0 + V_{in2} * X$$

Kui näiteks muutub sisendpinge  $V_{in1}$  mõjul vaid  $G_1$   $1mS \rightarrow 1.5mS$

$G_2$  ei muutu.  $V_{out} = 1mA * \frac{1mS * (1.5mS - 1mS)}{2 * 1mS * 1.5mS * 1mS + 1mS^2 * (1.5mS + 1mS)}$

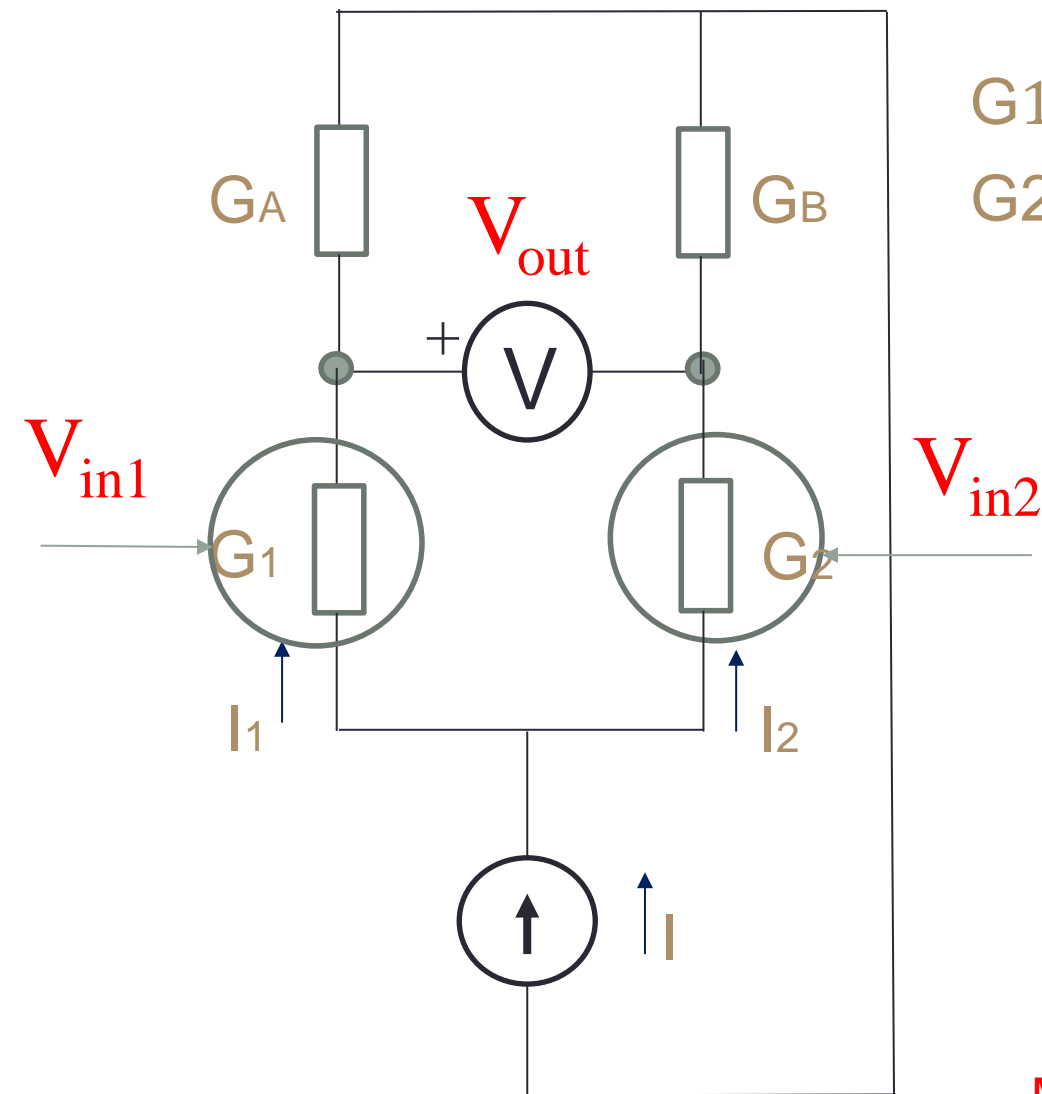
$$V_{out} = 1mA * \frac{0.5mS^2}{3mS^3 + 2.5mS^3} = 91mV$$

Kui näiteks muutub sisendpinge  $V_{in1}$  mõjul vaid  $G_1$   $1mS \rightarrow 1.5mS$

$G_1$  ei muutu.  $V_{out} = 1mA * \frac{1mS * (1mS - 1.5mS)}{2 * 1mS * 1.5mS * 1mS + 1mS^2 * (1.5mS + 1mS)}$

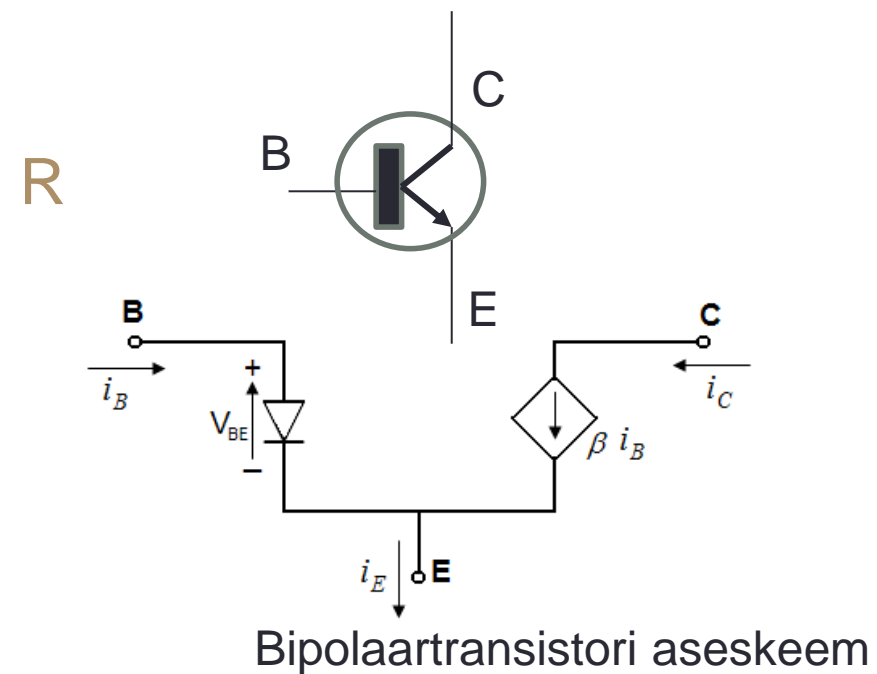
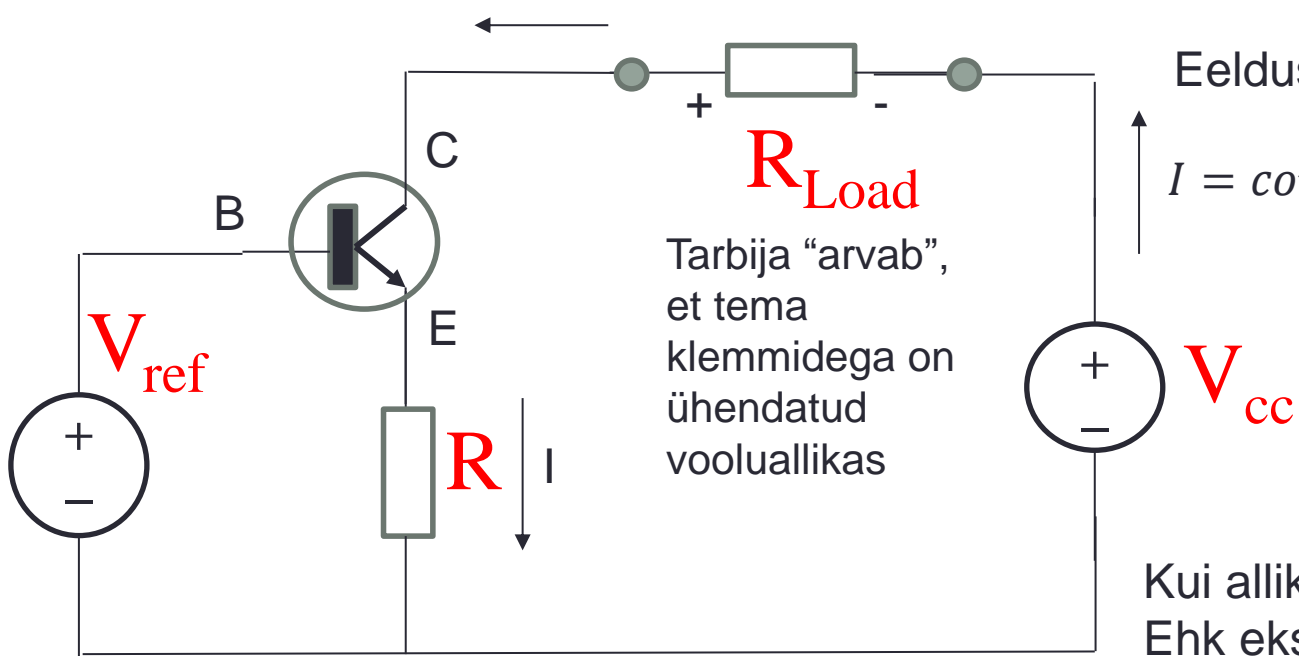
$$V_{out} = 1mA * \frac{0.5mS^2}{3mS^3 + 2.5mS^3} = -91mV$$

Muutused on vastandmärgilised – seda ongi meil vaja !



# Vooluallikas

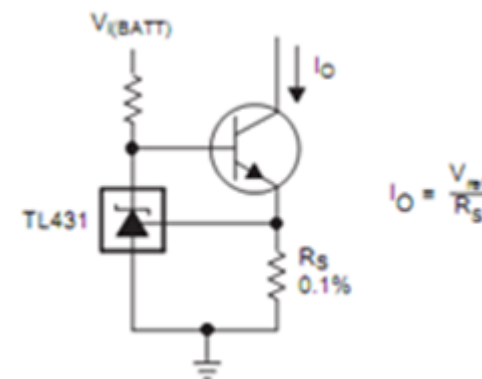
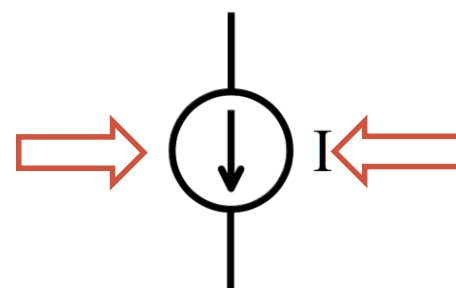
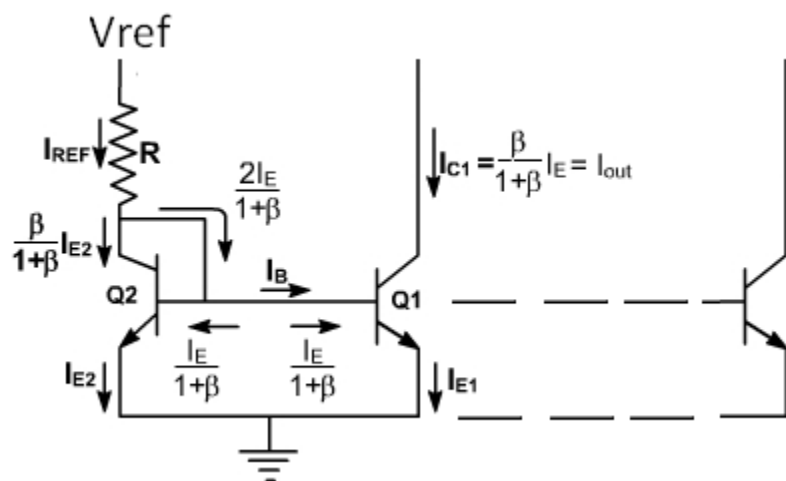
- Eesmärk – **vool ei tohi sõltuda** selle klemmidel olevast pingest.
- Reaalsel vooluallikal on talituspiirkond ja vajab toimimiseks välist energiaallikat.
- Üks koostamise idee – kasutame transistori.
- Bipolaartransistori emittersiire on päripingestatud **diod** ( $V_{BE} \cong 0.7 V$ , *SI transistor*)
- Hea transistori  $I_C \cong I_E$  (vajadusel saab kasutada liittransistori)
- Kasutame pingetaloni  $V_{ref}$  (toitepinge  $V_{CC} \gg V_{ref}$ )



Kui allika ja koormustakise korral on see vool võimalik !  
Ehk eksisteerib maksimaalne  $R_{Load}$

# Voolupeegel

- (püsi)vooluallikas, aga eeldab toiteallika olemasolu.
- Võimaldab sama voolu mitmesse kohta „peegeldada“

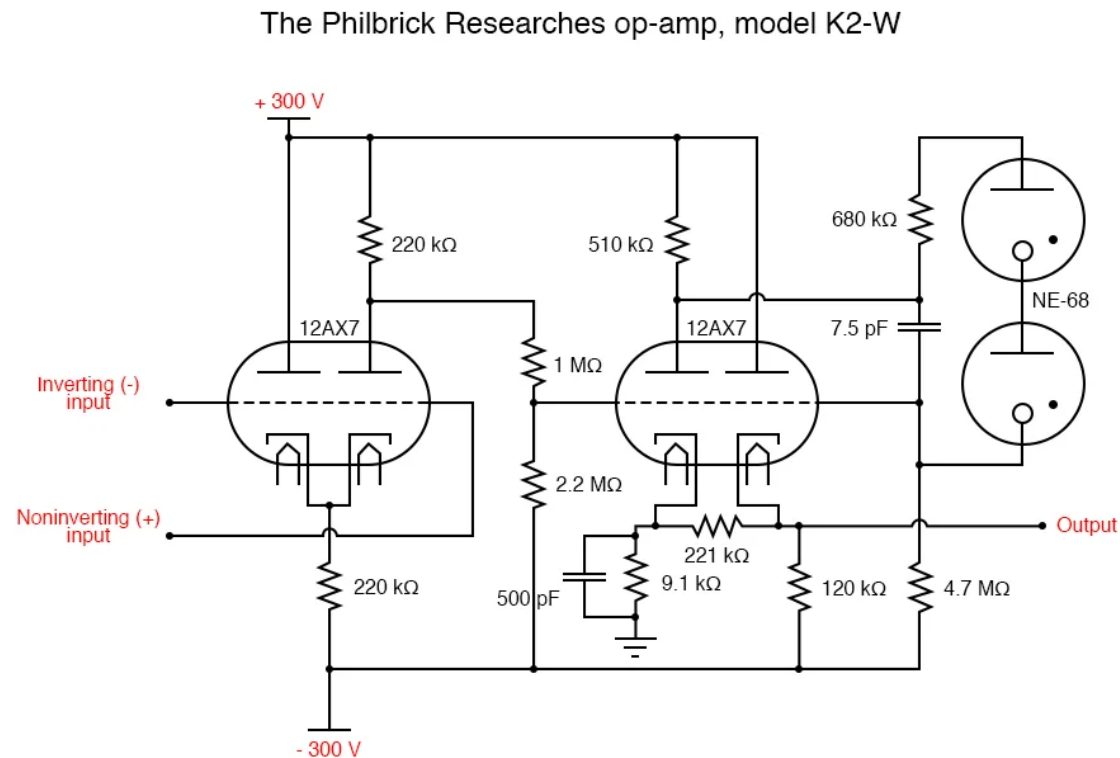


Voolud on võrdsed kui transistorid on samad  
Erinevate parameetritega transistore  
kasutades saab muuta voolude suhet.  
(laialtlevinud integraaltehnikas)

Praktiline vooluallika skeem  
(TL431 andmeleht)

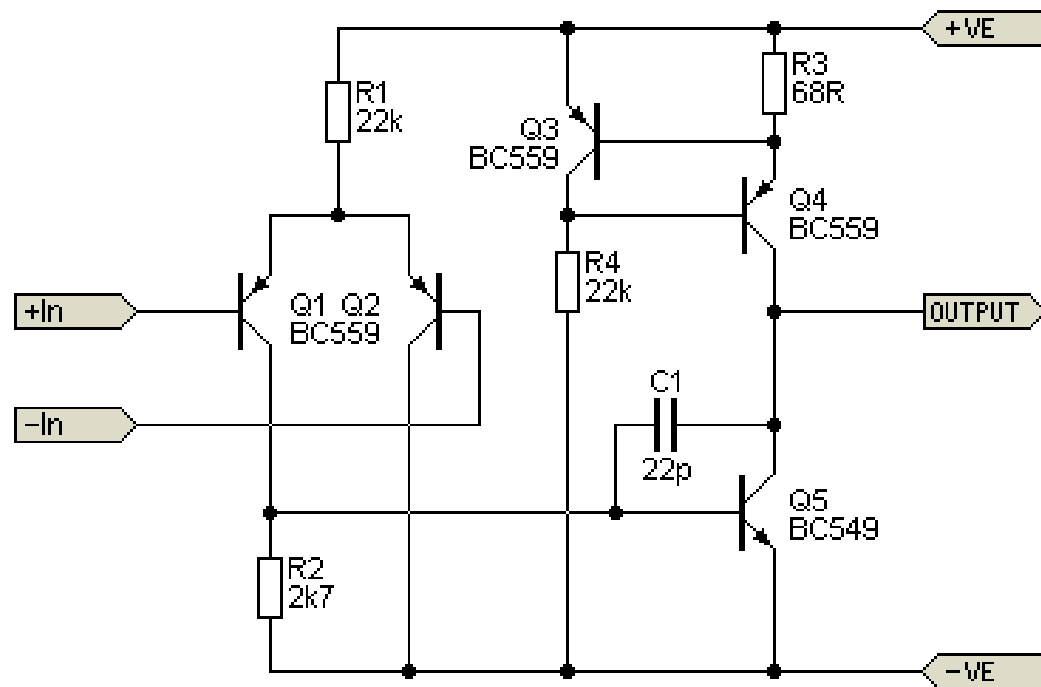
# Operatsioonivõimendi

- Kunagi tehti nii...
- <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/semiconductors/chpt-8/operational-amplifier-models/>



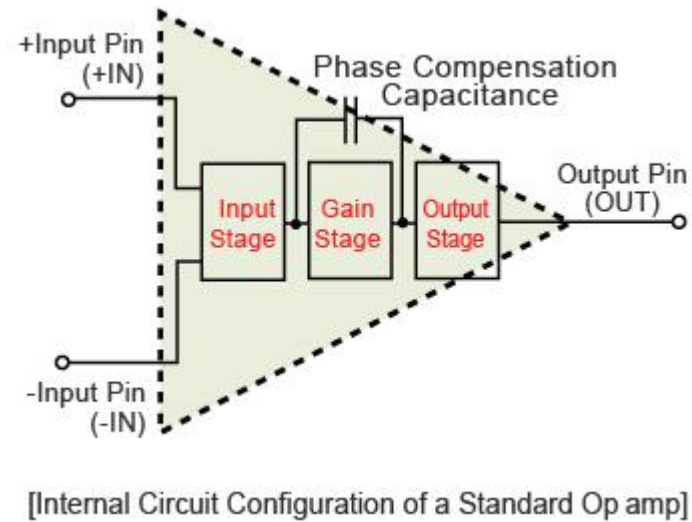
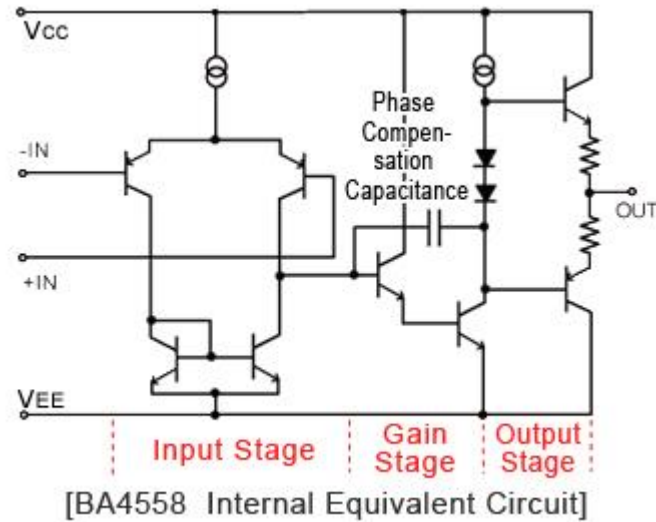
# Operatsioonõimendi

- Transistoridega saaks teha nii...



# Operatsioonvõimendi (BA4558)

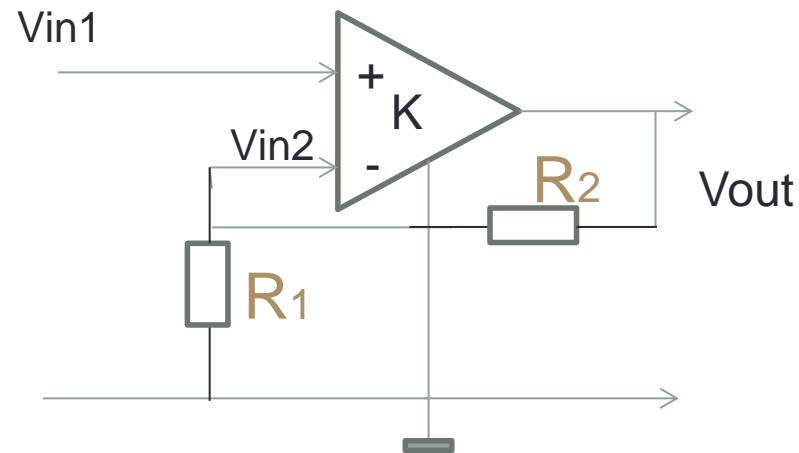
Mikroskeemi sees tehakse tänapäeval näiteks aga nii :





# Operatsioonõimendi

Mitteinverteeriv võimendi.



Väljundpinge

$$V_{out} = K * (V_{in1} - V_{in2})$$

Anname inverteerivasse sisendisse pinge väljundist läbi pingejaguri

$$V_{in2} = V_{out} * \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Asendame  $V_{in2}$  ülemisse valemisse, saame:

$$V_{out} = K * (V_{in1} - V_{out} * \frac{R_1}{R_1 + R_2}) \longrightarrow$$

$$V_{out} = V_{in1} * \frac{K}{1 + K * \frac{R_1}{R_1 + R_2}}$$

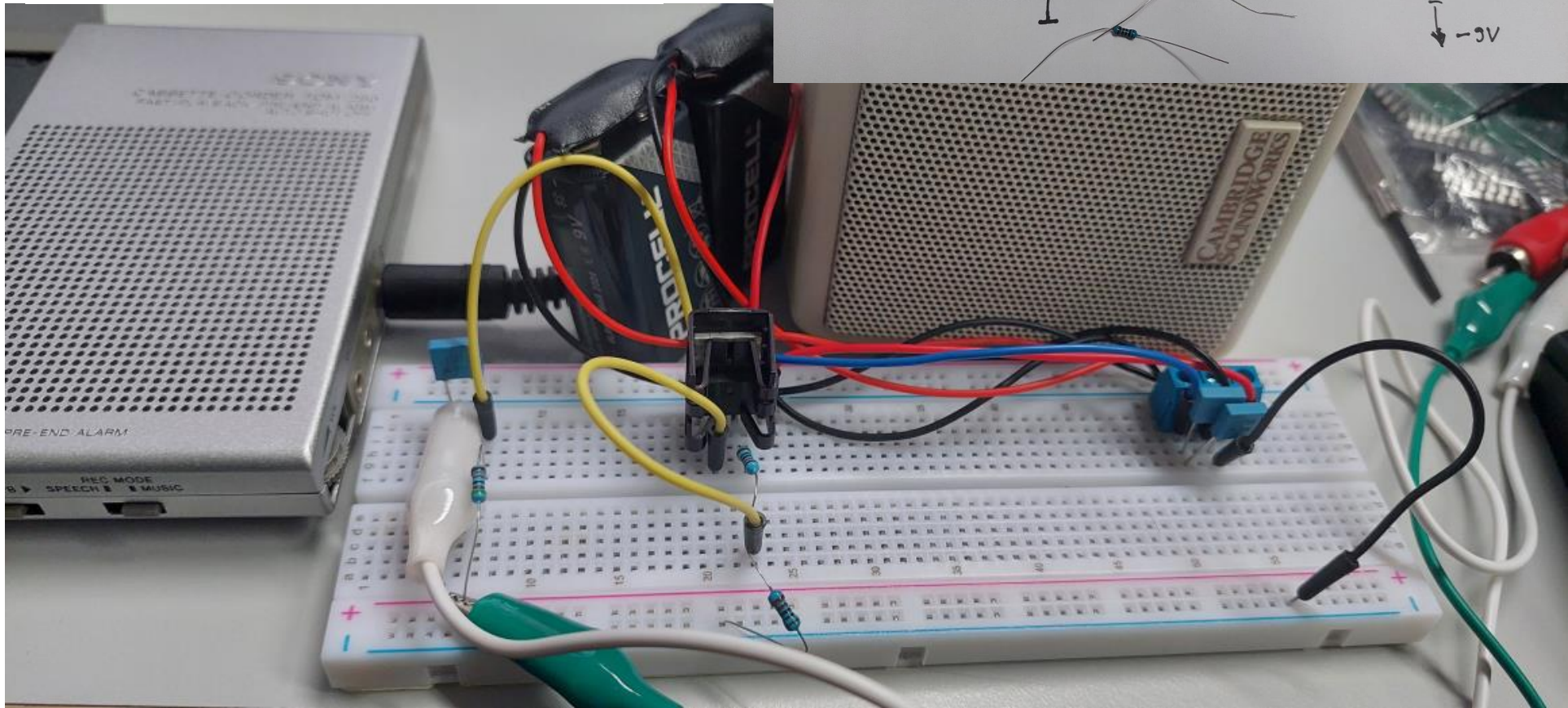
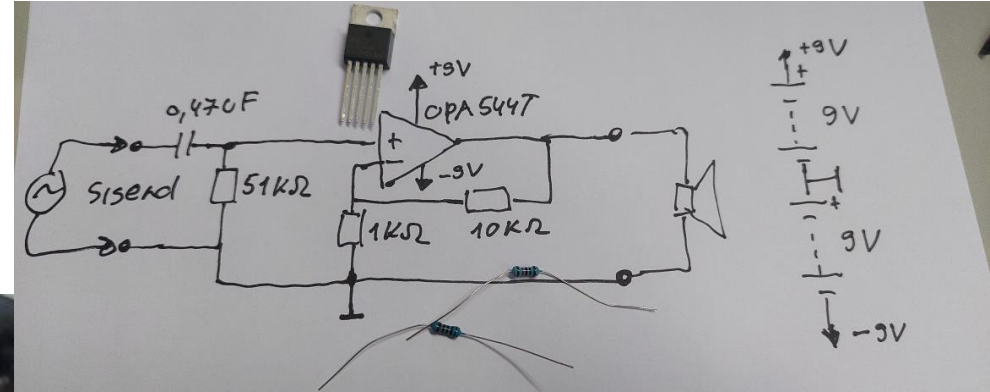
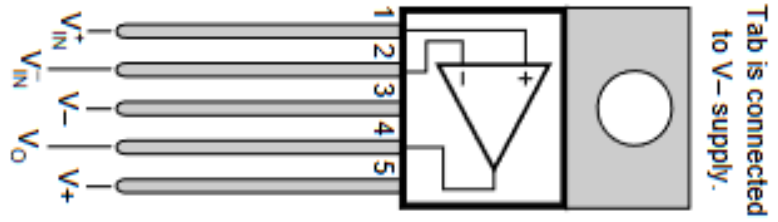
$$\text{Kui } K\beta \gg 1, \text{ siis } K_f = \frac{1}{\beta} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Mida suurem on  $K$ , seda väiksem on selle mõju !

See on jagapingevastuside

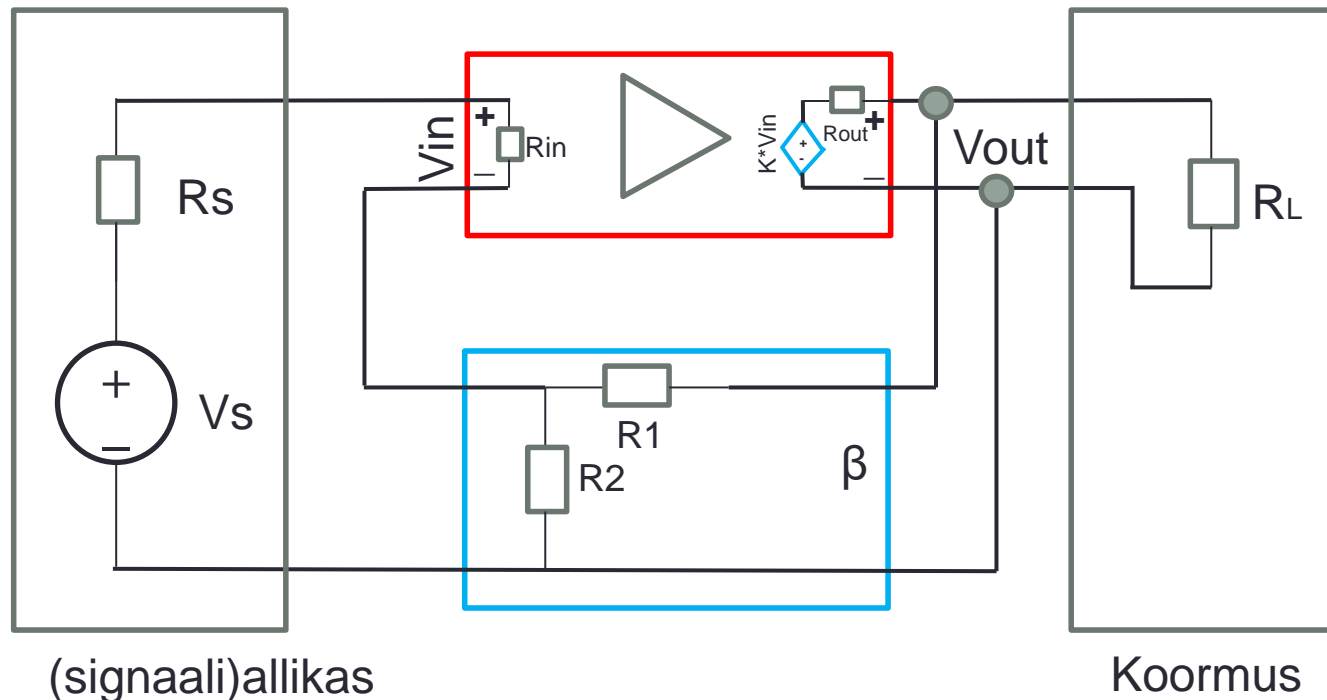
Tagasiside (pingejaguri ülekanne)  $\beta$

# Operatsioonvõimendi - demo



# Operatsioonivõimendiga võimendusastme disain

- See on võimendi **reaalne aseskeem**
- Jah, võimendus on  $\beta$  pöördväärtus, kuid , kuidas valida R1 ja R2 ?
- Arvestama peab ka signaali allika ning koormuse parameetreid ning OV enda omi.

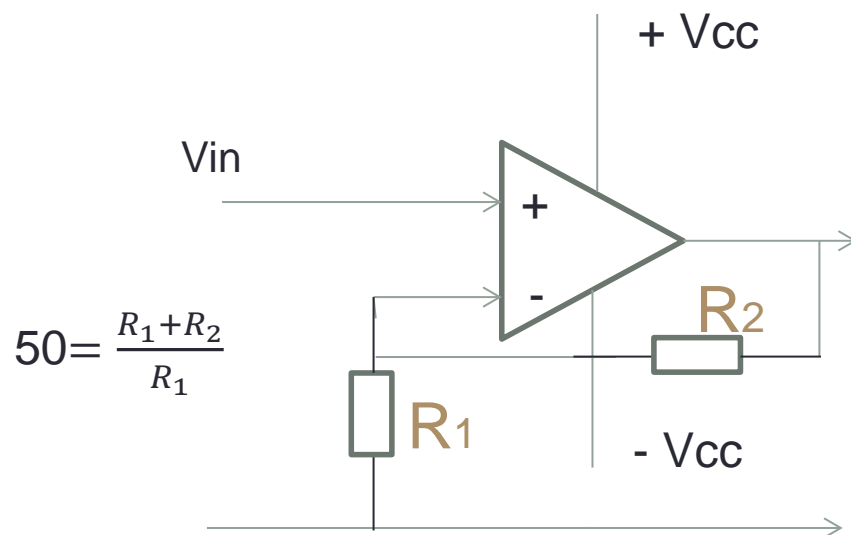


$$\beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

(R2ga läheb rööbiti Rin+Rs !!!)

# OV valik

- Eesmärk – rakendus, kus võimendi hakkab tööle (helivõimendi, mõõtevõimendi, servomootori võrdlusahel...jne).
- Milline on soovitud väljundpinge vahemik ? Sisendpinge vahemik. Need jagades (väljund /sisend) same vajaliku **võimendusteguri** .
- Näide – vaja ühendada Arduino analoogsisendisse (0..5 V) valgusandur, mille väljund on 0..100 mV .
- Vajalik võimendus on  $5\text{ V} / 100\text{ mV} = 50$  korda ehk
- **R1 peab olema 49 korda väiksem kui R2 .**



- Üldreegel – nii väljund kui ka sisend (maa suhtes) **peavad** “ära mahtuma” toitepingete vahele !
- Valime võimendile toitepinge – see **peab** olema suurem väljundpingest (kui palju, selgub OV andmelehest) , üldjuhul on sobiv varu 1-2 V , võib olla ka rohkem.
- Ehk kogutoitepinge võiks olla 5V väljundi puhul 7 V vähemalt. Vaadata tuleb ka negatiivse poole pealt. Miinimum väljundis on 0, ehk OV – poole toitepinge võiks olla ka negatiivne.

## OV valik (2)

- Otsime kataloogist sobiva võimendi
- Ühes korpuses võib olla 1- 4 OV
- Vaja on teada väljundist tarbitavat maksimaalset voolu (tarbija), sisendtakistust (koormab allikat) , toitepinge vahemikku .
- Oluliseks võivad osutada ka maksimaalne töösagedus, müratase, summasignaali võimendus.
- Kui kogemusi vähe, küsige abi !

# OV valik (3)

- [https://www.tme.eu/ee/katalog/?search=Opamp&s\\_field=1000011&s\\_order=desc](https://www.tme.eu/ee/katalog/?search=Opamp&s_field=1000011&s_order=desc)

VÄLJEND "Opamp" LEITI GRUPPIDES:

**Pooljuhid** (2897)



- Integraallülitused (2895)
- Arenduskomplektid (2)

## INTEGRAALLÜLITUSED

VÄLJEND "Opamp" LEITI GRUPPIDES:

**Analoog- ja segaintegraallülitused** (2843)



- Operatsioonivõimendid (2839)
- Draiverid - integraallülitused (3)
- Draiverid MOSFET/IGBT (1)

- 1. Valime korpuse (sama OV võib olla erinevas füüsilisel kujul)

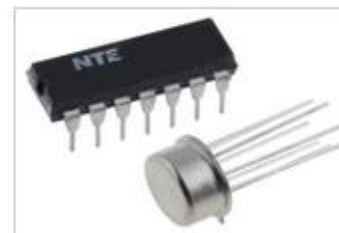
## OPERATSIOONIVÕIMENDID

VÄLJEND "Opamp" LEITI GRUPPIDES:

**Operatsioonivõimendid SMD** (2332)



**Operatsioonivõimendid THT** (507)



# OV valik (4)

- Valikuid on palju....väga palju. Kogemused aitavad.
- Vahest on ka hind määrav
- Saab valida ka eriotstarbelisi (programmeeritav võimendus jne)

## FILTRID

<b>Manufacturer [507]</b> Sisestage tekst... <input type="checkbox"/> Analog Devices [117] <input type="checkbox"/> Analog Devices (MAXIM INTEGRATED) [1] <input type="checkbox"/> Apex Micro [1] <input type="checkbox"/> DIODES INCORPORATED [1] <input type="checkbox"/> MICROCHIP <input type="checkbox"/> märgistage kõik	<b>Type of integrated... [507]</b> Sisestage tekst... <input type="checkbox"/> amplifier [9] <input type="checkbox"/> comparator [1] <input type="checkbox"/> differential amplifier [19] <input type="checkbox"/> instrumentation amplifier [69] <input type="checkbox"/> operational amplifier <input type="checkbox"/> märgistage kõik	<b>Mounting [507]</b> Sisestage tekst... <input type="checkbox"/> SMT [80] <input type="checkbox"/> THT [427] <input type="checkbox"/> märgistage kõik	<b>Case [504]</b> Sisestage tekst... <input type="checkbox"/> CDIP14 [3] <input type="checkbox"/> DIP8 [286] <input type="checkbox"/> DIP12 [1] <input type="checkbox"/> DIP14 [88] <input type="checkbox"/> DIP16 [15] <input type="checkbox"/> DIP18 [1] <input type="checkbox"/> DSO8 [1] <input type="checkbox"/> märgistage kõik	<b>Number of channels [504]</b> Väärtus või ulatus... <input type="checkbox"/> 1 [268] <input type="checkbox"/> 2 [155] <input type="checkbox"/> 3 [4] <input type="checkbox"/> 4 [77] <input type="checkbox"/> märgistage kõik	<b>Bandwidth [422]</b> Sisestage väärtus... <input type="checkbox"/> 20Hz..20kHz [1] <input type="checkbox"/> 2kHz [1] <input type="checkbox"/> 14kHz [3] <input type="checkbox"/> 20kHz [3] <input type="checkbox"/> 35kHz [1] <input type="checkbox"/> 37kHz [1] <input type="checkbox"/> 60Hz [1] <input type="checkbox"/> märgistage kõik	<b>Operating temperature [344]</b> Sisestage väärtus... <input type="checkbox"/> -65..150°C [1] <input type="checkbox"/> -55..85°C [1] <input type="checkbox"/> -55..125°C [29] <input type="checkbox"/> -40..85°C [117] <input type="checkbox"/> -40..105°C [3] <input type="checkbox"/> -40..125°C [13] <input type="checkbox"/> 0..150°C [1] <input type="checkbox"/> märgistage kõik	<b>Voltage supply range [342]</b> Sisestage väärtus... <input type="checkbox"/> ± 800mV DC..18V DC [3] <input type="checkbox"/> ± 1..8V DC [3] <input type="checkbox"/> ± 1..22V DC [2] <input type="checkbox"/> ± 1.1..18V DC [2] <input type="checkbox"/> ± 1.2..6V DC [1] <input type="checkbox"/> +1..3..18V DC [3] <input type="checkbox"/> märgistage kõik
<b>Kind of package [193]</b> Sisestage tekst... <input type="checkbox"/> bulk [3] <input type="checkbox"/> tube [190] <input type="checkbox"/> märgistage kõik	<b>Integrated circuit... [134]</b> Sisestage tekst... <input type="checkbox"/> audio line receiver [7] <input type="checkbox"/> auto-zero [2] <input type="checkbox"/> differential [4] <input type="checkbox"/> gain control [1] <input type="checkbox"/> galvanically isolated [4] <input type="checkbox"/> high speed [10] <input type="checkbox"/> low speed [1] <input type="checkbox"/> märgistage kõik	<b>Operating voltage [127]</b> Sisestage väärtus... <input type="checkbox"/> 2..5.5V [2] <input type="checkbox"/> 2..15V [1] <input type="checkbox"/> 2..28V [1] <input type="checkbox"/> 2..32V [1] <input type="checkbox"/> 2.2..5.5V [3] <input type="checkbox"/> 2.3..5.5V [5] <input type="checkbox"/> 2.4..5.5V [2] <input type="checkbox"/> märgistage kõik	<b>Open-loop gain [123]</b> Väärtus või ulatus... <input type="checkbox"/> 60dB [2] <input type="checkbox"/> 61dB [1] <input type="checkbox"/> 62dB [3] <input type="checkbox"/> 63dB [1] <input type="checkbox"/> 65dB [1] <input type="checkbox"/> 66dB [2] <input type="checkbox"/> 77dB [1] <input type="checkbox"/> märgistage kõik	<b>Gain [87]</b> Sisestage väärtus... <input type="checkbox"/> 100mV/V [2] <input type="checkbox"/> 500mV/V [6] <input type="checkbox"/> 1V/V [50] <input type="checkbox"/> 2V/V [9] <input type="checkbox"/> 4V/V [7] <input type="checkbox"/> 5V/V [5] <input type="checkbox"/> 10V/V [1] <input type="checkbox"/> märgistage kõik	<b>Quiescent current [47]</b> Väärtus või ulatus... <input type="checkbox"/> 1µA [6] <input type="checkbox"/> 25µA [6] <input type="checkbox"/> 30µA [2] <input type="checkbox"/> 70µA [3] <input type="checkbox"/> 170µA [3] <input type="checkbox"/> 240µA [2] <input type="checkbox"/> 300µA [1] <input type="checkbox"/> märgistage kõik	<b>Power dissipation [40]</b> Sisestage väärtus... <input type="checkbox"/> 125mW [1] <input type="checkbox"/> 250mW [3] <input type="checkbox"/> 450mW [1] <input type="checkbox"/> 500mW [18] <input type="checkbox"/> 570mW [2] <input type="checkbox"/> 600mW [1] <input type="checkbox"/> 600mW [1] <input type="checkbox"/> märgistage kõik	<b>Input bias current [24]</b> Sisestage väärtus... <input type="checkbox"/> -0.5µA [1] <input type="checkbox"/> 65pA [1] <input type="checkbox"/> 0.1nA [1] <input type="checkbox"/> 1nA [1] <input type="checkbox"/> 5nA [1] <input type="checkbox"/> 8nA [1] <input type="checkbox"/> 20nA [1] <input type="checkbox"/> märgistage kõik




# OV valik (5)

- Valikuid saab lihtsustada, kui määrata ära toitepinge ja võimendite arv korpuses
- Komponenti peab saama ka reaalselt osta !!! Kui plaanite seda kasutada oma (mass)tootes, veenduge, et seda saab mitme tootja ja tarnija käest (võimalikud tarneprobleemid) – asendused.

**Kõik leitud (12)**  Näita ainult uudiseid (1)  Näidake ainult laos saadaolevaid tooteid

Artiklite kogus leheküljel 20 Sorteerimine Tabavus kahanevalt

Artikkel: sümbol ja kirjeldus Netohind\* in EUR Kogus Laosels

Artikkel	Kirjeldus	Kogus: [tk]	Netohind* [EUR/tk]	Mitmekordsus: 1 Min. kogus: 1	Laos [tk]:0
	IC: operational amplifier; 800kHz; Channels: 1; DIP8; ±1.35+18VDC   INFO Tootja: <a href="#">TEXAS INSTRUMENTS</a> Tootja tähistus: <a href="#">INA118PB</a>	1+ 24.46 3+ 22.04 10+ 19.44 50+ 17.47		<input type="text" value="1"/>	<a href="#">Laotarned</a>
	IC: operational amplifier; 35kHz; Channels: 1; DIP8; Package: tube   INFO Tootja: <a href="#">TEXAS INSTRUMENTS</a> Tootja tähistus: <a href="#">OPA241PA</a>	1+ 3.22 3+ 2.84 10+ 2.55 50+ 2.38		<input type="text" value="1"/>	<a href="#">Laotarned</a>
	IC: instrumentation amplifier; DIP8; 800kHz; Channels: 1; 0.9V/µs   INFO Tootja: <a href="#">TEXAS INSTRUMENTS</a> Tootja tähistus: <a href="#">INA118P</a>	1+ 15.20 3+ 13.70 10+ 12.70 50+ 11.80		<input type="text" value="1"/>	<a href="#">Laotarned</a>

Laoseis

Laos [tk]:0


[Laotarned](#)


TELLIGE



# OV valik (6)

- Hobiprojektiks sobib , tootesse mitte (vt laoseis)



**TL071IP** 

IC: operational amplifier; 3MHz; Channels: 1; DIP8;  $\pm 5\pm 15$ VDC

[INFO](#)

Tootja: [TEXAS INSTRUMENTS](#)

Tootja tähistus: [TL071IP](#)

[Lisage võrdluse](#) [Määrake teavitus](#) [Lisa Lemmikutesse](#)

Kogus: [tk]	Netohind* [EUR/tk]:
1+	0.8099
3+	0.4309
10+	0.3709
50+	0.3198
150+	0.2885

Mitmekordsus: 1  
Min. kogus: 1

Laos [tk]: 1302  
[Laotarned](#)

1 [TELLIGE](#)

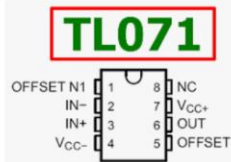
**Toode on raskesti kättesaadav**

- Avame andmelehe, sealt saab disainisoovitusi
- <https://www.ti.com/product/TL071>
- NB ! Otsige Tootja kodulehelt !!!

Google tl071 datasheet


Q Kõik Pildid Videod Maps Uudised Rohi

tl072 pinout tl071cp opamp single su

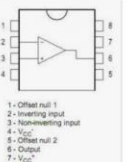


**TL071**

OFFSET N1 1 8 NC  
IN- 2 7 VCC+  
IN+ 3 6 OUT  
VCC- 4 5 OFFSET N2

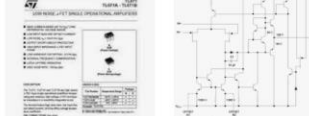


TL071 Datasheet (PDF) - alldatasheet.com

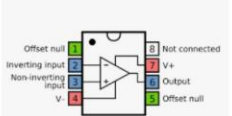


TL071 datasheet, Pino...  
datasheetdir.com

1 - Offset null 1  
2 - Inverting input  
3 - Non-inverting input  
4 - VCC+  
5 - Offset null 2  
6 - Output  
7 - VCC-  
8 - Offset null



TL071 Datasheet - JFET-Input Operational A...  
datasheetcafe.com



TL071 Datasheet (PDF) - alldatasheet.com

Offset null 1 8 Not connected  
Inverting input 2 V+  
Non-inverting input 3 V-  
Output 4  
Offset null 5

# OV valik (7 -andmeleht)



TL071, TL071A, TL071B, TL071H  
TL072, TL072A, TL072B, TL072H, TL072M  
TL074, TL074A, TL074B, TL074H, TL074M  
SLOS080T – SEPTEMBER 1978 – REVISED DECEMBER 2021

## TL07xx Low-Noise FET-Input Operational Amplifiers

### 1 Features

- High slew rate: 20 V/ $\mu$ s (TL07xH, typ)
- Low offset voltage: 1 mV (TL07xH, typ)
- Low offset voltage drift: 2  $\mu$ V/ $^{\circ}$ C
- Low power consumption: 940  $\mu$ A/ch (TL07xH, typ)
- Wide common-mode and differential voltage ranges
  - Common-mode input voltage range includes  $V_{CC+}$
- Low input bias and offset currents
- Low noise:  
 $V_n = 18 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  (typ) at  $f = 1 \text{ kHz}$
- Output short-circuit protection
- Low total harmonic distortion: 0.003% (typ)
- Wide supply voltage:  
 $\pm 2.25 \text{ V}$  to  $\pm 20 \text{ V}$ , 4.5 V to 40 V

### 2 Applications

- [Solar energy: string and central inverter](#)
- [Motor drives: AC and servo drive control and power stage modules](#)
- [Single phase online UPS](#)
- [Three phase UPS](#)
- [Pro audio mixers](#)
- [Battery test equipment](#)

### 3 Description

The TL07xH (TL071H, TL072H, and TL074H) family

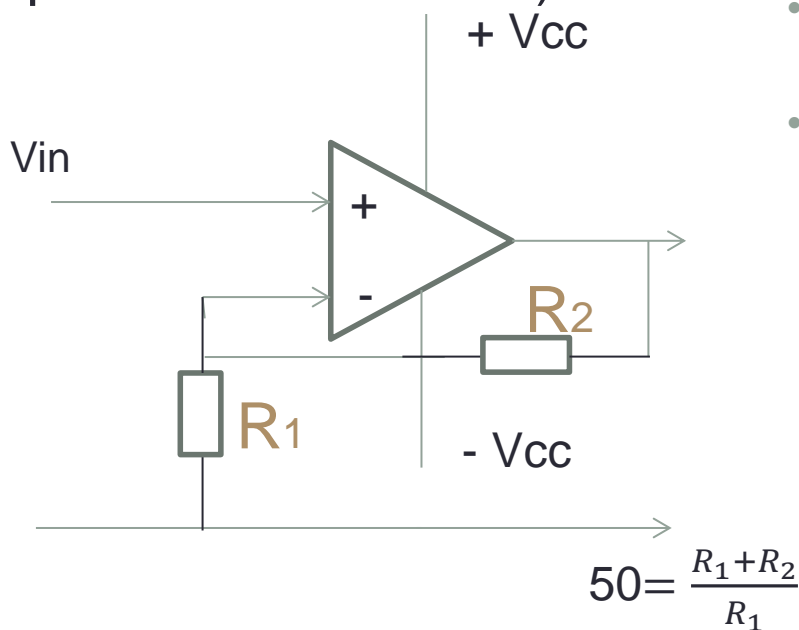
(1.5 kV, HBM), integrated EMI and RF filters, and operation across the full  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $125^{\circ}\text{C}$  enable the TL07xH devices to be used in the most rugged and demanding applications.

#### Device Information

PART NUMBER <sup>(1)</sup>	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
TL071x	PDIP (8)	9.59 mm $\times$ 6.35 mm
	SC70 (5)	2.00 mm $\times$ 1.25 mm
	SO (8)	6.20 mm $\times$ 5.30 mm
	SOIC (8)	4.90 mm $\times$ 3.90 mm
	SOT-23 (5)	1.60 mm $\times$ 1.20 mm
TL072x	PDIP (8)	9.59 mm $\times$ 6.35 mm
	SO (8)	6.20 mm $\times$ 5.30 mm
	SOIC (8)	4.90 mm $\times$ 3.90 mm
	SOT-23 (8)	2.90 mm $\times$ 1.60 mm
	TSSOP (8)	4.40 mm $\times$ 3.00 mm
TL072M	CDIP (8)	9.59 mm $\times$ 6.67 mm
	CFP (10)	6.12 mm $\times$ 3.56 mm
	LCCC (20)	8.89 mm $\times$ 8.89 mm
TL074x	PDIP (14)	19.30 mm $\times$ 6.35 mm
	SO (14)	10.30 mm $\times$ 5.30 mm
	SOIC (14)	8.65 mm $\times$ 3.91 mm
	SOT-23 (14)	4.20 mm $\times$ 2.00 mm
	SSOP (14)	6.20 mm $\times$ 5.30 mm
	TSSOP (14)	5.00 mm $\times$ 4.40 mm

# OV valik (8 -takistid)

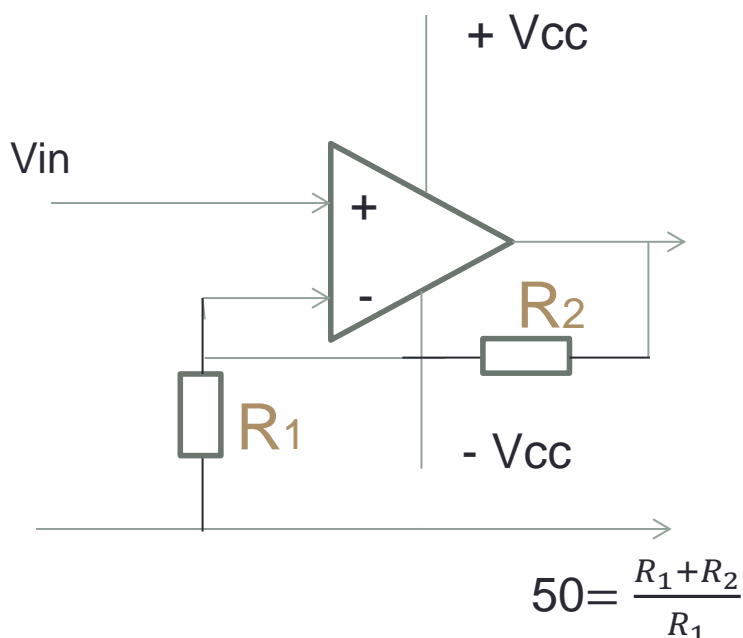
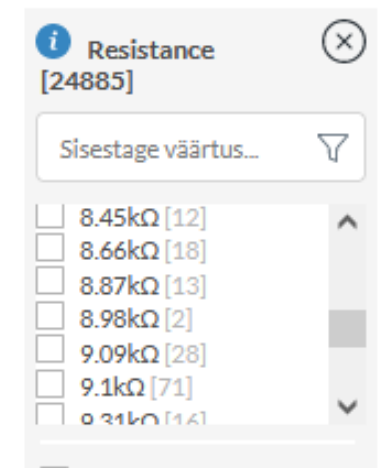
- Vajalik võimendus on  $5 \text{ V} / 100 \text{ mV} = 50$  korda ehk
- **R1 peab olema 49 korda väiksem kui R2 .**
- Kui R1 ja R2 on liiga väikesed , jookseb nendest läbi liiga suur vool.
- Kui R1 ja R2 on liiga suured , hakkab segama OV sisendtakistus (sisendvool) , lisanduvad häired ümbruskonnast parasitmahtuvused)



- Eesmärk valida R1 ja R2 võimalikult suured, et nende suhe oleks 49.
- Selleks vaatame andmelehte TL071 sisendvool on maksimaalselt 5 nA . Selleks, et see vool meid ei “segaks” valime R1 voolu vähemalt 100 korda suurema  $>500 \text{ nA}$  . See vool tuleb OV väljundist . Aga võiks jääda ka vähemalt 100 korda väiksemaks max lubatud väljundvoolust Valime näiteks 10 uA kui väljundpinge on 5V ...siis **R1+R2=500 kΩ**

# OV valik (9 - takistid)

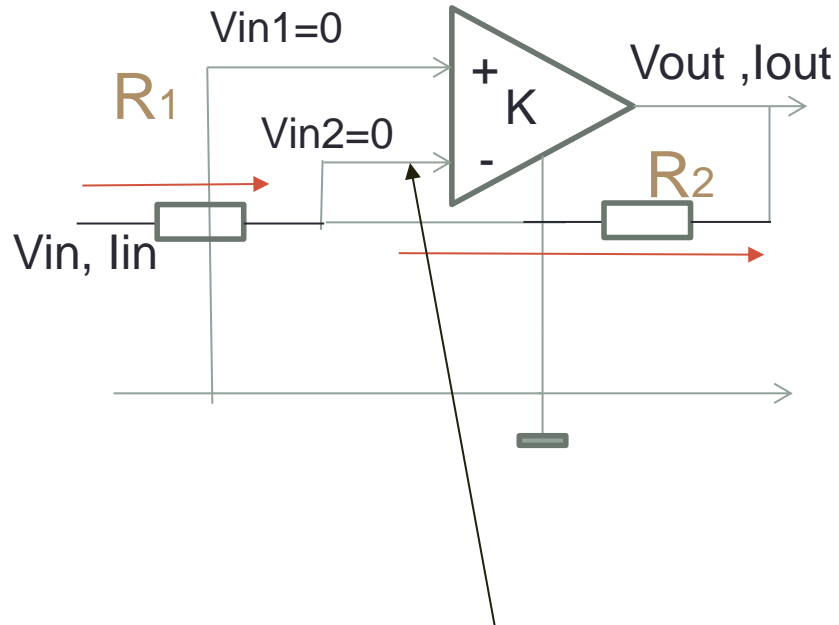
- Leiame takistid, mille jagatis on 49 ja summa 500 kΩ
- **NB ! Summa ei pea olema täpselt 500 kΩ**  
See on vaid suurusjärk. **Jagatis on ülitähtis – see määrab võimenduse !**



- Alustame suuremast takistist . Poes müüakse 430 kΩ
- Väiksem takisti siis 8,78 kΩ
- **Ei toodeta ! – Lahendused**
- Valime suurema takisti uuesti (veidi suurem või väiksem) ning arvutame uuesti
- Teine takisti paralleeli /jadasse – harva kasutatav
- Asendame kahe takistiga, millest üks on seadetakisti - tavaline
- **Lepime sellega , teeme korrektsiooni tarkvaras – tänapäeval enamlevinud meetod kui tulemus läheb digiteerimisele.**

# Operatsioonvõimendi

Inverteeriv võimendi



„virtuaalmaa“

*Opvõim käitub ideaalis sedasi:*

*$V_{in1}=0 \rightarrow V_{in2}=0$   $K \gg \infty$*

*Sisendvool*

*$I_{in}=V_{in}/R_1$*

*Saab minna vaid väljundisse*

*$V_{out}=R_2 * -I_{in}$*

*Paneme kokku*

$$V_{out} = -V_{in} * \frac{R_2}{R_1}$$

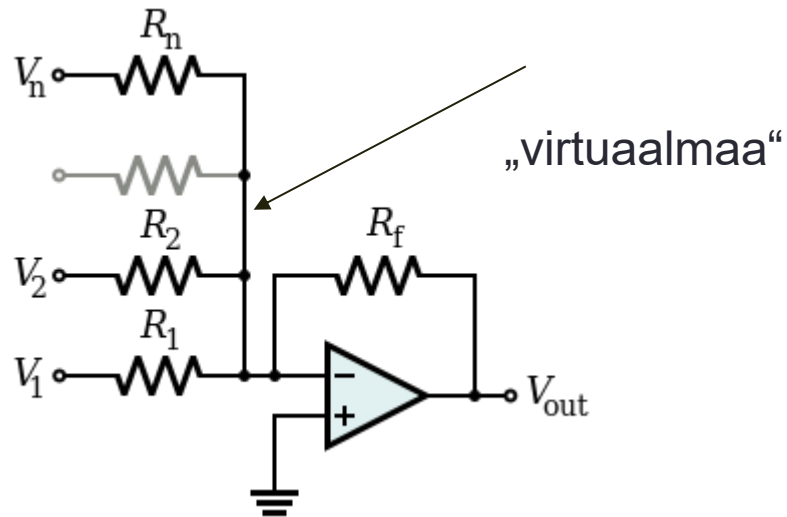
$$K_f = -\frac{R_2}{R_1}$$

Saab tekitada takistuste suhtega teise pinget. Väljund käitub kui pingesallikas.

See on rööpingevastuside

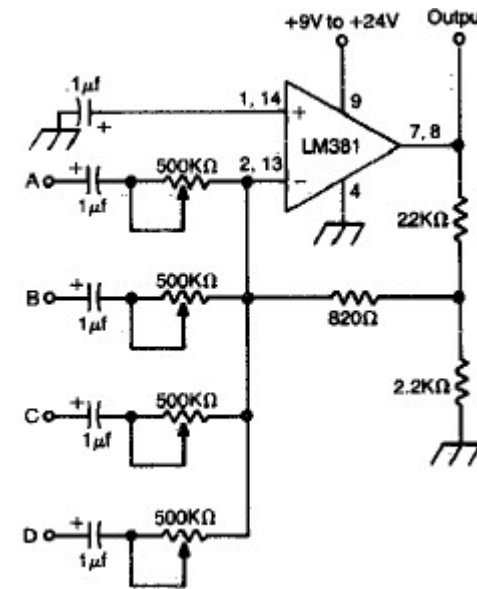
# Operatsioonvõimendi

Summeeriv inverteeriv võimendi



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

Väljundpinge on kaalutud sisendpingete summa.

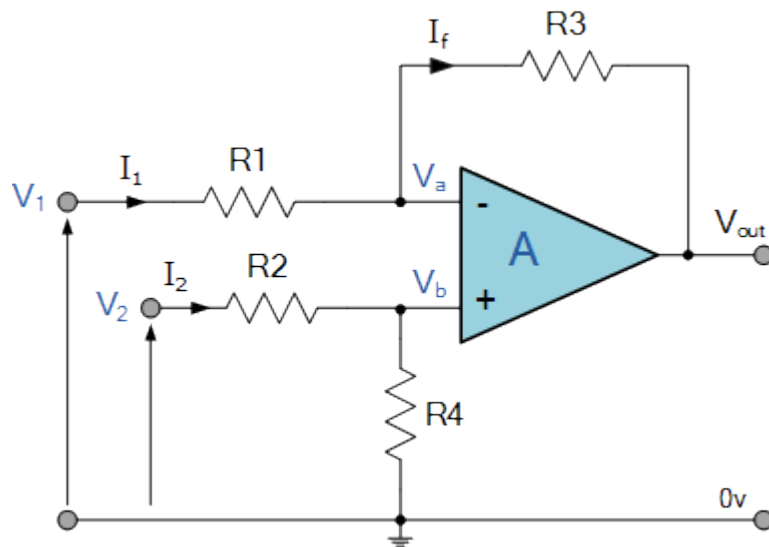


Lihtne helimikser

<http://www.electroniccircuitsdesign.com/audio-circuits/4-channel-audio-mixer-circuit-using-lm381.html>

# Operatsioonvõimendi

Kindla võimendusega diferentsiaalvõimendi.



Lihtne teha, aga tülikas kasutada,  
Sisendtakistuse määrab R1,  
mis ei saa olla kuigi suur.

[https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp\\_5.html](https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp_5.html)

$$I_1 = \frac{V_1 - V_a}{R_1}, \quad I_2 = \frac{V_2 - V_b}{R_2}, \quad I_f = \frac{V_a - (V_{out})}{R_3}$$

Summing point  $V_a = V_b$

$$\text{and } V_b = V_2 \left( \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right)$$

$$\text{If } V_2 = 0, \text{ then: } V_{out(a)} = -V_1 \left( \frac{R_3}{R_1} \right)$$

$$\text{If } V_1 = 0, \text{ then: } V_{out(b)} = V_2 \left( \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \left( \frac{R_1 + R_3}{R_1} \right)$$

$$V_{out} = -V_{out(a)} + V_{out(b)}$$

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

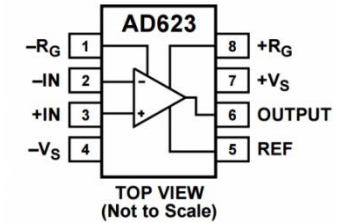
Kui  $R_1=R_2$  ja  $R_3=R_4$  siis

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

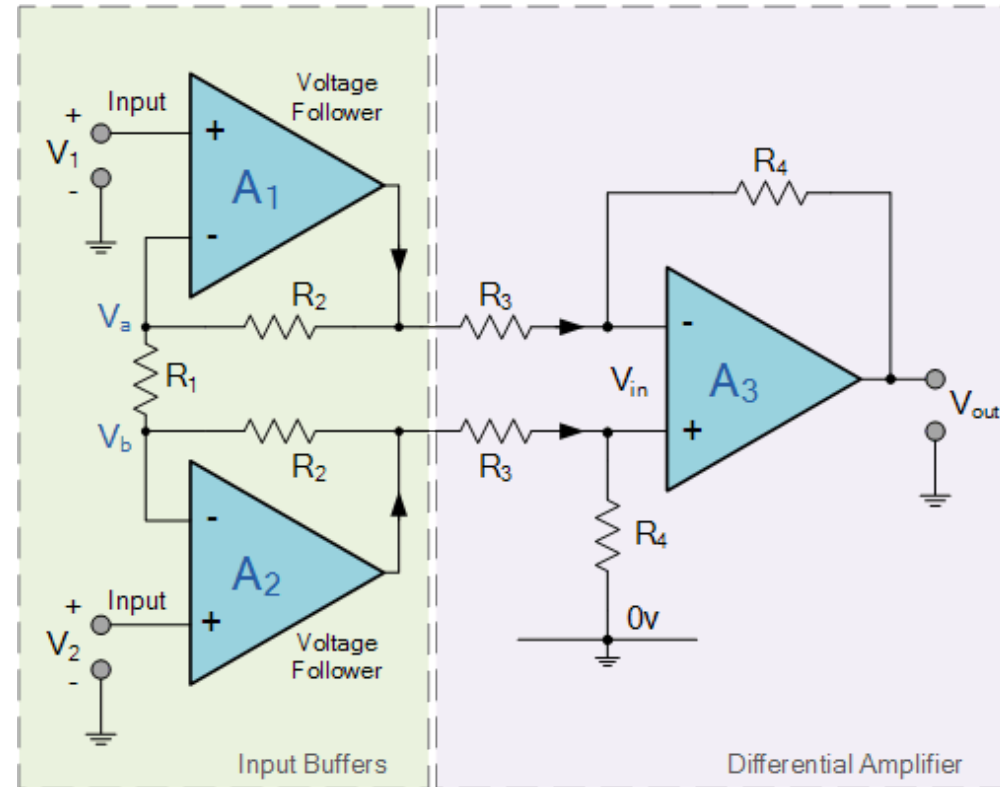
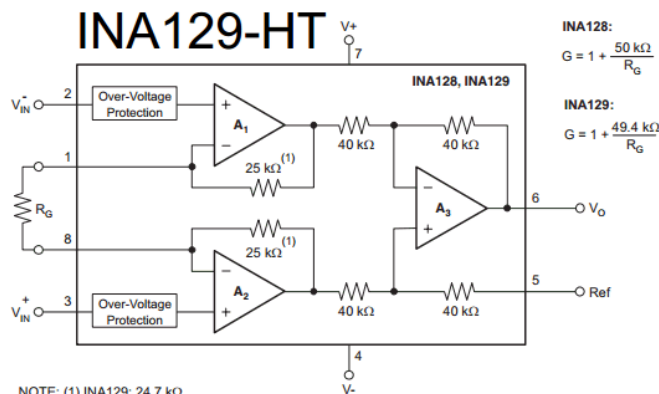
# Operatsioonvõimendi

- Diferentsiaalvõimendi (mõõtevõimendi) praktiline skeem
- Vajab kolme OV
- Võimenduse seadistus R1 muutmisega.

CONNECTION DIAGRAM



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

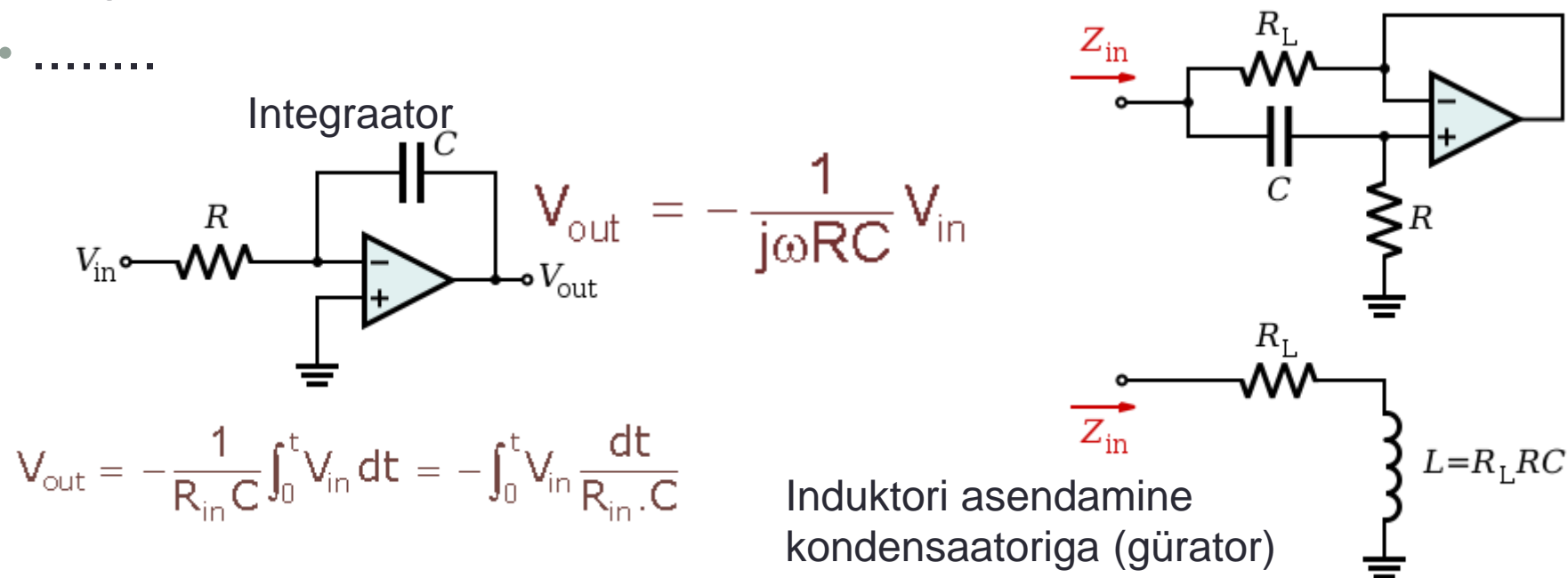




# Operatsioonvõimendi

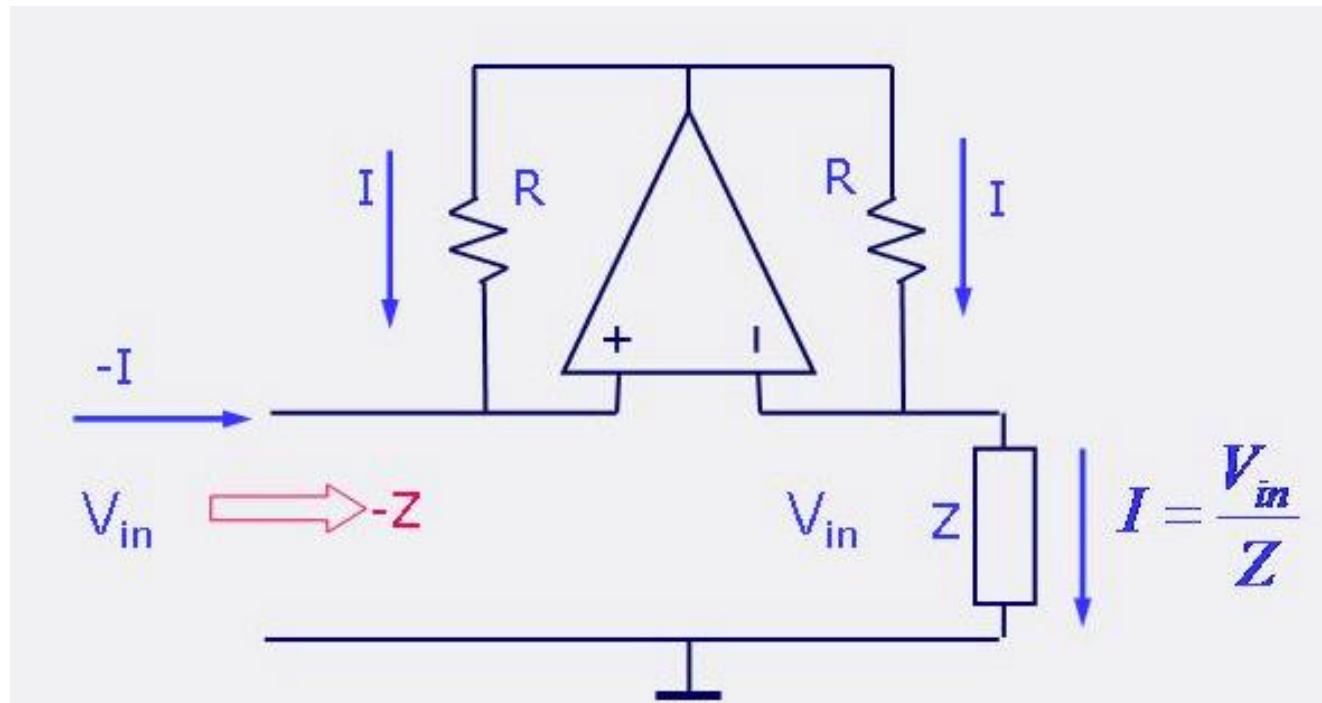
Asendades eelmistes skeemides takistid teiste komponentidega on võimalik teha

- Filtreid
- Takistuskonvertereid (induktoritest vabanemine !!!!)
- Logaritmivaid või astendavaid võimendeid.
- .....



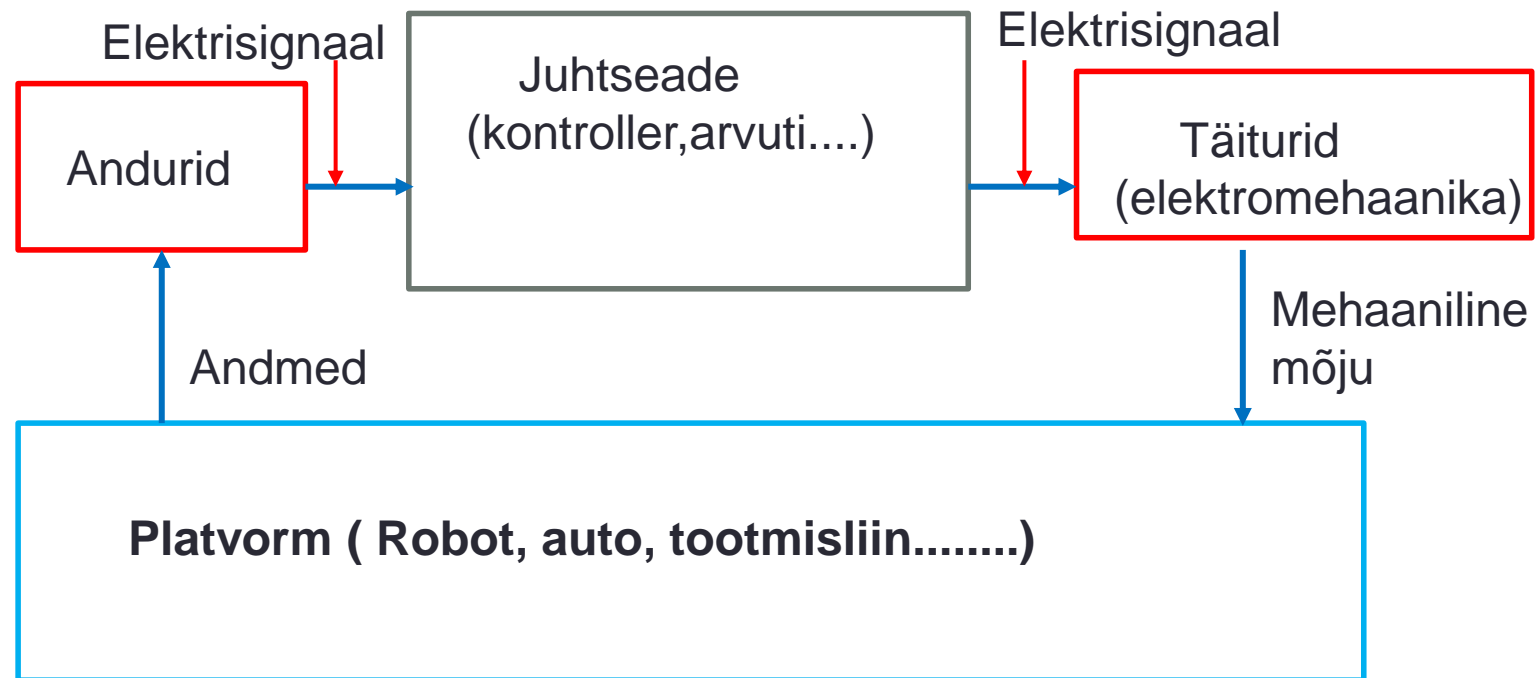
# Negatiivse impedantsi konverter (INIC)

- Võimaldab saada negatiivset takistust
- Positiivne tagasiside
- Reaalsete komponentidega ebastabiilne
- DEMO-→ [isc.ttu.ee](http://isc.ttu.ee) → Õppematerjalid → Videod



# Stabiilsus ajas

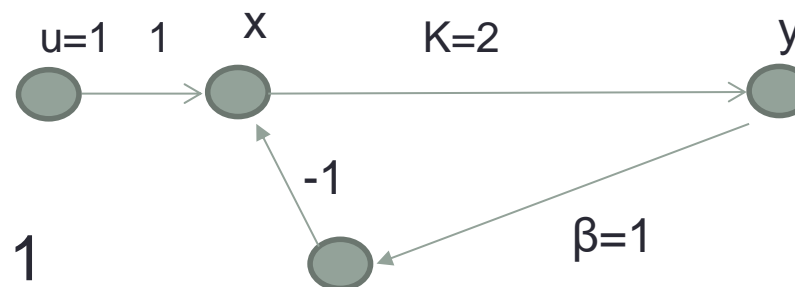
- **Probleem: Kõik ei toimu hetkega !, mängu tuleb aeg ja dünaamika . Kõik, mis esmapilgul lihtne, võib osutuda keeruliseks .**



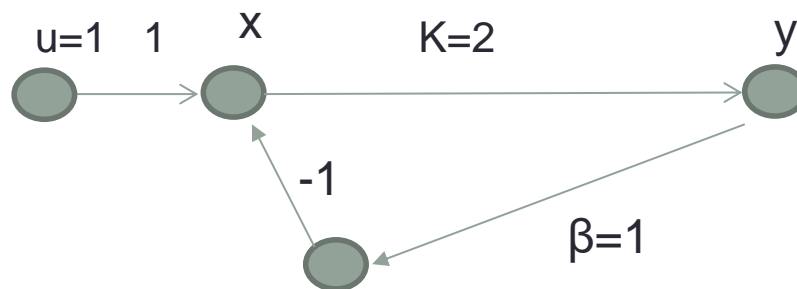
# Aeg ja tagasiside (stabiilsus ajas)

- Dünaamika, inertsiga (mehaaniline, elektriline, aga ka majanduslik...poliitiline) kaasnevad tagasisidega ebameeldivused, eelkõige mittestabiilsus.
- Näide –  $K=2$  ,  $\beta=1$  , ülekanne on  $2/(1+2)=2/3$  , juhul kui kõik toimuks hetkega
- Oletame, et aeg on diskreetne (tänapäeva süsteemides valdavalt see on) ja väljundisse jõuab signaal üks takt hiljem !

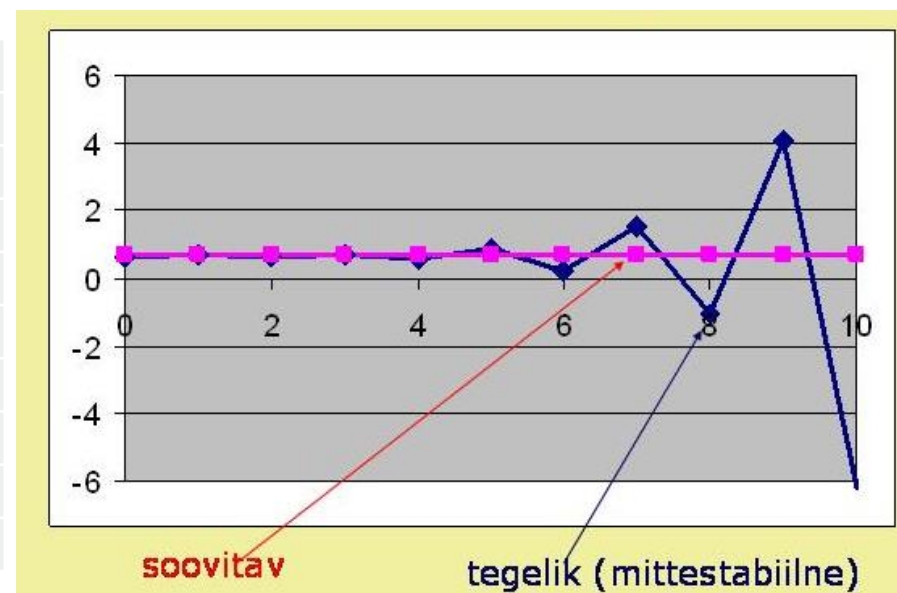
- Vaatluse hetkel  
väljund= $y=0.66$ , viga 1%  
Sisendis ette antud suurus 1



# Aeg ja tagasiside (stabiilsus ajas)



t	u	y	x
0	1	0,66	$1 - 0,66 = 0,34$
1	1	$2 \times 0,34 = 0,68$	$1 - 0,68 = 0,32$
2	1	$2 \times 0,32 = 0,64$	$1 - 0,64 = 0,36$
3	1	$2 \times 0,36 = 0,72$	$1 - 0,72 = 0,28$
4	1	$2 \times 0,28 = 0,56$	$1 - 0,56 = 0,44$
5	1	$2 \times 0,44 = 0,88$	$1 - 0,88 = 0,12$
6	1	$2 \times 0,12 = 0,24$	$1 - 0,24 = 0,76$
7	1	$2 \times 0,76 = 1,52$	$1 - 1,52 = -0,52$
8	1	$2 \times -0,52 = -1,04$	$1 - (-1,04) = 2,04$



# Positiivne tagasiside (päriside)

- Signaaligeneraatorid
- Kogu digitaaltehnik (elektrilised suurused on analoog)
- Lõhkeained, plahvatused, tulekahjud
- (sotsiaal)meedia ?, kuulujutud ,reklaamid, ärevushäired
- Püramiidskeemid
- **Viirused (Covid 19) !**
- Sõltuvus – nii mingist ainest, tegevusest kui ka isikust



# Positiivne tagasiside (päriside)

- Väljundi suurenemine mõjub sisendit suurendavalt.

- $K\beta < 0$  !

- 

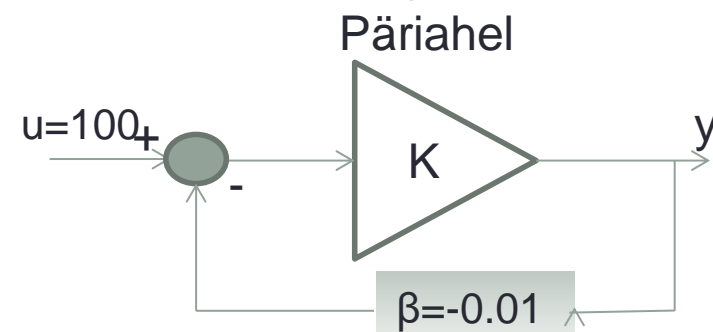
$$y = u * \frac{K}{1+K\beta} \rightarrow \frac{y}{u} = \frac{K}{1+K\beta}$$

Olgu meil

- $u = 100$  ( mV, ainepunkt, majandusnäitaja, rad/s ...mis iganes)

- $\beta = -0.01$

$K$  – võimekus, võimendustegur:



- $\beta = -0.01$   $K=10$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{10}{1-10*0.01} = 100 * \frac{10}{0.9} = 1111.1$
- $\beta = -0.05$   $K=10$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{10}{1-10*0.05} = 100 * \frac{10}{0.5} = 2000$

Jah, see toimib kui  $\beta$  on väike, aga suureneb tuntavalt  $K$  mõju !

Suuga teeme suure linna..... aga edasi....palju hullem, kui  $K$  läheb ka suureks ja jõudu on palju !

# Positiivne tagasiside (päriside)

- Väljundi suurenemine mõjub sisendit suurendavalt.
- $K\beta < 0$  ! , eriti hull kui  $1 + K\beta = 0$

Olgu meil

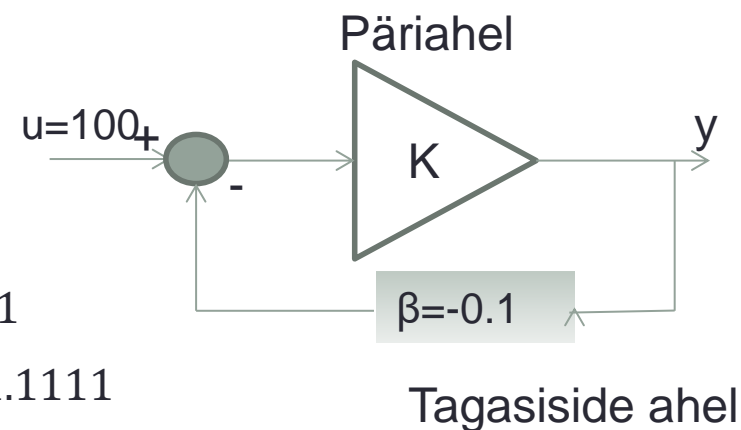
- $u = 100$  ( mV, ainepunkt, majandusnäitaja, rad/s ...mis iganes)
- $\beta = -0.1$

$K$  – võimekus, võimendustegur:

- $K=10$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{10}{1-10*0.1} = 100 * \frac{10}{0} = \infty$
- $K=100$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{100}{1-100*0.1} = -100 * 1111,111..$
- $K=1000$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{1000}{1-1000*0.1} = -100 * 11111.111$
- $K=10000$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{10000}{1-10000*0.1} = -100 * 111111.1111$

- Sisend on 100 mV, väljund on 11 kV ???
- $K$  mõju suureneb (mõnikord kasutatakse seda ära )

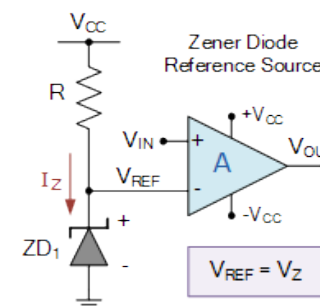
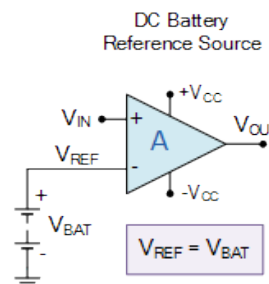
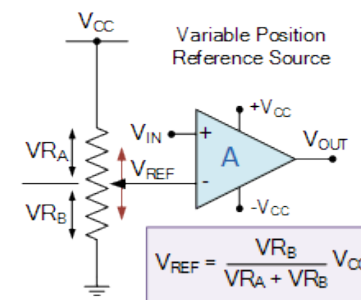
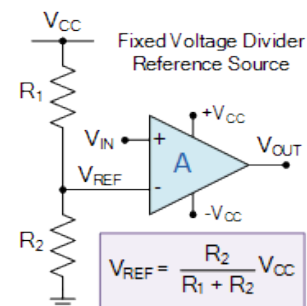
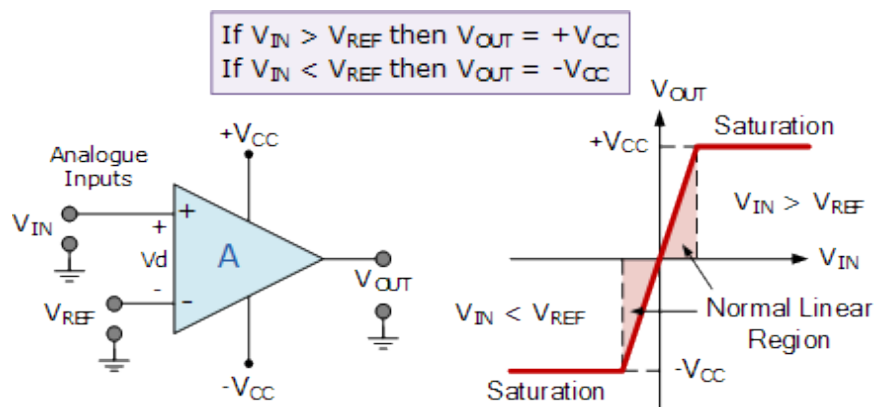
$$y = u * \frac{K}{1+K\beta} \rightarrow \frac{y}{u} = \frac{K}{1+K\beta}$$





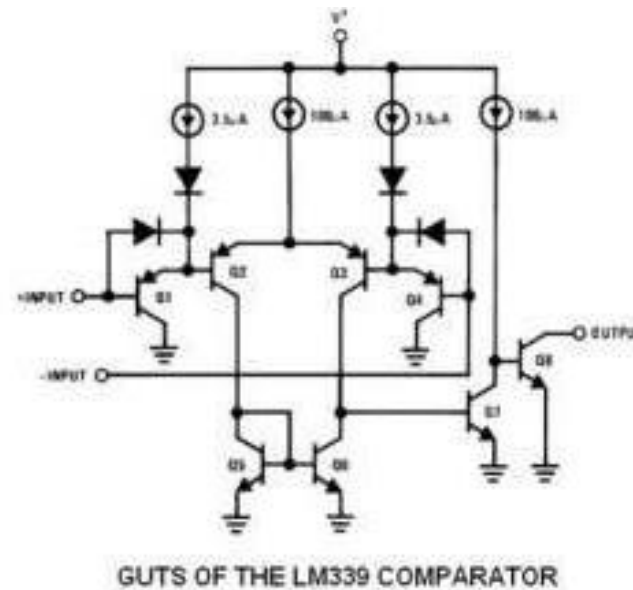
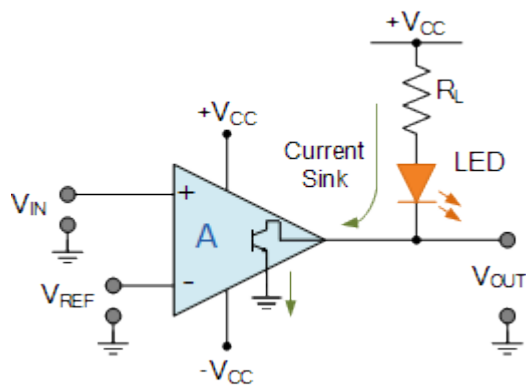
# Komparaator

- Võrdluselement, suure võimendusega diferentsiaalvõimendi, tagasisidestamata operatsioonvõimendi
- Kui sisendpinge on suurem kui  $V_{REF}$ , on väljund + toiteallika lähedal
- Kui sisendpinge on väiksem kui  $V_{REF}$ , on väljund – toiteallika lähedal
- Lihtsaim, 1 bitine A/D muundur.



# Komparaator

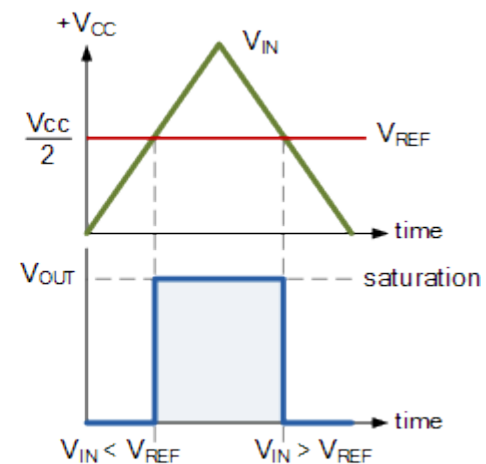
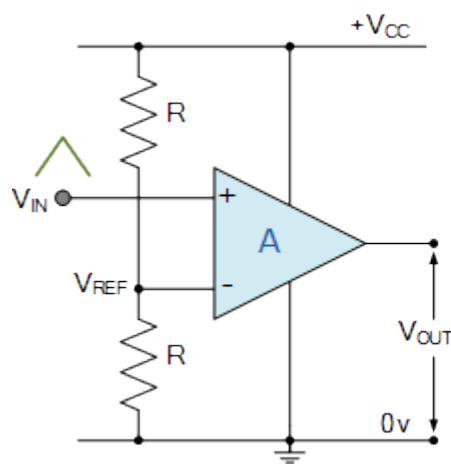
- Toodetakse ka spetsiaallülitusi (näit LM339)
- Suurim erinevus üldotstarbelisest OV-st väljund on avatud kollektoriga (vajab välist koormustakistit)
- Eelis – väljundeid saab ühendada paralleelselt.



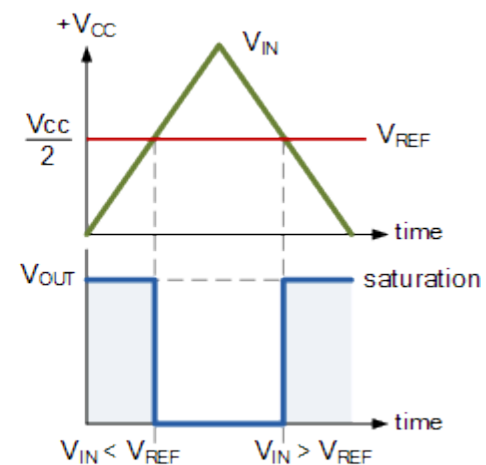
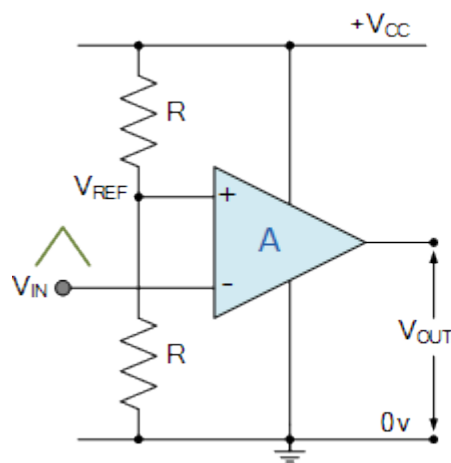
# Komparaator

- Praktilisi näiteid

- Mitteinverteeriv

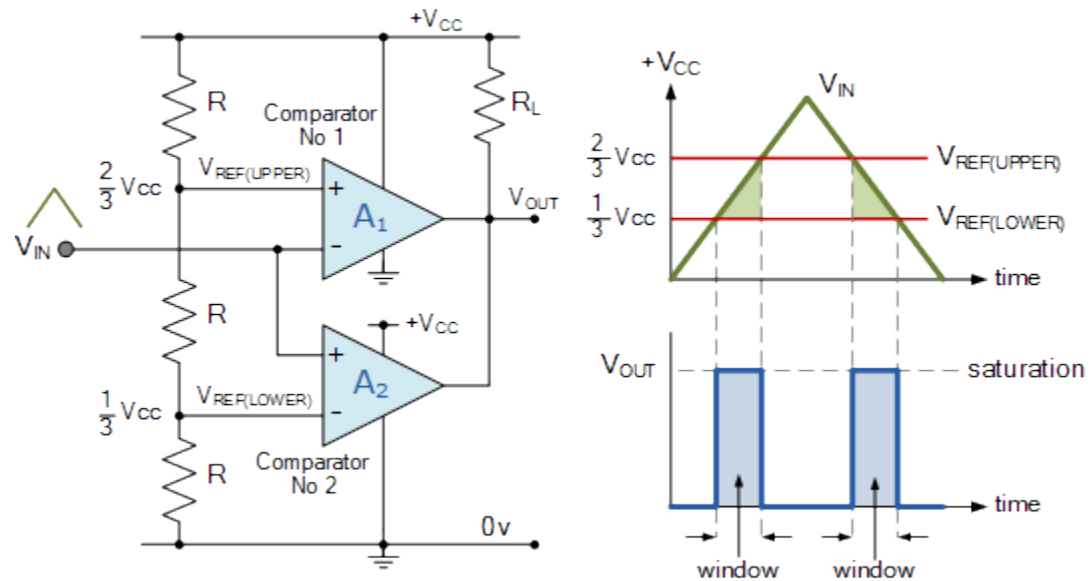


- Inverteeriv



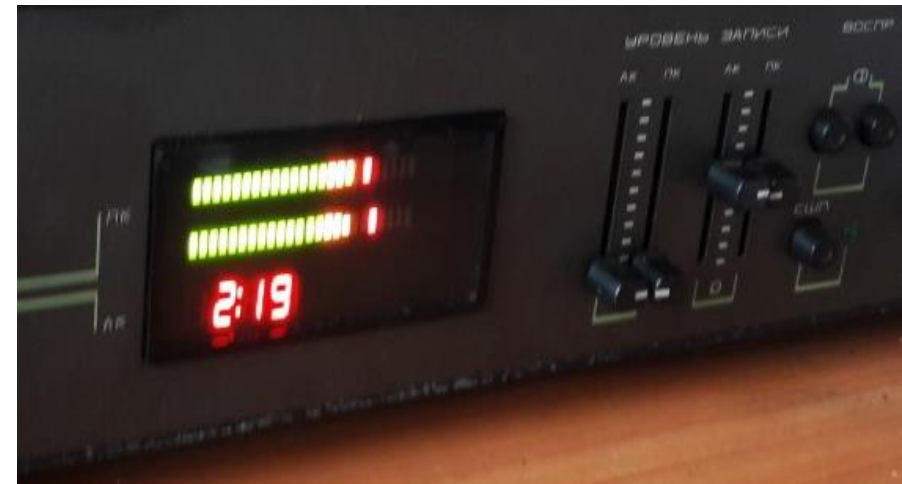
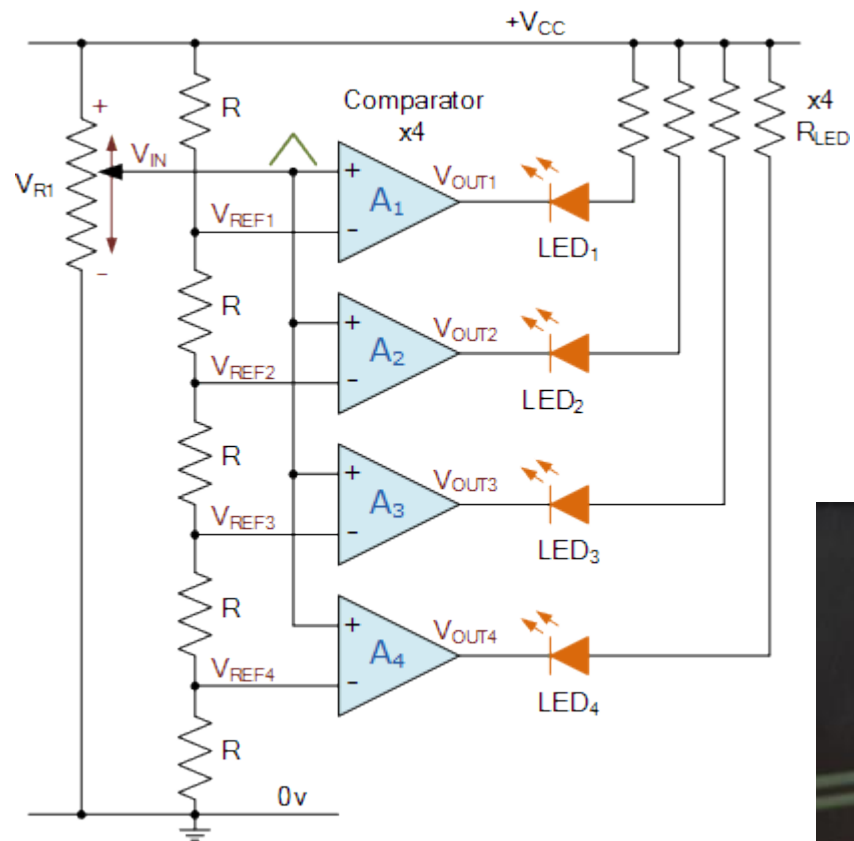
# Komparaator

- Aknaga (skeem töötab vaid siis kui komparaatori väljund on „avatud kollektoriga“)



# Komparaatori kasutusnäide

- Ribaindikaator (kahebitine AD muundi)



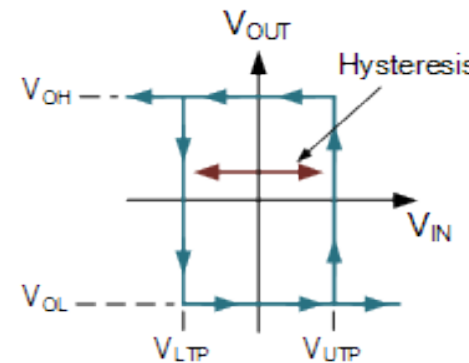
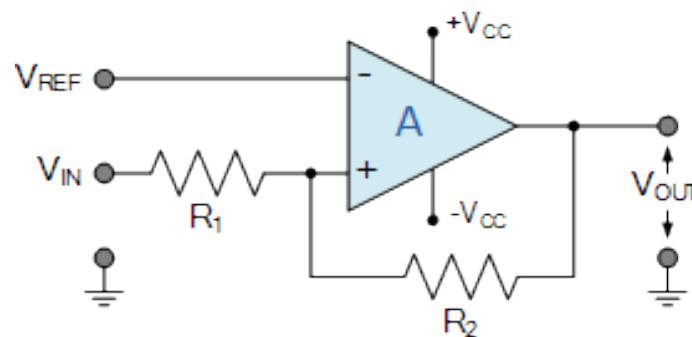
# Komparaator hüstereesiga

- Hüstereesita komparaatori põhimure – väljund ebastabiilne üleminekuläve juures.
- Hüstereesi saab tekitada **positiivse** tagasisidega, see kiirendab ka oleku üleminekut .
- Teine nimetus - Schmitti triger

$$V_{\text{HYSTERESIS}} = V_{\text{UTP}} - V_{\text{LTP}}$$

$$V_{\text{HYSTERESIS}} = +\beta V_{\text{CC}} - (-\beta V_{\text{CC}})$$

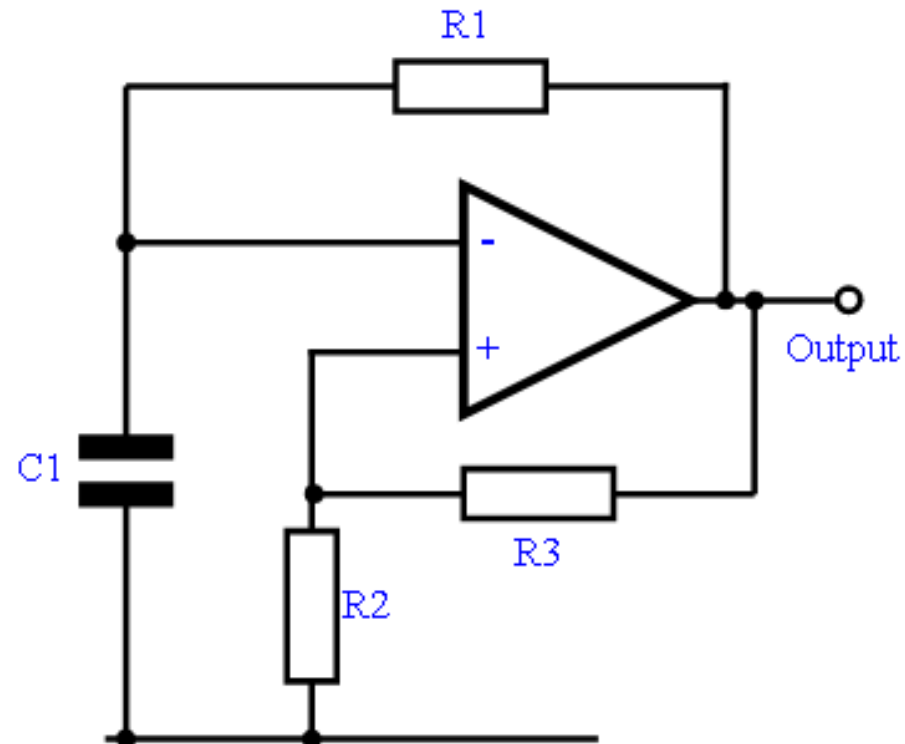
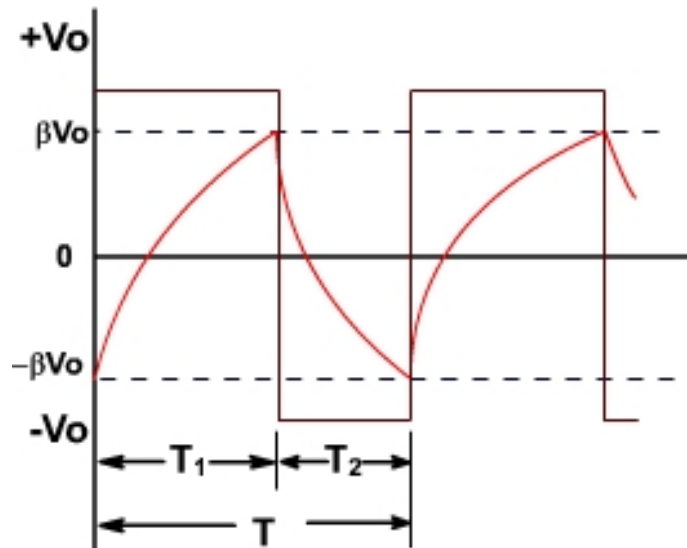
$$\therefore V_{\text{HYSTERESIS}} = 2\beta V_{\text{CC}}$$



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

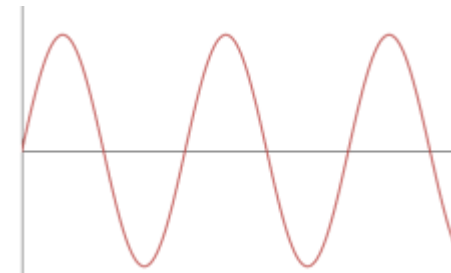
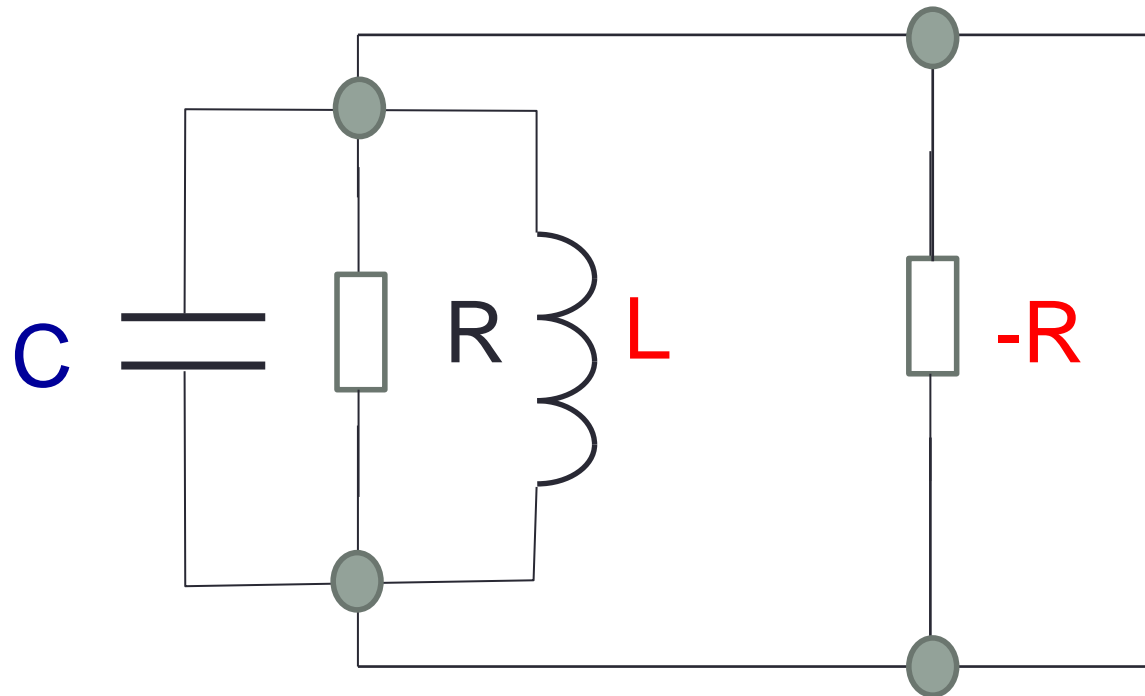
# Nelinurksignaali generaator

- Lisame Schmitti trigerile ka negatiivse tagasiside
- Väljund on piiratud toitepingega
- Signaali periood
- $T = 2R_1C_1 * \ln(1 + \frac{R_2}{R_3})$



# Siinusgeneraator (LC)

- Idee sumbuvate võnkumiste vältimiseks – ühendame võnkeringiga negatiivse takistuse
- Probleem – negatiivne takistus peab üsna täpselt kompenseerima kaod võnkeringis ja välisahelas
- Sellega stabiliseeritakse amplituudi .

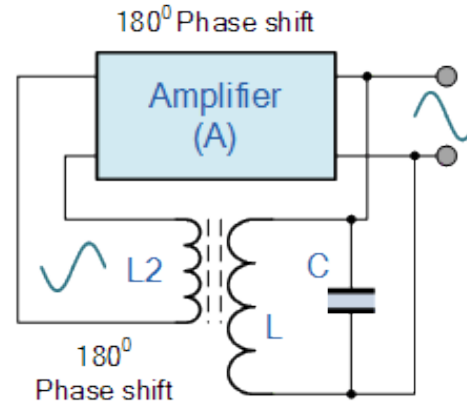
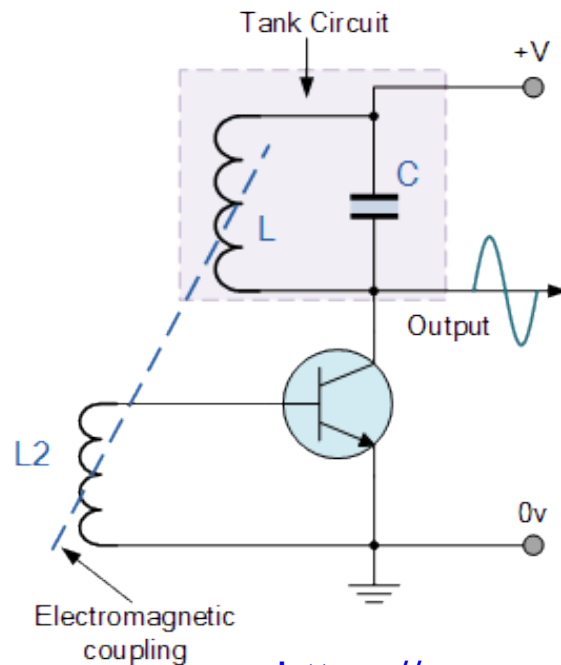
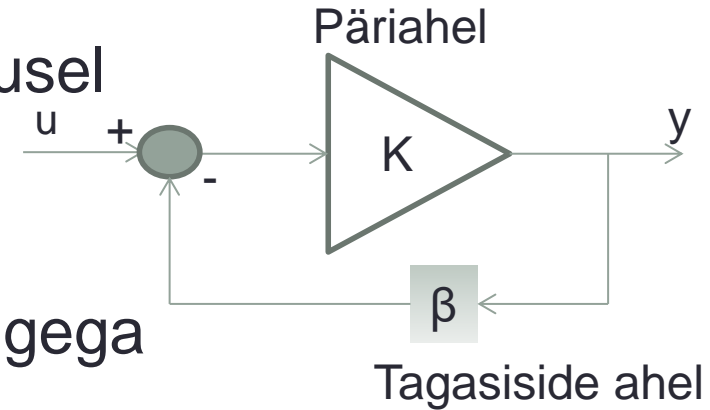


$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



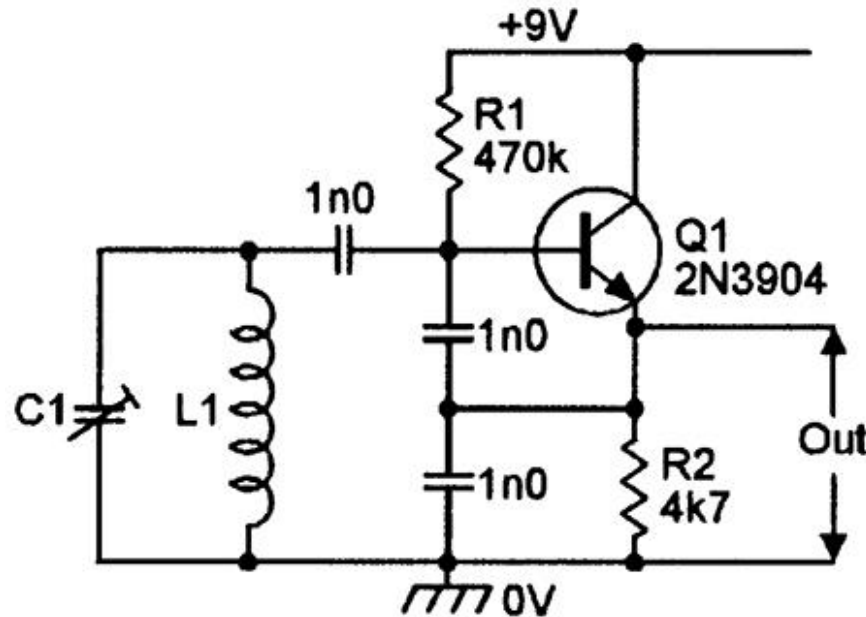
# Siinusgeneraator (LC)

- Peab olema genereeritaval sagedusel täidetud tingimus  $1-K\beta \rightarrow 0$
- Kehtib ka faasinihke kohta.
- Väljundpinge on määratud toitepingega



# Siinusgeneraator (LC)

- Transistoritega siinusgeneraatorid on kasutusel u mõnikümmend kHz...GHz .  
Valdavalt sidetehnikas
- Näide (Colpitts ostsillaator)

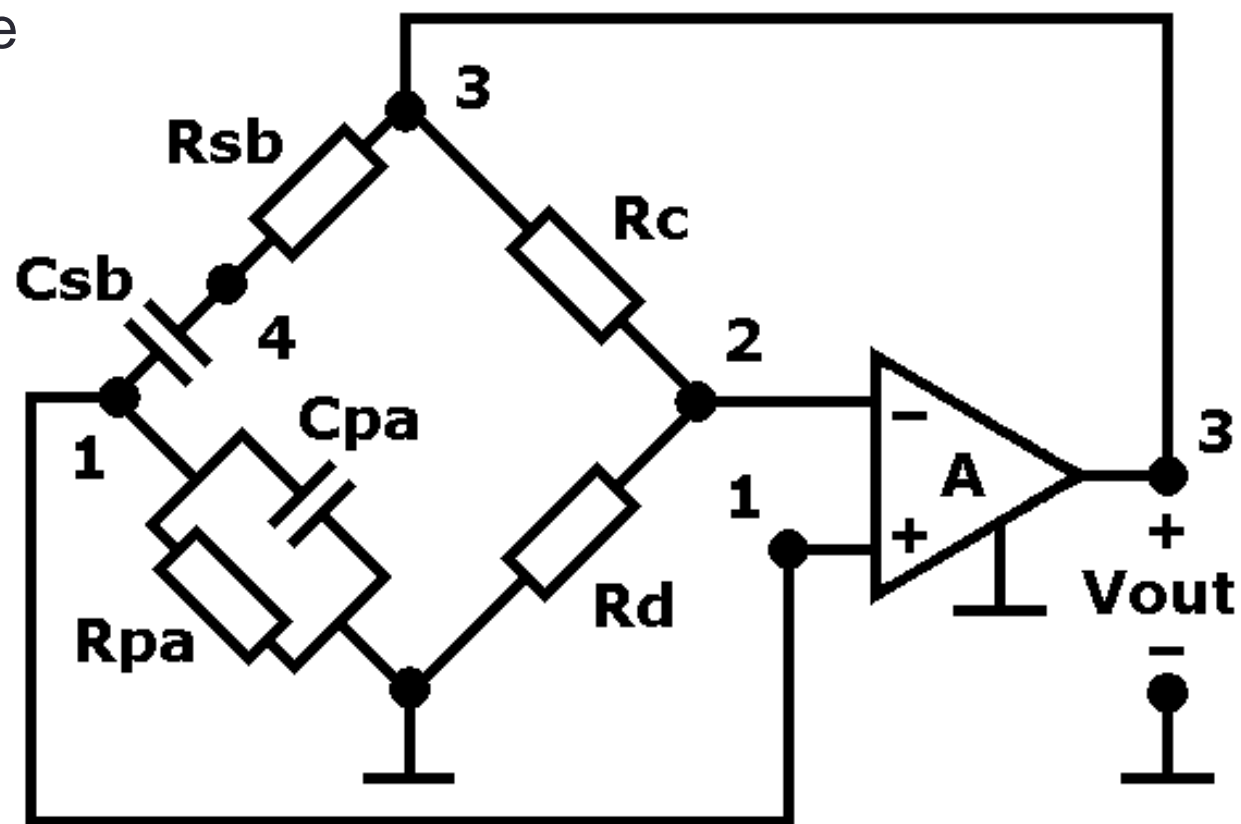


# Siinusgeneraator (RC)

- <https://www.ti.com/lit/an/sloa060/sloa060.pdf>
- Levinum on Wieneri sillaga skeem
- Vahelduvvoolusild, mille väljund (punktid 1 ja 2) on null vaid kindlal sagedusel)
- Sellel sagedusel kujuneb positiivne tagasiside
- Ehituse ja arvutuse lihtsustamiseks
- $R=R_{sb}=R_{pa}$  ja  $C=C_{sb}=C_{pa}$ ,

• Siis  $f = \frac{1}{2\pi RC}$  ja vasaku poole ülekanne on  $1/3$ , järelikult ka parema poole ülekanne  $1/3$

Ehk  $R_c=2R_d$



# Siinusgeneraator (RC)

- Siinusvõnkumiste saamiseks peab tagasisidestatud võimendi võimendustegur olema stabiilselt 3 . Väiksema väärtuse korral võnkumine katkeb, suurema korral moonutub väljundpinge kuju .
- Lahendus – tuleb teha negatiivne tagasisideahel (automaat)reguleeritavaks

