

Kaks tudengit omavahel Keemiainstituudi ukse taga:
“ Kuule, mis aineid me see semester võtame ?”

Õiged vastused esinevad vaid:

ülikoolieksamil (Brilluoin)

ülesannete kogus (Vello Kukk)

ISC veebikeskkonnas (Martin Jaanus)

EET3010 JUHTIMIS - JA ANDMESIDETEHNIKA ALUSED

Kevad 2025

Sissejuhatus signaalitöötlusesse (Ajalised ja sageduskarakteristikud)

Martin Jaanus NRG-308
martin.jaanus@ttu.ee 56 91 31 93

Õppetöö : <http://isc.ttu.ee>

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

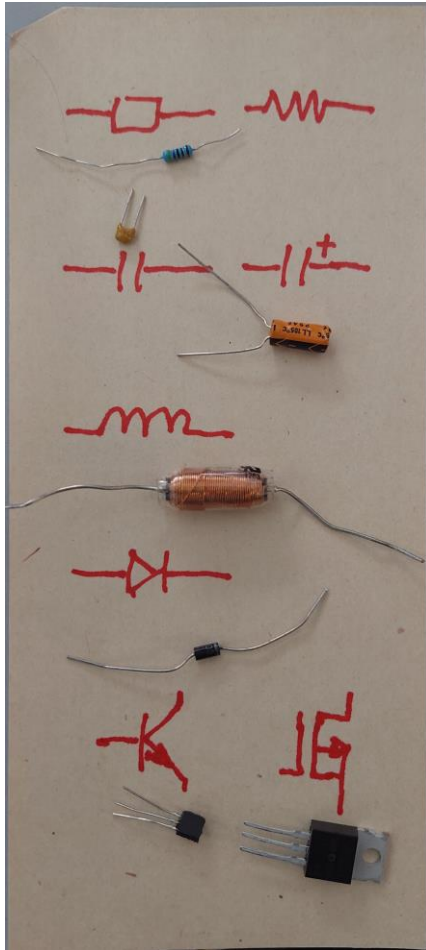
Teemad

Ajalised- ning sageduskarakteristikud

- RC siirdeprotsess (LR siirdeprotsess)
- Hüppekaja
- RLC (resonants)
- Amplituudageduskarakteristik
- Faasisageduskarakteristik
- Lihtsamad filtrid

Järgnevatel slaididel on üritatud vältida võimalikult palju matemaatikat.

Elektrooniku “Legoland”

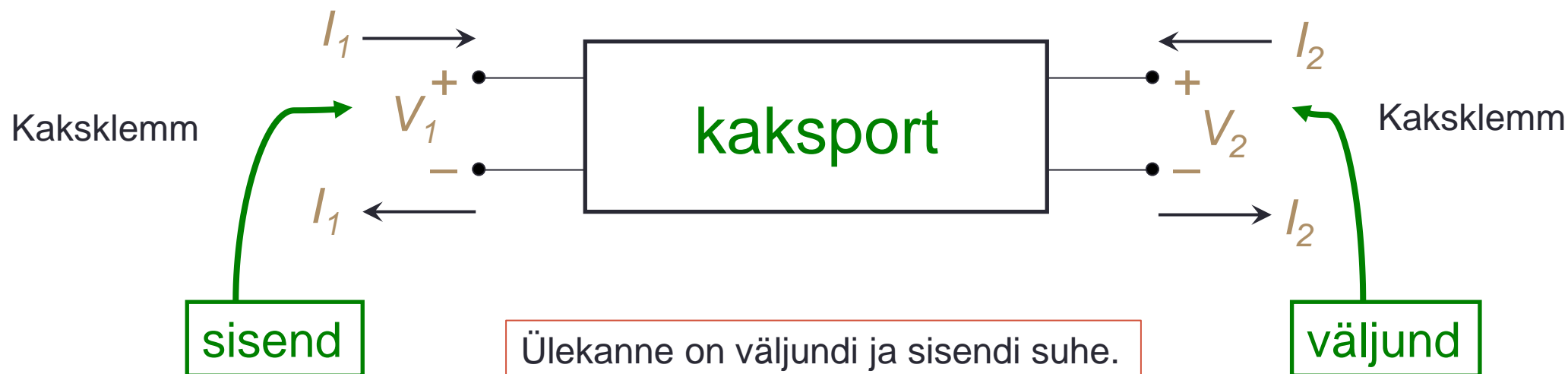


Igal elementaarkomponendil on oma roll

- Takisti (resistor) – Väga südamlük komponent ,loob suhte pinge ja voolu vahel, soojendades maailma nende korrutisega.
- Kondensaator – jonnakas komponent, ei taha unustada tema klemmidel olevat pinget .
- Induktor – töökas komponent, hoolitseb selle eest, et vool ahelas ei katkeks.
- Diod – põhimõttekindel jonnakas komponent, millel on iga pinge ning voolu jaoks oma arvamus
- Transistor – oma arvamust lihtsalt muutev komponent – takistus sõltub teiste komponentide soovist. (tema enda arvamus surutakse alla)

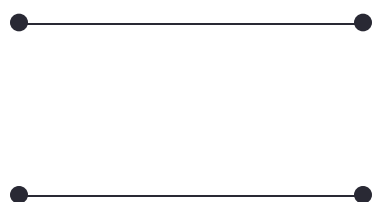
Kaksport

- Olemuselt neliklemm kuid vaadeldakse **klemmipaarina**.
- Porti sisenev vool peab võrduma sealt väljuva vooluga.
- Kasutusel on pinged, mitte potentsiaalid.
- Port käitub kui **kaksklemm**. (kaksklemmi jaoks on terve ülejäänud maailm kaksklemm)
- Sisu võib olla ülekandeahel, filter, võimendi...
- Sisendit ja väljundit seob **ülekanne**.
- Pikem loeng ja parameerid (Vello Kukk) https://isc.ttu.ee/materials/martin/SSS2004/video_4_1.html

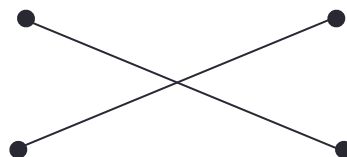


Kaksport

- Meid ei huvita pinged sisendi ja väljundi klemmide vahel, vaid ainult sisendi ja väljundi pinged!
- Energiavahetus toimub ainult sisend- ja väljundportide kaudu, sest **teiste klemmipaaride voolud on nullid.**
- Sisend- ja väljundportide klemmid võivad kokku langeda:



$$I_1 = -I_2$$
$$V_1 = V_2$$



$$I_1 = I_2$$
$$V_1 = -V_2$$



Pikendusjuhtmed

Kaksport

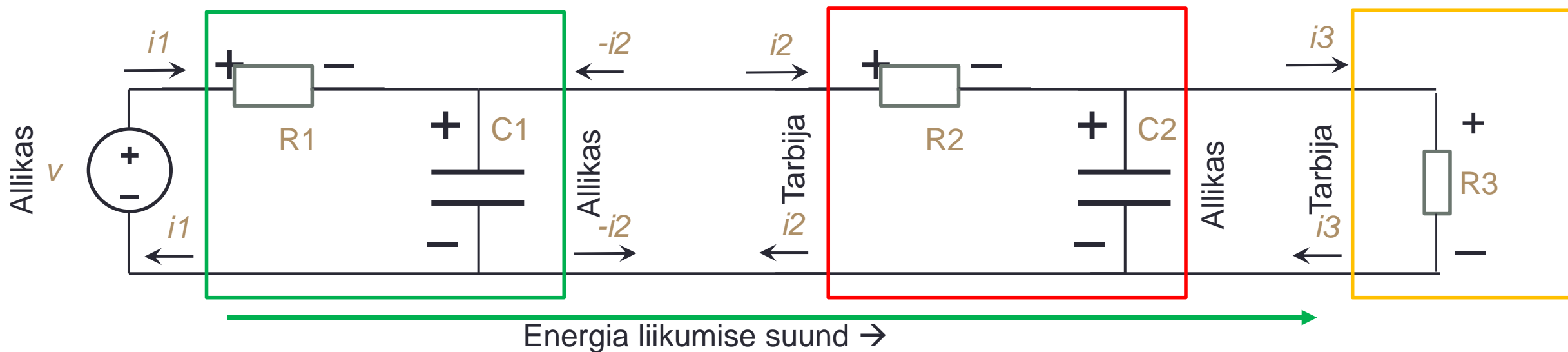
Praktiline tähtsus: väga paljud olukorrad on käsitletavad kui üksportide ühendamine kaksporti kaudu:



Nii sisendi kui väljundiga ühendatud üksportid võivad ise olla kaksportide kaudu ühendatud teistega. Selline **kaskaad**ühendus on paljudes rakendustes (kommunikatsioon, energiasüsteem jne) põhiline struktuur.



Kaksport – näide reaalelust



Kahe RC lüli **kaskaadühendus** – tavaline näide sidetehnikast ja miks mitte ka elektroenergeetikast !

Korrutuvad ülekandeparameetrid (ABCD)

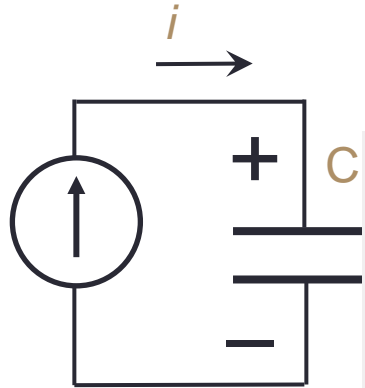
Võib vaadata kui “musta kasti”**kui on teada sisend- ja väljundparameetrid !**

Tavalised küsimused –

- Kui lülitada sisse allikas V , kui kiiresti jõuab pinge takistil R_3 maksimaalse väärtuseni ja milline see on ?
- Sisendis on harmooniline signal sagedusega f , milline on väljundpinge sellel sagedusel ?, hilistumine ?
- Kas $I_1=I_2=I_3$?
- Mis juhtub , kui ühendan seadmed omavahel kokku ?

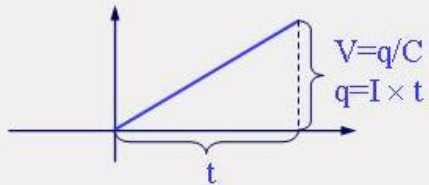
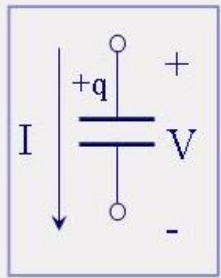
Kondensaatori laadimine konstantse vooluga

Kondensaator on energiasalvesti !

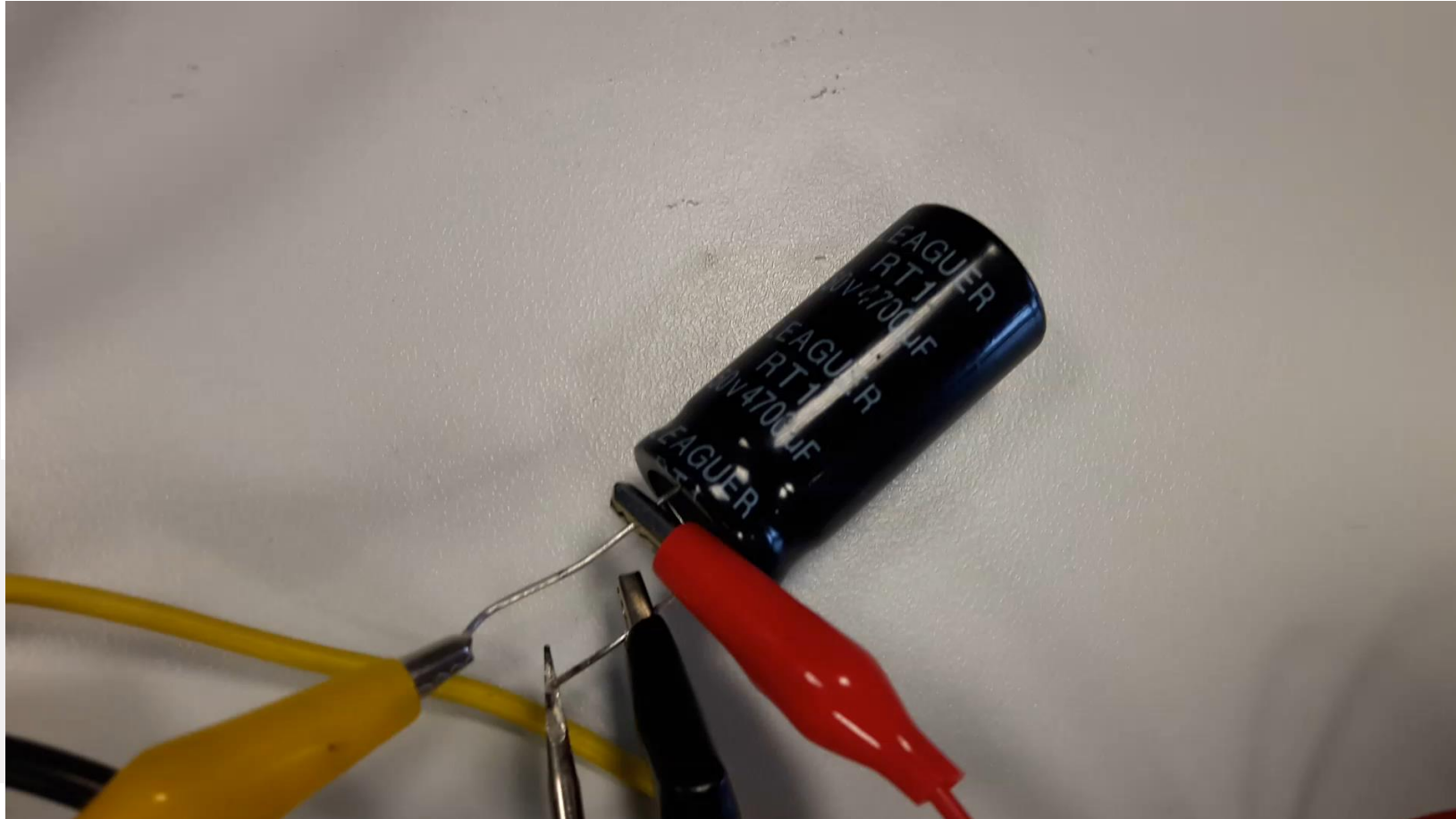


$$v(t) = v(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau$$

kui $C = \text{const!}$
 $q(t) = Cv(t)$



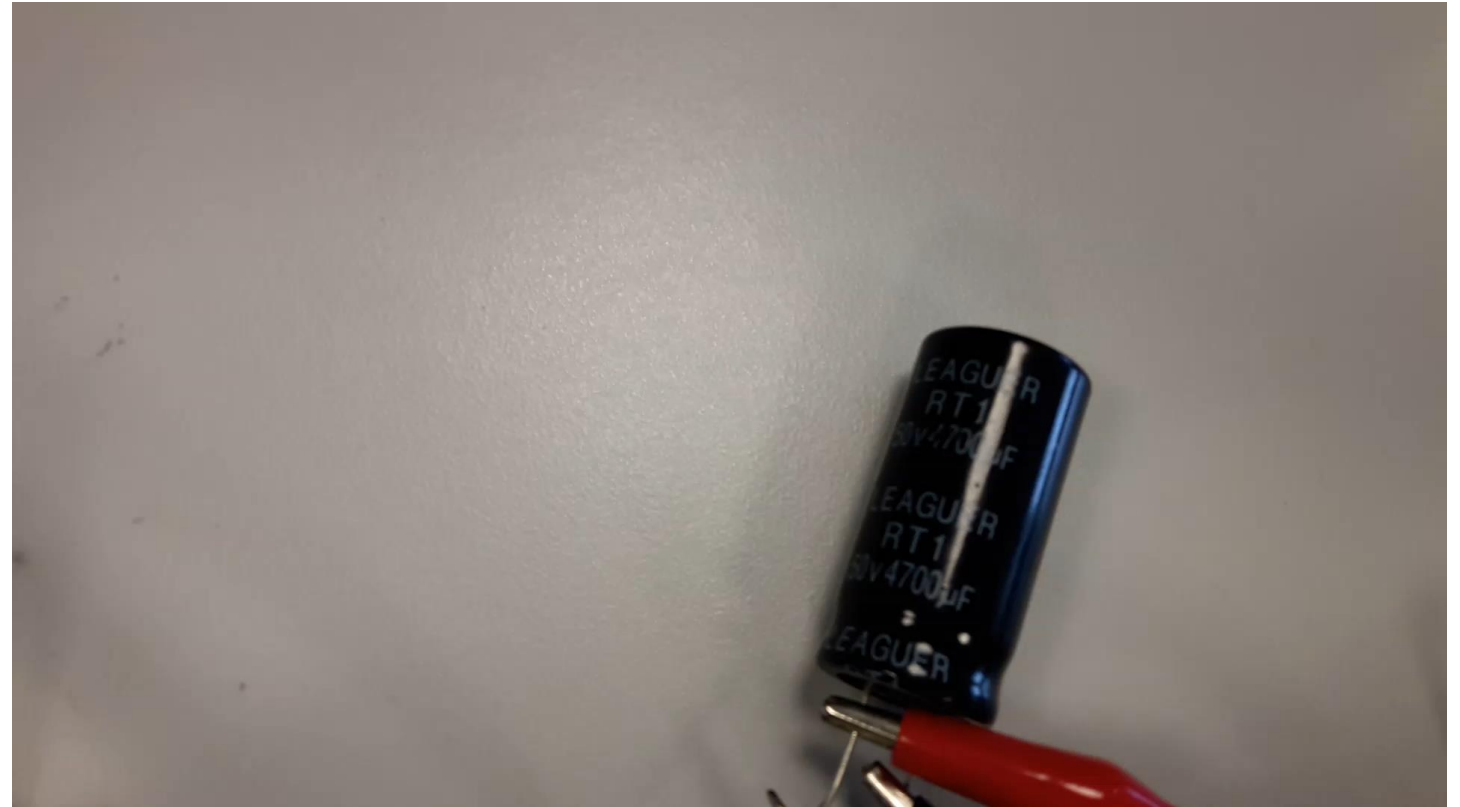
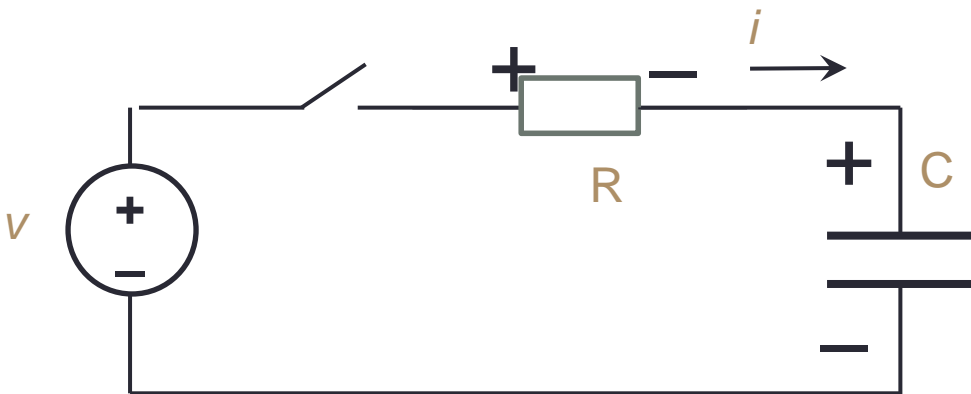
$$W = \frac{IVt}{2} = \frac{qV}{2} = \frac{CV^2}{2}$$



Laadides kondensaatorit konstantse vooluga I , kasvab selle pinge ja (ka laeng) lineaarselt.
 $4700 \mu\text{F}$ kondensaator laetakse $4,7 \text{ mA}$ vooluga – Pinge kasvab 1 V sekundis.

Kondensaatori laadimine läbi takisti

- Mitte midagi ei toimu hetkega. Eeldame, et kondensaatoril on pinge 0 ehk see on laadimata.
- Lüliti sulgemisel laetakse kondensaator allika pingeni V , aga see võtab aega.



4700 μF kondensaator laetakse 10 V pinges allikast läbi 1 k Ω takisti. Aega võtab see umbes 15....20 sekundit.

Hüppekaja (step-response)

Algtingimused: $v_C(0) = 0$ Kondensaatori pinge on 0
 $v(t) = 1(t)$ $1(t)$ Heaviside funktsioon
(ühikhüpe –allika pinge 1V)

Kirchhoffi pingesadus: $Ri(t) + v_C(t) = 1$

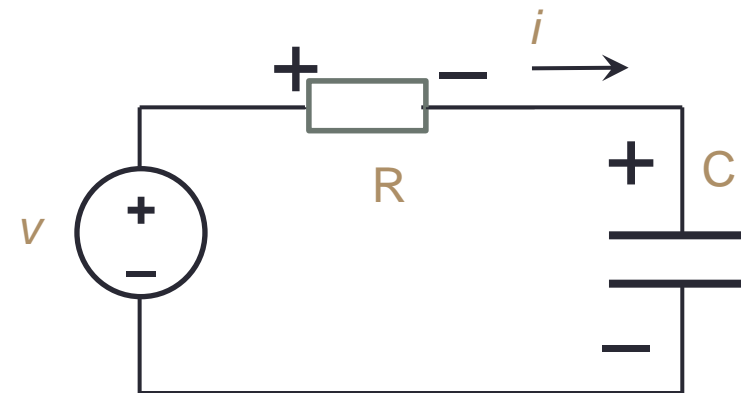
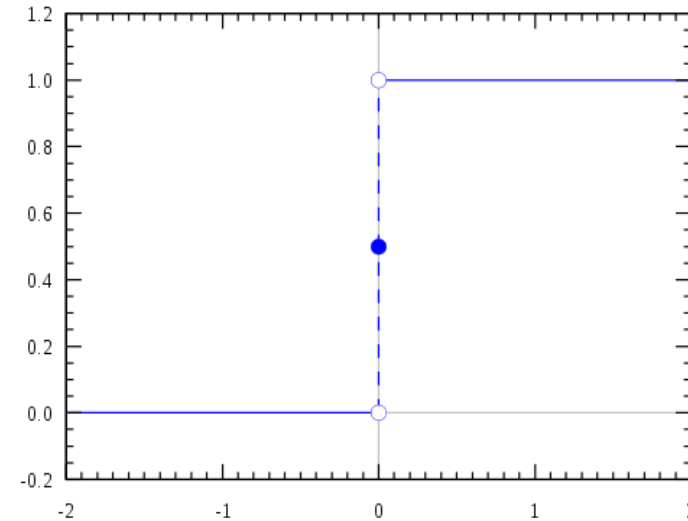
Vool: $i(t) = C \frac{d}{dt} v_C(t)$

Esimest järku lineaarne diferentsiaalvõrrand

$$RC \frac{dv_C}{dt} + v_C = 1$$

Erilahend (sundkomponent) $\tilde{v}_C(t) = 1$

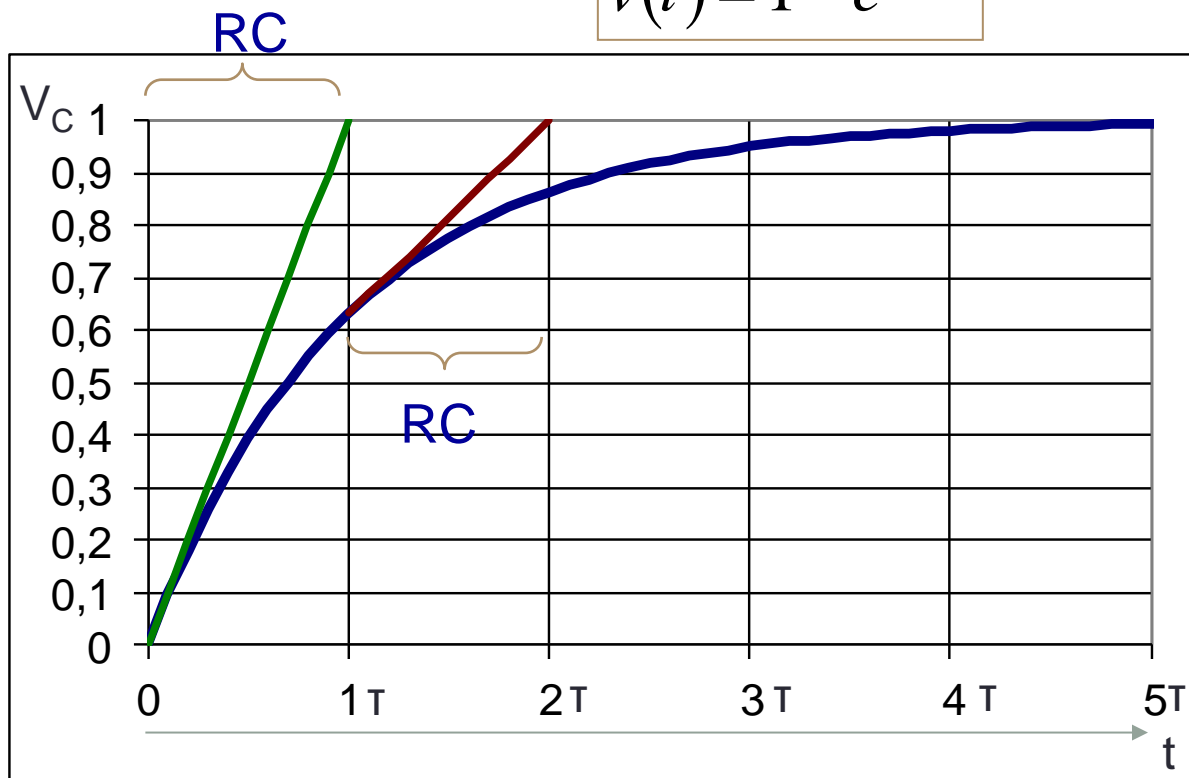
Üldlahend (vabakomponent) $\bar{v}_C(t) = Ae^{-\frac{t}{RC}}$



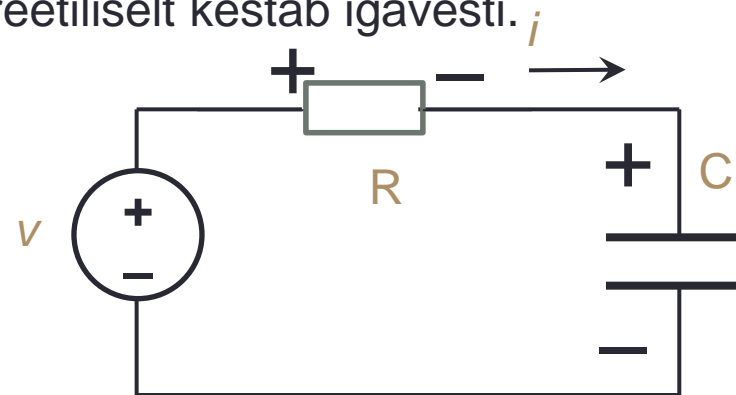
Hüppekaja (esimest järku siirdeprotsess)

$$v(t) = 1 + Ae^{-\frac{t}{RC}} \quad v(0) = 0 \longrightarrow v(0) = 1 + Ae^{-\frac{0}{RC}} = 1 + A = 0$$

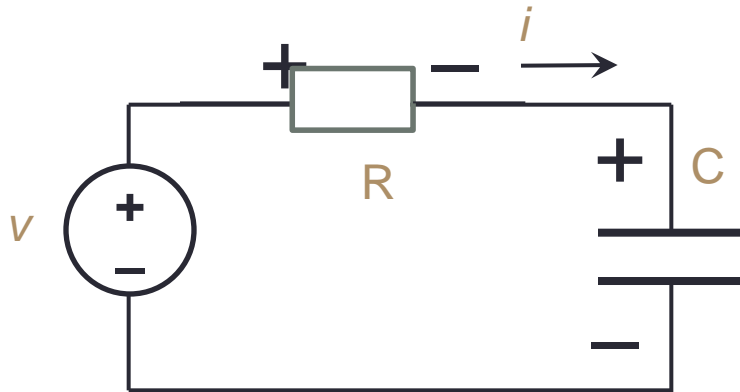
$$v(t) = 1 - e^{-\frac{t}{RC}}$$



$\tau = RC$ – ajakonstant. Aeg, mille jooksul kasvab pinge kondensaatoril ligikaudu $2/3$ allika pingeni ($0.63 * V$).
Kui $t=RC$ siis $e^{-1}=0.37$ ja $1-e^{-1}=0.63$
Järgmise ajakonstandi jooksul lisandub eelmisest 0.63
Jne....
Praktiliselt lõpeb protsess 3...5 τ möödudes.
Teoreetiliselt kestab igavesti.



Hüppekaja (esimest järku)



Algolek: $i(0)=1/R$

Lõppolek: $i(\infty)=0$

Algolek: $v_C(0)=0$

Lõppolek: $v_C(\infty)=1$

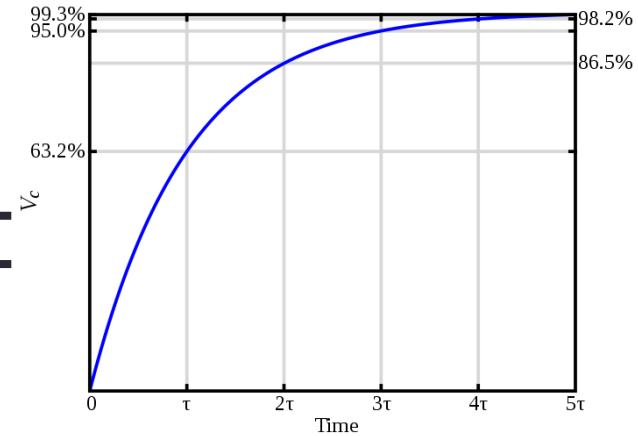
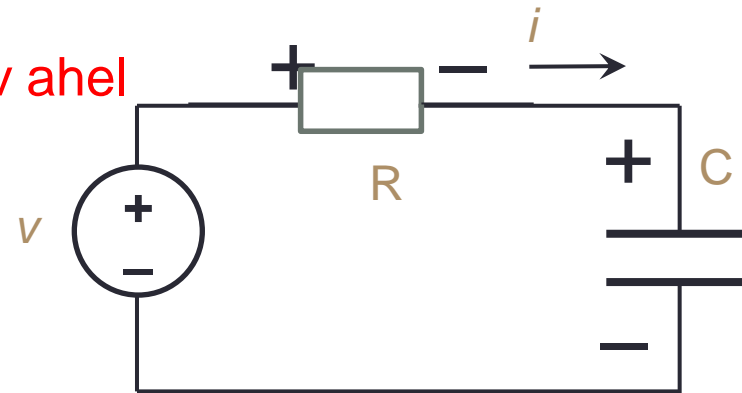
Algolek: $v_R(0)=1$

Lõppolek: $v_R(\infty)=0$

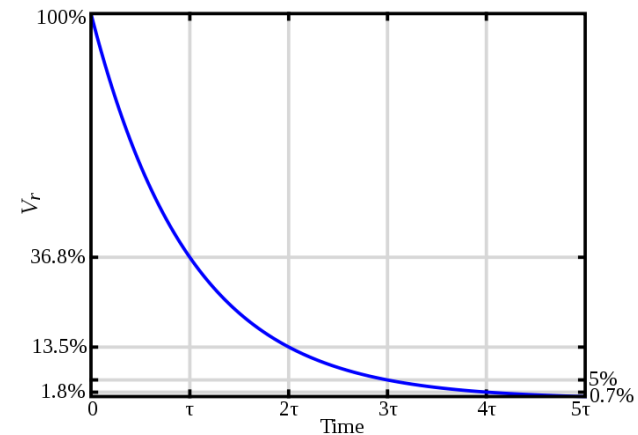
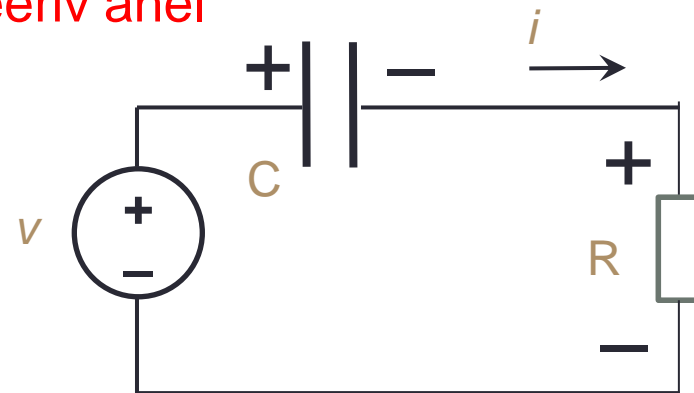
Neid olekuid ühendab eksponent, mille ajakonstant on RC .

Integreeriv ja diferentseeriv ahel RC

Integreeriv ahel



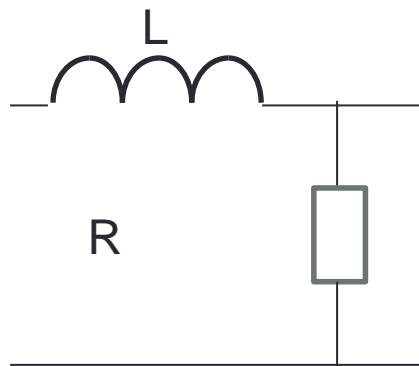
Diferentseeriv ahel



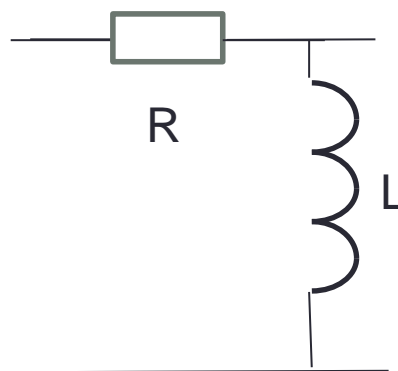
Lihtsaimad RC ahelate realisatsioonid eeldusel et sisend käitub kui pingesallikas, funktsiooniks on ühikhüpe ning väljund on koormamata.

Integreeriv ja diferentseeriv ahel LR

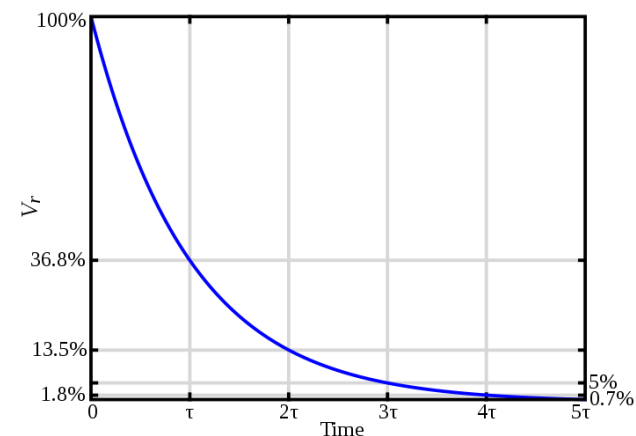
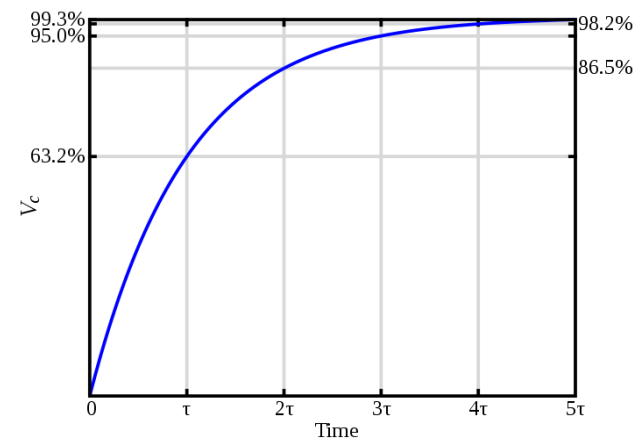
Integreeriv ahel



Diferentseeriv ahel



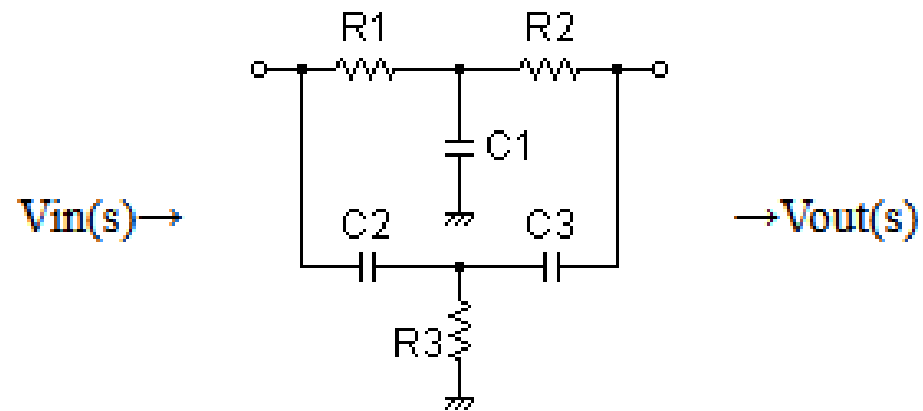
Ajakonstant $\tau = LG = L/R$



Lihtsaimad LR ahelate realisatsioonid eeldusel, et sisend käitub kui pingesallikas, funktsiooniks on ühikhüpe ning väljund on koormamata.

Kõrgemat järku siirdeprotsessid

- On kombinatsioon eelmistest. Keerukus kasvab hüppeliselt.
- Võivad tekkida võnkumised, ebastabiilsus.

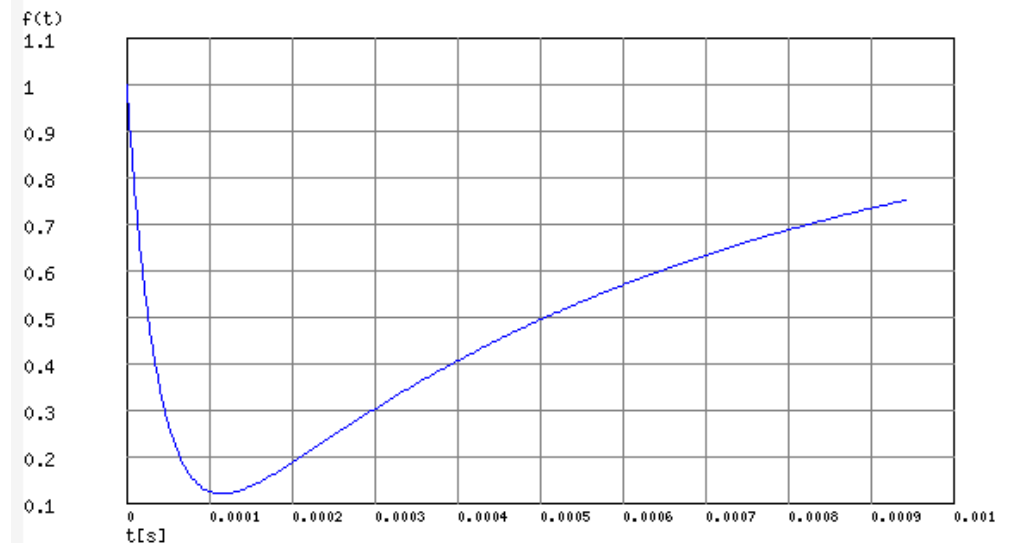


(Sample) Transfer Function:

$$G(s) = \frac{s^3 + 9090.90909091s^2 + 41322314.0496s + 368949232586}{s^3 + 36038.961039s^2 + 284828807.556s + 368949232586}$$

Transient analysis

StepResponse



Näitesimulatsioonid:

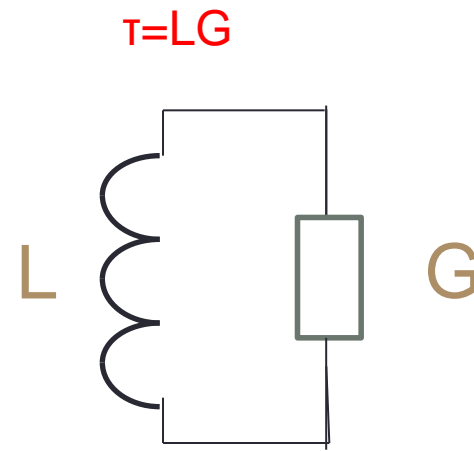
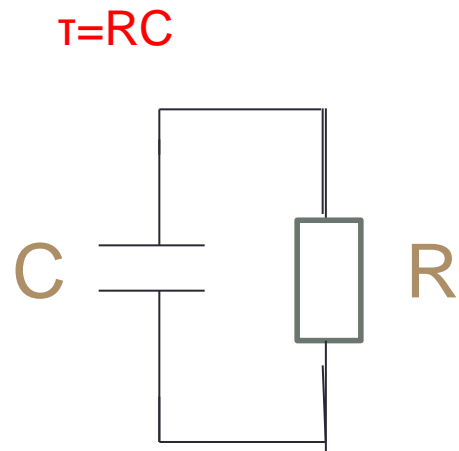
<http://sim.okawa-denshi.jp/en/>

Hea veebileht, abiks filtrite disainimisel

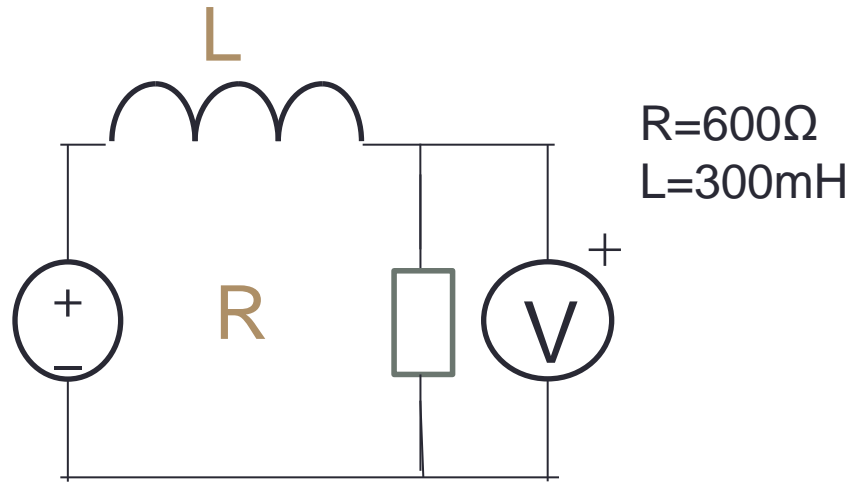
Kuidas leida ajakonstanti esimest järku sidus

Selleks et leida ajakonstanti esimest järku sidus tuleb:

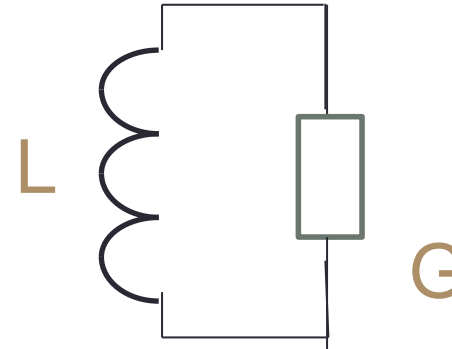
1. Asendada allikad ja mõõteriistad nende sisetakistustega.
2. Lihtsustada võimalikult palju skeemi.
3. Arvutada ajakonstant



Kuidas leida ajakonstanti esimest järku sidus, näide 1



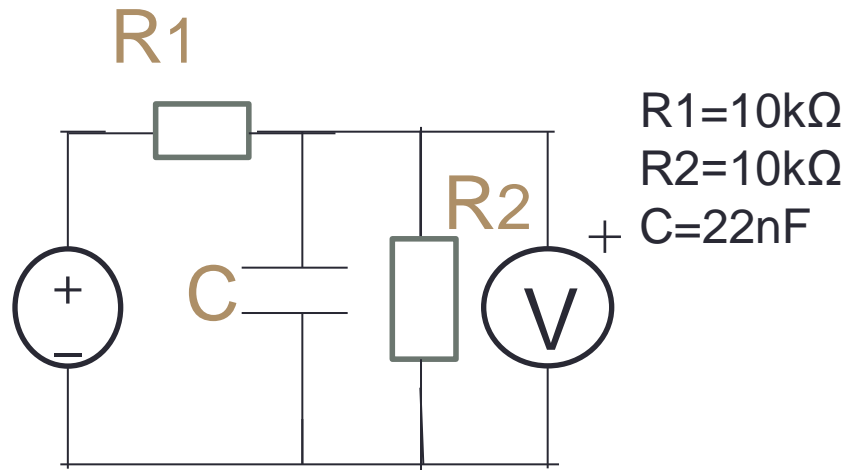
1. Asendame allika ja mõõteri sisetakistustega. Voltmeeter-tühis, pingeallikas – lühis.



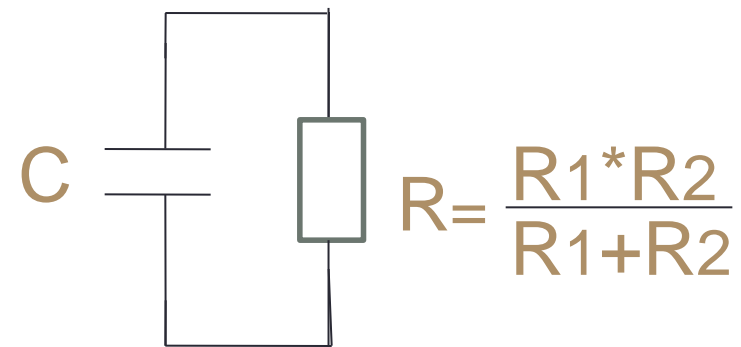
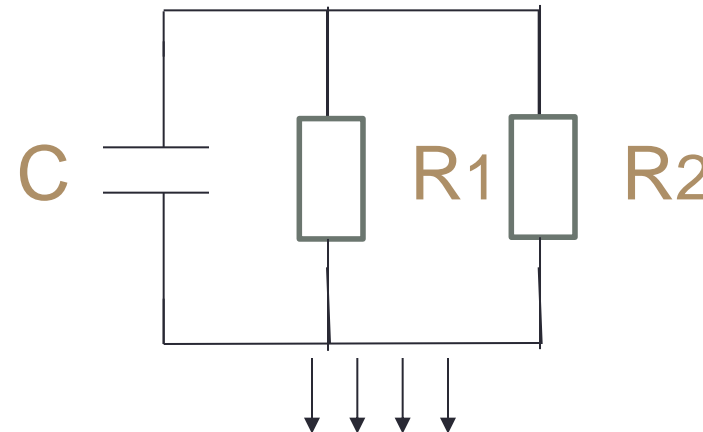
2. Arvutame $\tau=LG$

$$\tau=LG=L/R=300\text{mH}/600\Omega=0.5\text{ms}$$

Kuidas leida ajakonstanti esimest järku sidus, näide 2



1. Asendame allika ja mõõteriistade sisetakistustega. Voltmeeter-tühis, pingevallikas – lühis.



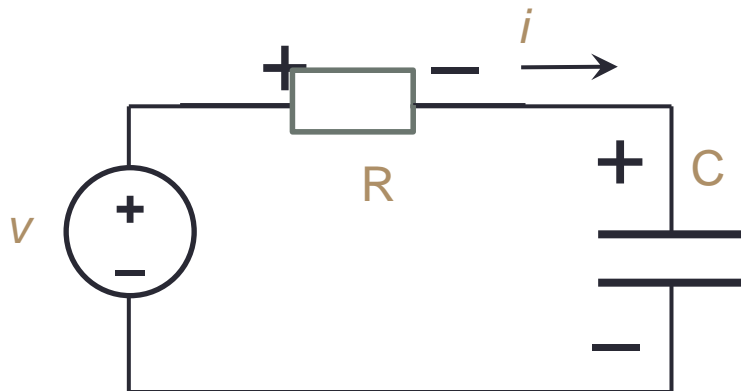
2. Arvutame $\tau = RC$

$$\tau = RC = C * R1 * R2 / (R1 + R2) = 22nF * 5k\Omega = 110\mu s$$

RC –harmooniline signaal

- Ülekandefunktsioon - leiame kondensaatori ja sisendpinge suhte . Tegemist on pingejaguriga, kus üks takistus on mahtuvuslik ja sõltub sagedusest.

$$I = \frac{V}{R + \frac{1}{j\omega C}} \quad V_c = V \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \dots = V \frac{1}{j\omega RC + 1}$$



Ülekanne tuleb
kompleksarv ning
sõltub sagedusest

$$\frac{V_c}{V} = \frac{1}{j\omega RC + 1}$$

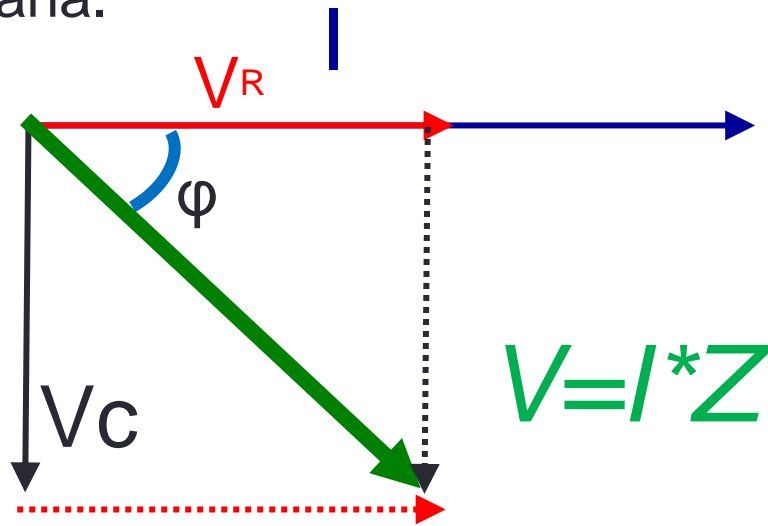
RC- ajakonstant !

$\omega = 2\pi f$ nurksagedus (ringsagedus)

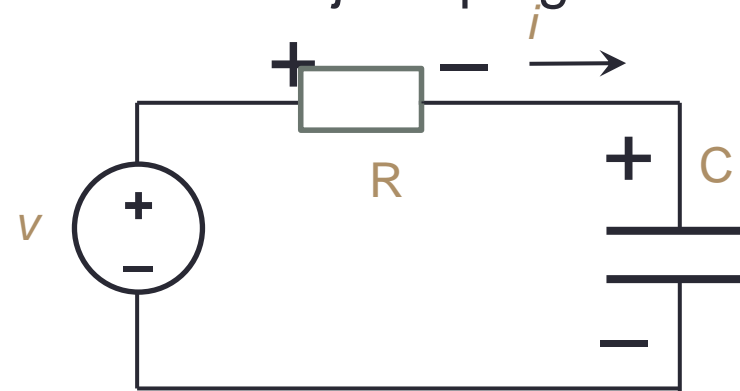
j – imaginaarühik $j^2 = -1$ (matemaatikas i)

RC –harmooniline signaal, faasor

- Ülekandel on kaks komponenti - **amplituud** ja **faas**.
- Jadaühendus – vool on komponentides sama.
- Takisti pinge on vooluga faasis, kondensaatoril jääb pinge 90 kraadi maha.



$$V = I * Z$$



Ülekanne tuleb
kompleksarv ning
sõltub sagedusest

$$\frac{V_C}{V} = \frac{1}{j\omega RC + 1}$$

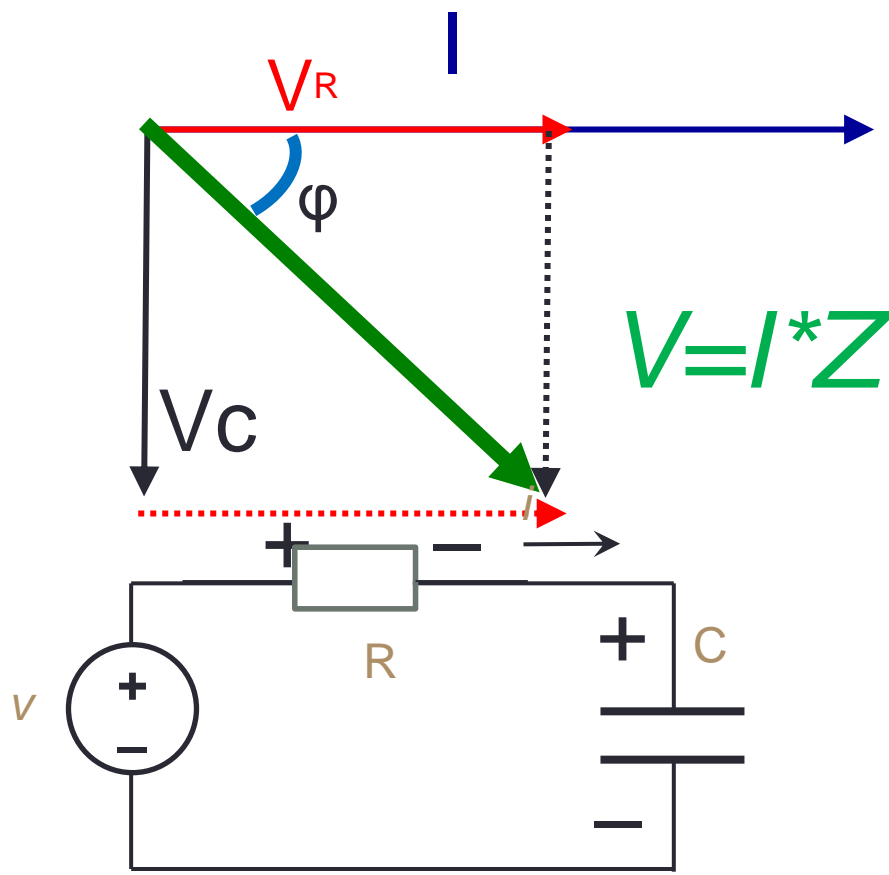
RC- ajakonstant !

$\omega = 2\pi f$ nurksagedus (ringsagedus)

j – imaginaarühik $j^2 = -1$ (matemaatikas i)

RC –harmooniline signaal, faasor

- Ülekandel on kaks komponenti - **amplituud** ja **faas**.
- **Amplituud**



$$V = \sqrt{(V_R)^2 + (V_C)^2} = \sqrt{(IR)^2 + (IX_C)^2}$$

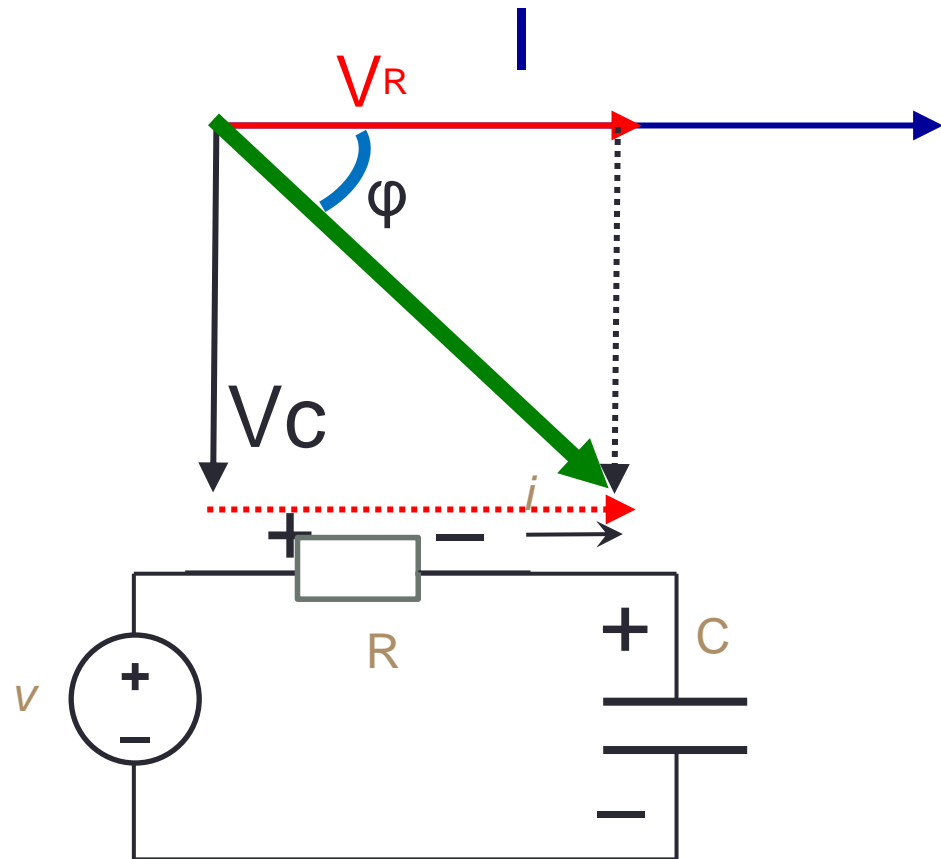
$$V = I \sqrt{R^2 + X_C^2} \quad X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} = \frac{V}{Z} \quad Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

$$\frac{V_C}{V} = \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$$

RC –harmooniline signaal, faasor

- Ülekandel on kaks komponenti - **amplituud** ja **faas**.
- **Faas**

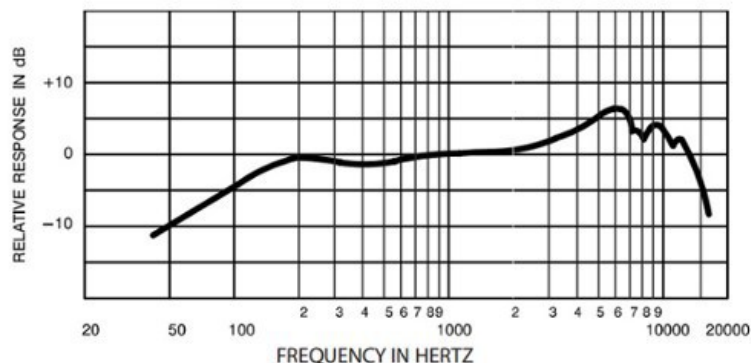


$$\tan\varphi = \frac{V_C}{V_R} = \frac{IX_C}{IR} = \frac{X_C}{R}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{X_C}{R} \quad X_C = \frac{1}{\omega C}$$

Sageduskarakteristikud

- Näitavad ahela ülekande sagedussõltuvust
- **Amplituudsageduskarakteristik**
- **Faasisageduskarakteristik** (sageli sellest ei räägita)
- Ülekandefunktsiooni graafiline (ja logaritmiline) esitus
- Logaritmiline lihtsustab tunduvalt murdratsionaalse funktsiooni esitamist.
- Võimalik on murdratsionaalsele avaldisele disainida vastav elektriskeem (filtri disainimine).



Ülekandefunktsiooni üldkuju:

$$s \leftarrow j\omega$$

$$T(s) = \frac{a_0(s - z_1)(s - z_2)\dots(s - z_m)}{b_0(s - p_1)(s - p_2)\dots(s - p_n)}$$

Nullid

Nullkohad (ka kompleksed)
annavad
murdesageduse
(sulgudes olev avaldis=0)

Poolused

Sageduskarakteristikud

Ülekanne on igal sagedusel kompleksarv

$$T(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$

kus $A(\omega)$ on **amplituudsageduskarakteristik**
 $\varphi(\omega)$ on **faasisageduskarakteristik**

Logaritmides saame

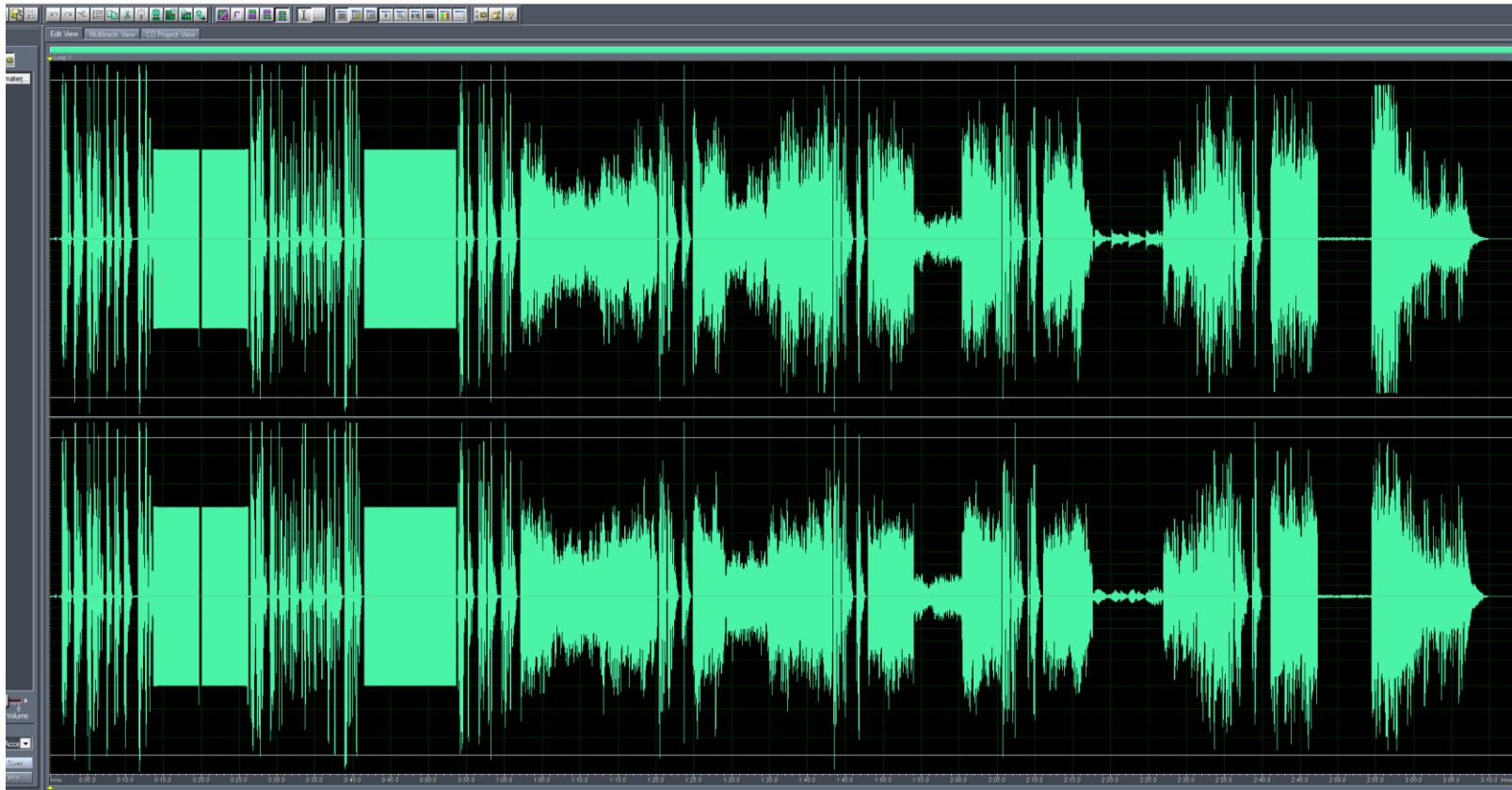
$$\log T(j\omega) = \log A(\omega) + j\varphi(\omega)$$

Kust on näha, et liituvad **amplituudi logaritmid** ja **faasid**

Kui need suurused kujutada sõltuvatena sageduse logaritmist, saame **logaritmilised sageduskarakteristikud**.

DEMO

Sagedus ja amplituud – logaritmiline skaala



Detsibell (dB)

Kasutatakse kui suuruste diapason on väga suur

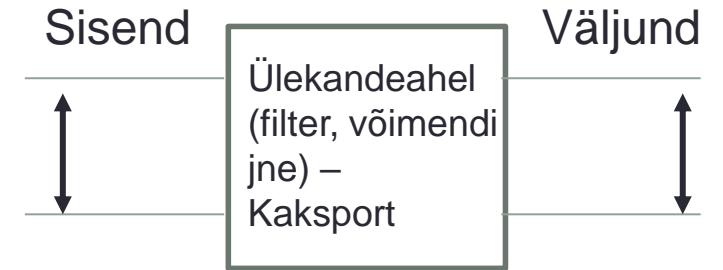
- Sidetehnika (mobiiltelefon – saatja 2 W , vastuvõtja 0.02 μW)
- Kuulmine , signaalitöötlus

Kasutatakse ühikut **bell** (B) , mis on võimsuste suhte kümnendlogaritm. (Alexander Graham Bell) . Praktiliseks kasutamiseks suur.

Kasutatakse **detsibelli** $X(\text{dB}) = 10 \log(X/X_0)$

Korrutamise-jagamise muutub liitmiseks-lahutamiseks !

Väga mugav kasutada signaalitöötles.



NB ! Pinge ja voolu korral !

Kuna võimsus on võrdeline pinge (ja ka voolu) ruuduga siis.

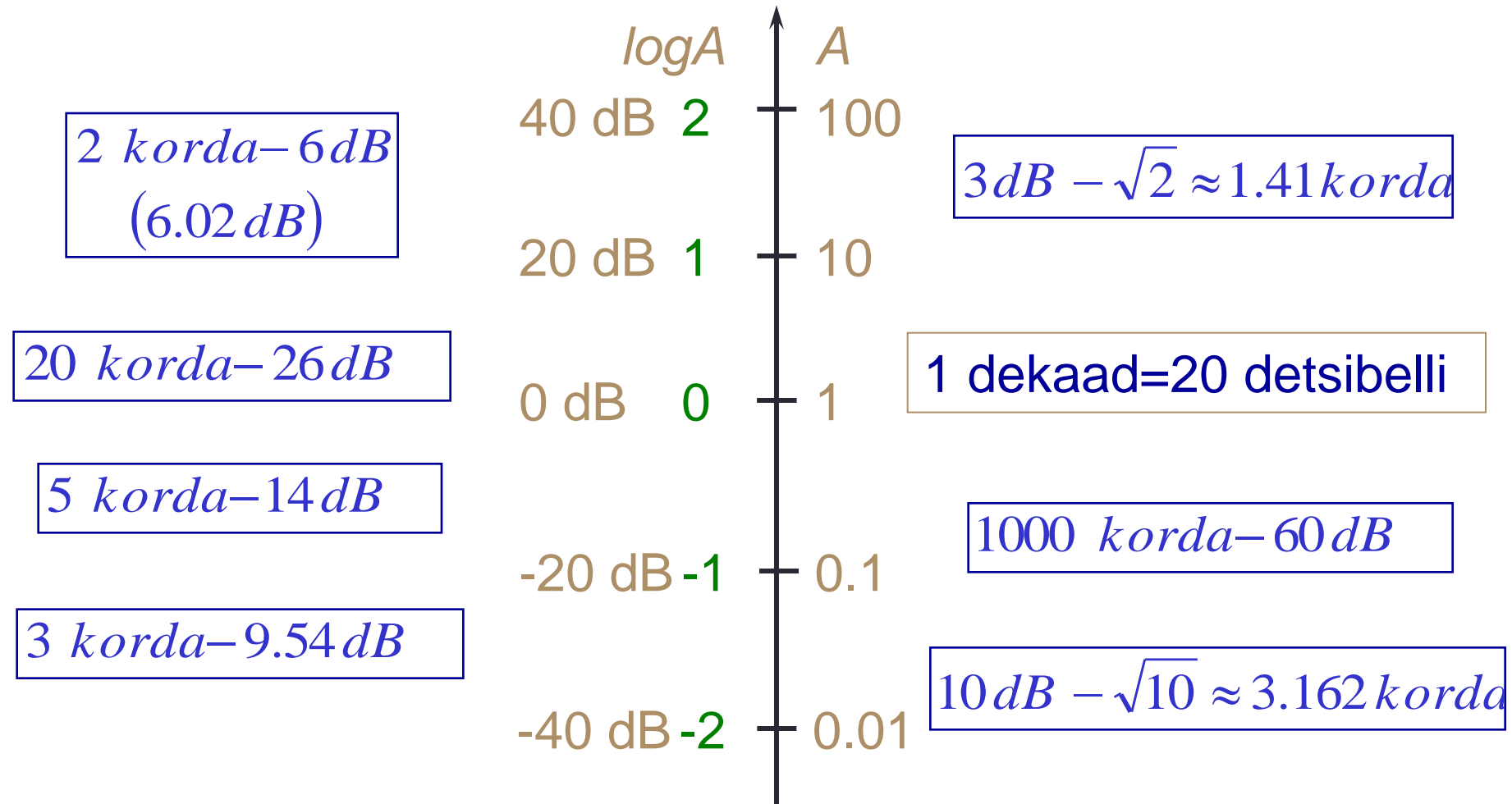
$$K(\text{dB}) = 10 \log(V^2/V_0^2) = 20 \log(V/V_0)$$

NB ! Detsibell on matemaatiline ühik .

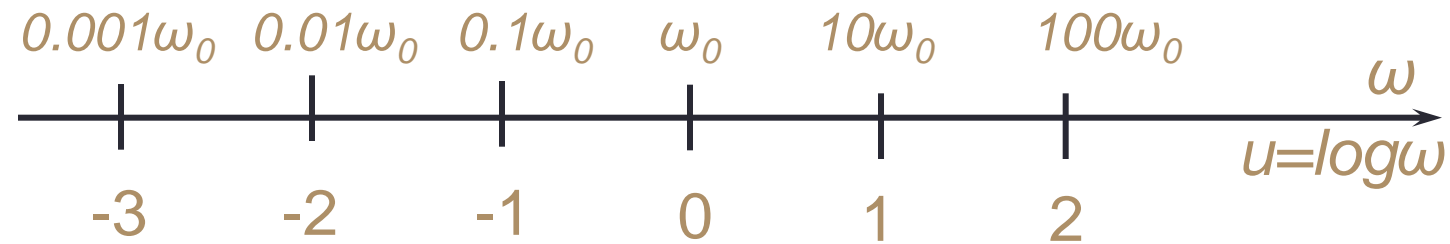


Logaritmiline amplituud

Amplituud - analoogiline, kuid teised nimetused ühikutel



Logaritmiline sagedustelg



Vahemik, millel sagedus muutub *10 korda* on *1 dekaad* [dec].

Alumisel skaalal on dekaadid

Kasutatakse ka *oktaavi* [oct]- see on sageduse *2-kordne* muutus.

Logaritmiline sagedustelg

Näiteid sagedusteljelt

2 korda 0.30103 dec (ligikaudu 0.3 dec)

1 oktaav $\approx 0.3 dec$ (tegelikult 0.301...dec)

3 oct – 8 korda

2 dec – 100 korda

2 oct – 4 korda

3 dec – 1000 korda

4 oct – 16 korda

4 dec – 10000 korda

0.5 dec – $\sqrt{10} = 3.162$ korda

4 korda – 0.6 dec

0.1 dec – $\sqrt[10]{10} = 1.259$ korda

5 korda – $1 - 0.3 = 0.7 dec$

0.7 dec – $\frac{10}{2} = 5$ korda

20 korda – $1 + 0.3 = 1.3 dec$

Detsibell

Praktikas kasutatakse ka näiteks

- dBm – detsibell millivati suhtes ($1\text{mW } 600 \Omega$) 0 dB vastab pingele 0.775 V (eelkõige heli- ja sidetehnika)
- dBV – detsibell 1 V pinge sihtes 0dB vastab pingele 1 V
- dBu – detsibell 1 μV pinge sihtes 0dB vastab pingele 1 μV (sidetehnika)
- dB SPL (sound pressure level) akustika, inimese kuulmine 20 μPa vastab helirõhule 0 dB (inimese kuuldelävi)
- Jne...jne.... <https://en.wikipedia.org/wiki/Decibel>



Bode diagrammid

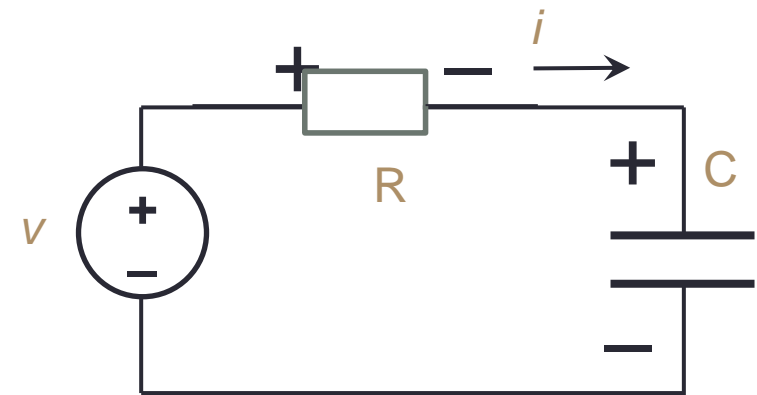
Bode diagrammid ehk *logaritmilised sageduskarakteristikud* graafilises esituses saame teljestikus, kus horisontaalteljel on sageduse logaritm ja vertikaalteljel amplituudi logaritm või faas.

Näide - 1 järku:

$$T(s) = \frac{1}{s + p} \Rightarrow \frac{1}{j\omega + p} \quad \{p > 0\}$$

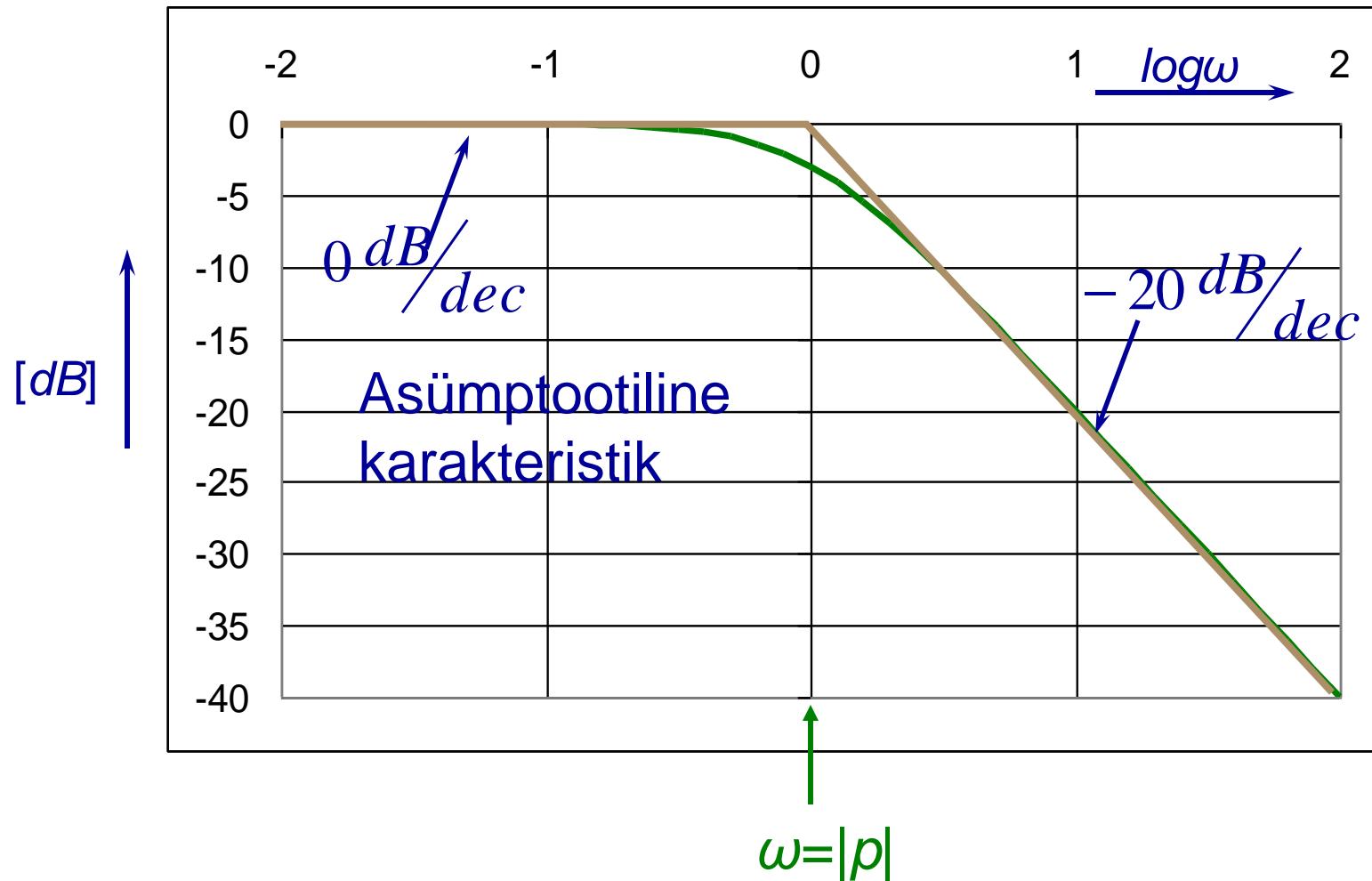
$$\log \frac{1}{j\omega + p} = -\log(j\omega + p) = \underbrace{-\log \sqrt{\omega^2 + p^2}}_{\text{amplituud}} - \underbrace{j \arctan \frac{\omega}{p}}_{\text{faas}}$$

NB! Võrreldakse ω ja p !

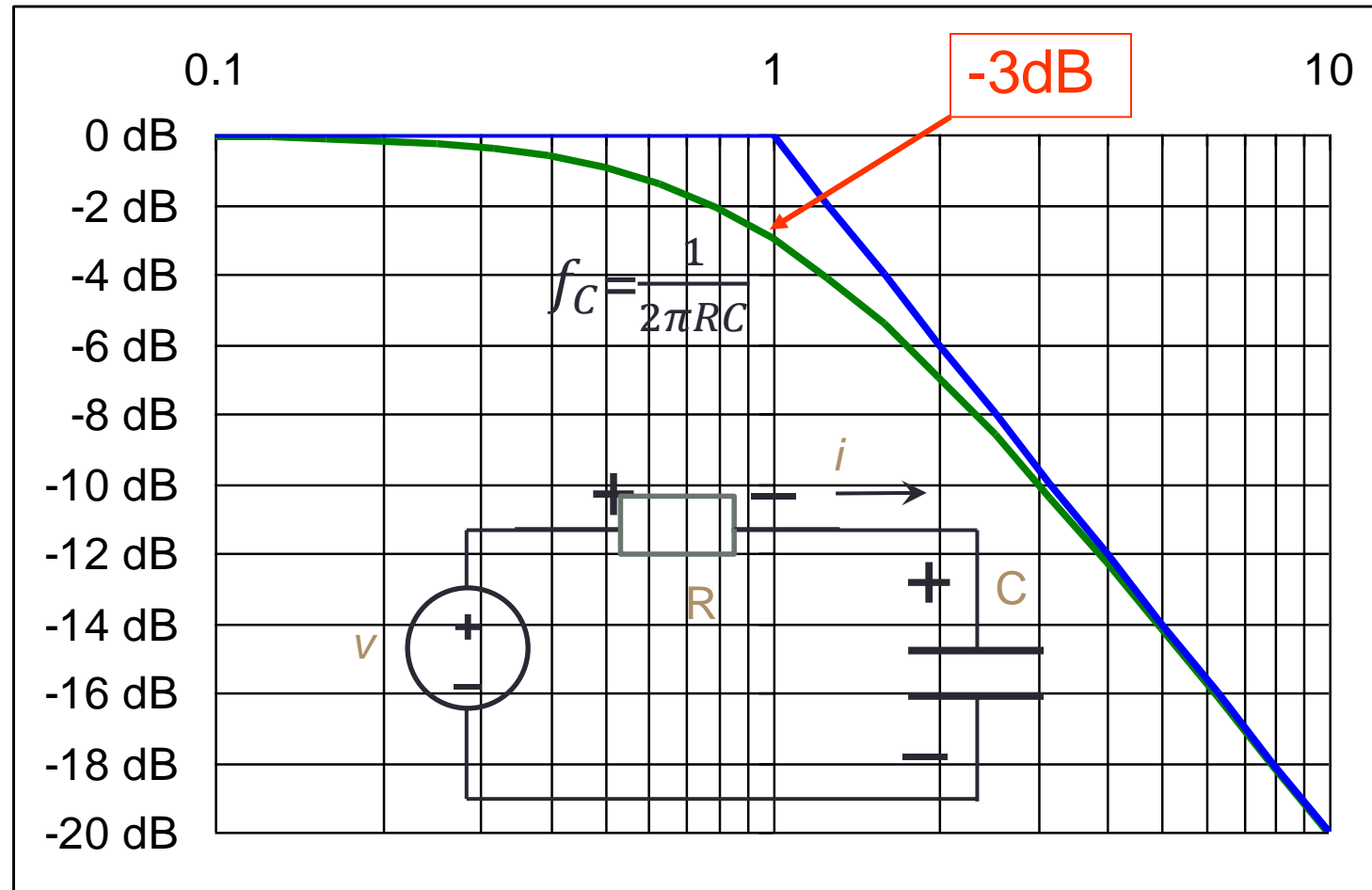


$$\frac{V_C}{V} = \frac{1}{j\omega RC + 1}$$

Asümptootiline amplituudikarakteristik



Bode diagrammid: üks poolus ,RC, graafik



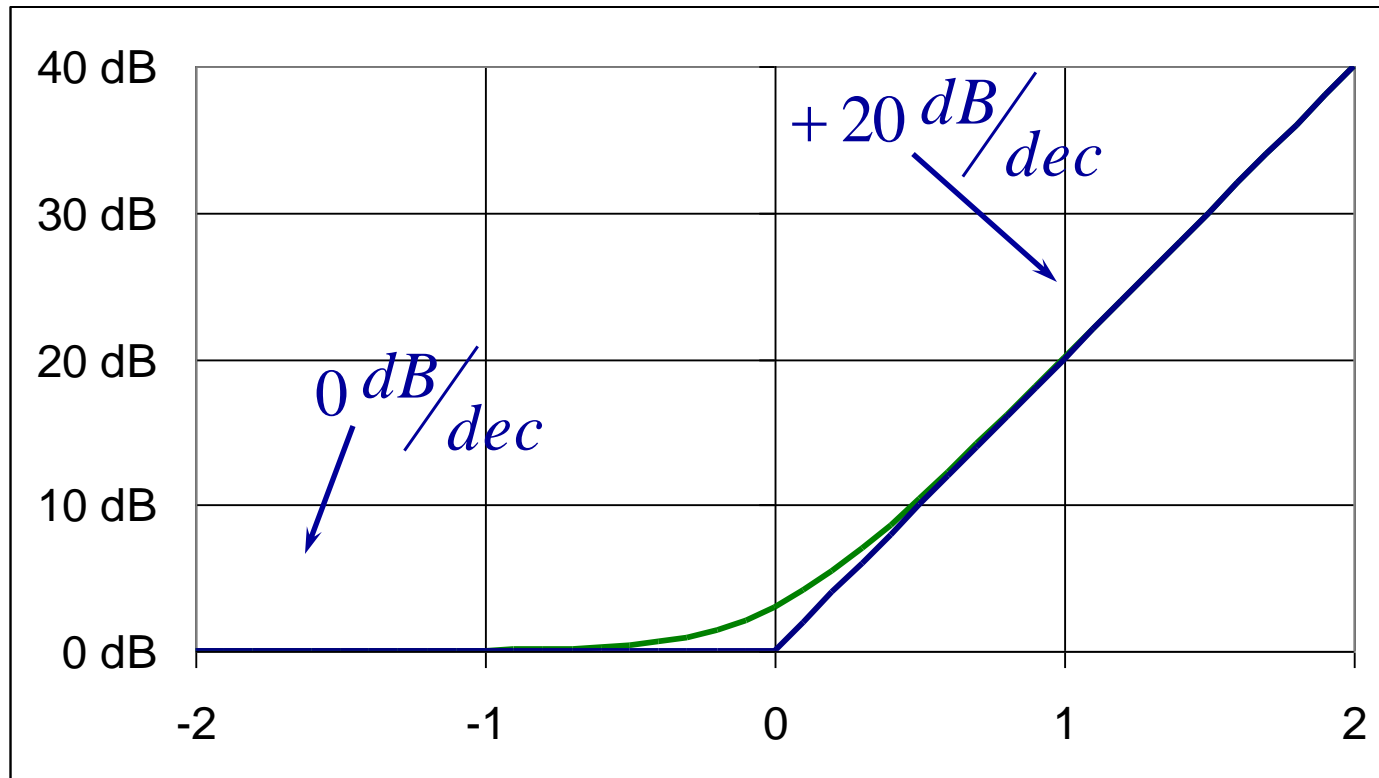
$$\frac{V_C}{V} = \frac{1}{j\omega RC + 1}$$

$$\frac{V_C}{V} = \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$$

Sagedust, kus ülekanne on maksimaalsest väärtusest vähenenud 3dB, nimetatakse üldjuhul piirsageduseks. Reaal- ja imaginaarosad on võrdsed.

Bode diagrammid: üks null

Nulli puhul on amplituudi märk vastupidine pooluse omaga, karakteristik on peegelpilt sagedustelje suhtes:



Bode diagrammid: amplituudikarakteristiku kalded

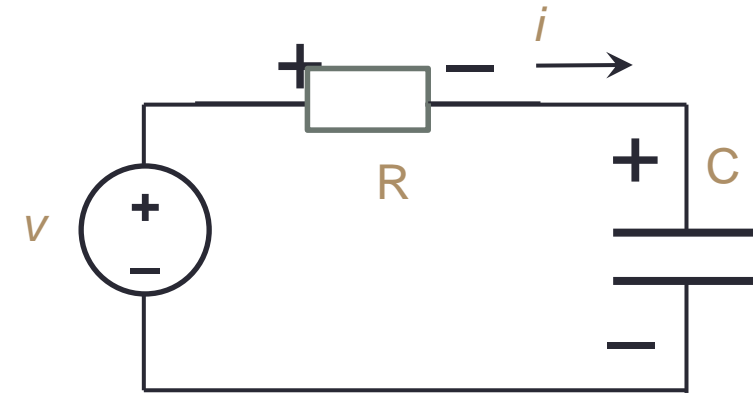
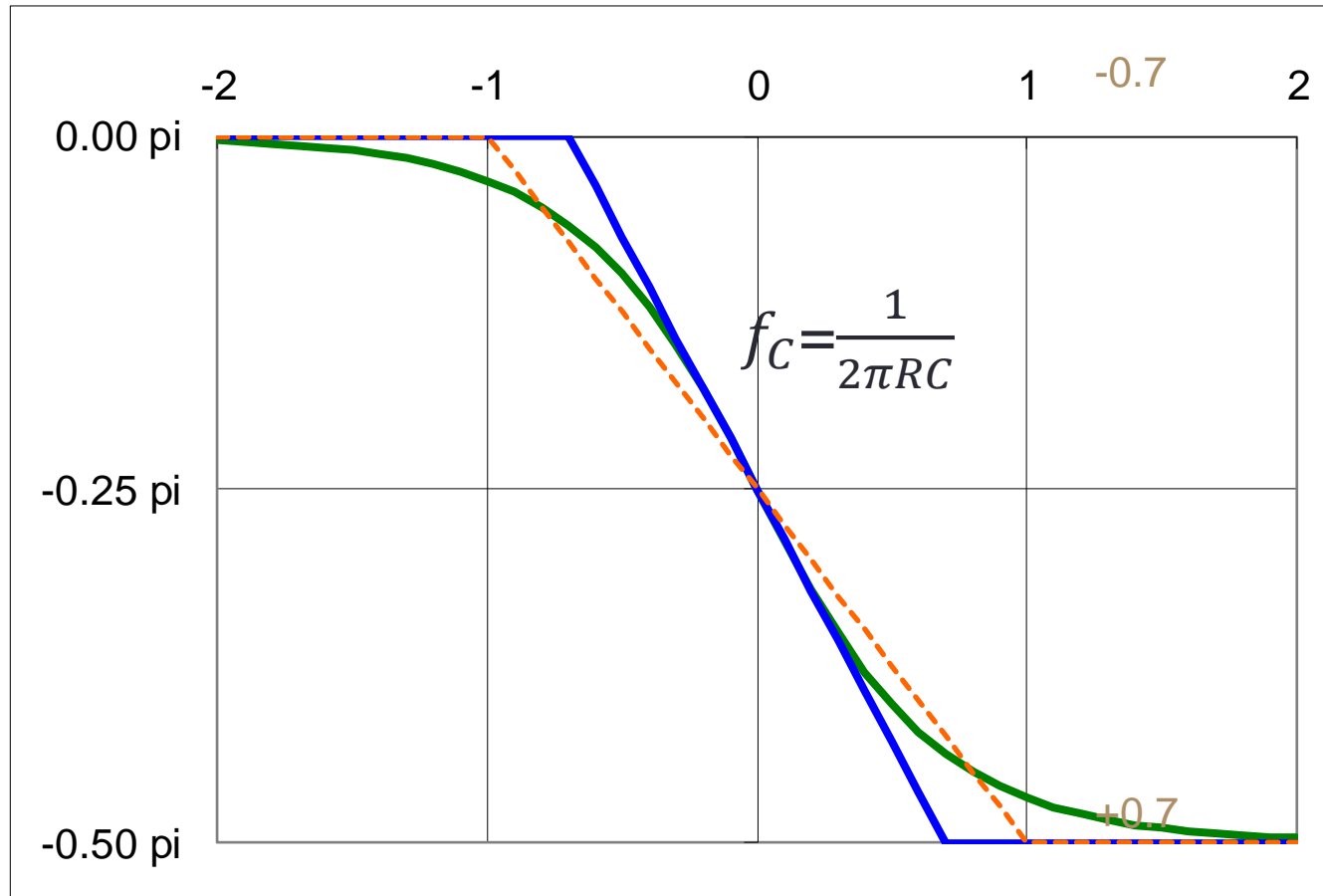
Kuna erinevate p väärtuste korral on karakteristikud lihtsalt nihutatud sagedusteljel, siis üldjuhul saame sellise eeskirja: liikudes sagedusteljel vasakult paremale muutub karakteristiku kalle

$+20$ dB/dec, kui sagedus on võrdne **nulli** absoluutväärtusega

-20 dB/dec, kui sagedus on võrdne **pooluse** absoluutväärtusega

Nende murdepunktide vahel on asümptootilise karakteristiku kalle $20n$ dB/dec, kus n on täisarv

Faas: üks poolus



$$\frac{V_C}{V} = \frac{1}{j\omega RC + 1}$$

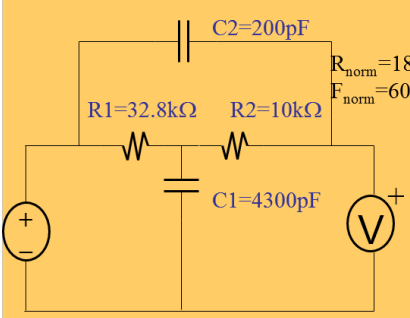
$$\frac{V_C}{V} = \arctan\left(\frac{\omega C}{R}\right)$$

Sageduskarakteristikud

- Enamikel juhtudel huvitab ülekanne vaid madalatel ja kõrgetel sagedustel (hea kontrollida kasvõi skeeme ning arvutusi). Sel juhul saab skeemi tunduvalt lihtsustada !
- Kui on vaja leida ülekanne konkreetsetel sagedustel, lihtsustada sageli ei saa !

Teist järku ahela (s astme järgi näeb ära) karakteristiku arvutamist saab mõistlikkuse piirides veel käsitsi teha: Küll aga saab lihtsalt skeemile Pealevadates öelda, kuidas see käitub. (ühekordne T filter)

Sageduskarakteristikud, näide
normeerimine



Kasutades antud normeerimistegureid saame, et:

$g_1 = 18.1/32.8 = 0.55 \text{ S}$
 $g_2 = 18.1/10 = 1.81 \text{ S}$
 $C_1 = 4300 \cdot 10^{-12} \cdot 18.1 \cdot 10^3 \cdot 60 \cdot 10^3 = 4.67 \text{ F}$
 $C_2 = 200 \cdot 10^{-12} \cdot 18.1 \cdot 10^3 \cdot 60 \cdot 10^3 = 0.21 \text{ F}$

Asetame saadud arvud ülekandefunktsiooni:

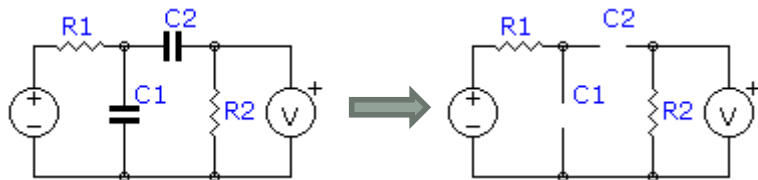
$$T = \frac{s^2(C_1C_2) + s(C_2g_1 + C_2g_2) + g_1g_2}{s^2(C_1C_2) + s(C_1g_2 + C_2g_1 + C_2g_2) + g_1g_2}$$
$$T = \frac{s^2(4.67 \cdot 0.21) + s(0.21 \cdot 0.55 + 0.21 \cdot 1.81) + 0.55 \cdot 1.81}{s^2(4.67 \cdot 0.21) + s(4.67 \cdot 1.81 + 0.21 \cdot 0.55 + 0.21 \cdot 1.81) + 0.55 \cdot 1.81} =$$
$$= \frac{s^2 + 0.5s + 1}{s^2 + 8.95s + 1}$$

11

Sageduskarakteristikud (äärmused)

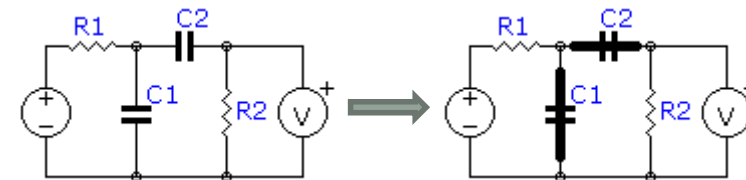
Sagedus läheneb nullile (aliskomponent), aeg läheneb lõpmatusele

- Kondensaatorid saab asendada tühisega, sest juhtivus läheneb nullile
- Induktorid saab asendada lühisega sest takistus läheneb nullile.



Sagedus läheneb lõpmatusele, aeg läheneb nullile (siirdeprotsess)

- Kondensaatorid saab asendada lühisega, sest juhtivus läheneb lõpmatusele.
- Induktorid saab asendada tühisega, sest takistus läheneb lõpmatusele.



Ülekanne detsibellides

Selleks et leida ülekanne detsibellides tuleb:

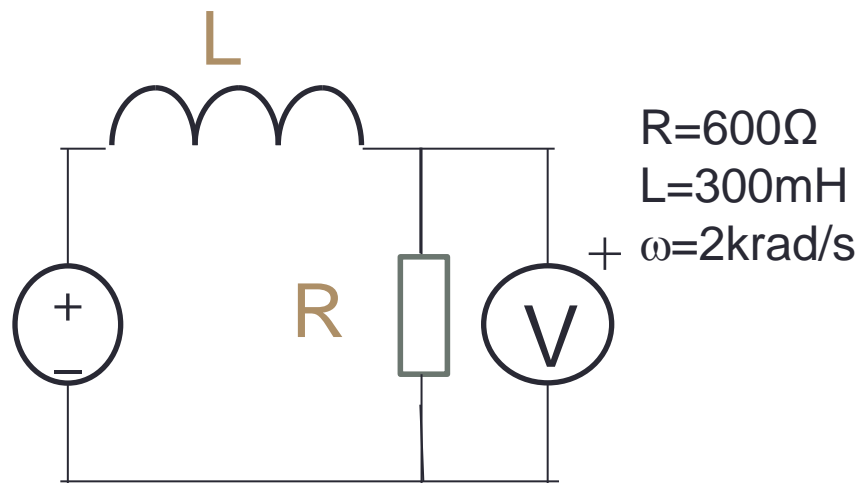
1. Leida ülekandefunktsioon ja sellest moodul
2. Detsibellide leidmiseks võtta sellest kümnendlogaritm ja korrutada 20ga

Jäta meelde:

RC või RL ahela ping- või vooluülekanne ei saa olla suurem kui 1 (suurem, kui 0dB), Samuti ka ainult resistoridest koosneval ahelal.

LC ahela ping- või vooluülekanne on resonantssagedusel ja selle läheduses suurem kui 1, Samas muudel juhtudel on ühest väiksem või võrdne sellega.

Ülekanne detsibellides, näide 1



Kõigepealt leiame ülekannefunktsiooni. Vool, mis väljub pingelähtest läbib nii induktorit kui ka resistori ja avaldub: $I=V/Z$, kus Z on induktori ja resistori kogutakistus, ehk $Z=R+j\omega L$. Pinge, mis tekib resistorile avaldub sellest voolust $V_r=I \cdot R$. Asendades voolu, saame, et

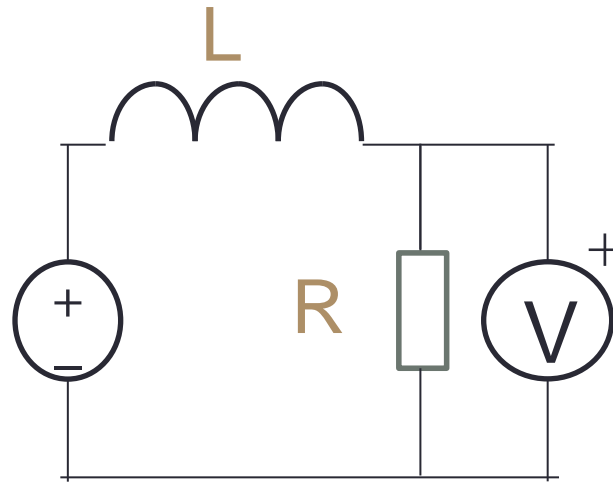
$$V_r/V = R/(R+j\omega L), \text{ ehk } K = \frac{R}{R+j\omega L}. \text{ Kuna pingeülekanne huvitab meid}$$

amplituud, siis tuleb leida ülekanne moodul. Kuna nimetajas on vektorid omavahel risti, siis nende summa on ruutjuur, takistuste ruutude summast.

Et leida ülekanne detsibellides tuleb tulemusest võtta kümnendlogaritm ja korrutada 20ga.

$$K_v = 20 \log \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \right)$$

Ülekanne detsibellides, näide 1



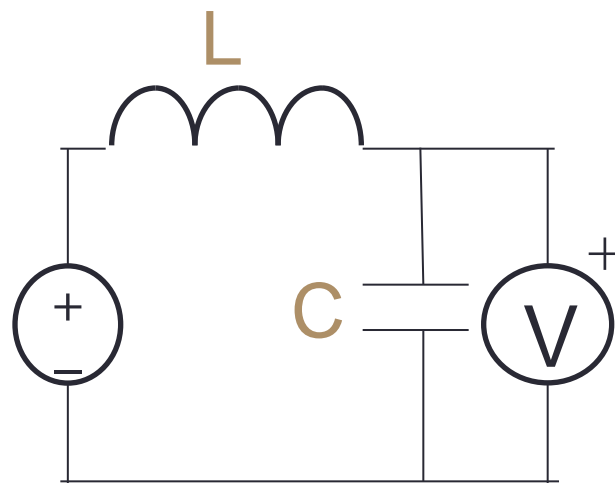
$R=600\Omega$
 $L=300\text{mH}$
 $\omega=2\text{krad/s}$

$$K_v = 20 \log \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \right)$$

Paneme arvud asemele ja saame, et

$$K_v = 20 \log \left(\frac{600}{\sqrt{600^2 + 600^2}} \right) = 20 \log(0.707) = -3\text{dB}$$

Ülekanne detsibellides, näide 2



$$\begin{aligned} C &= 1\text{nF} \\ L &= 400\text{mH} \\ \omega &= 49\text{krad/s} \end{aligned}$$

$$j*j=-1$$

$$1/j=-j$$

Selle sidu ülekanne avaldub:

$$\begin{aligned} K &= \frac{1/j \omega C}{j\omega L + 1/j\omega C} = \\ &= \frac{1}{j(\omega L - 1/\omega C) * j\omega C} = \frac{1}{1 - \omega^2 LC} \end{aligned}$$

Paneme arvud asemele ja saame, et

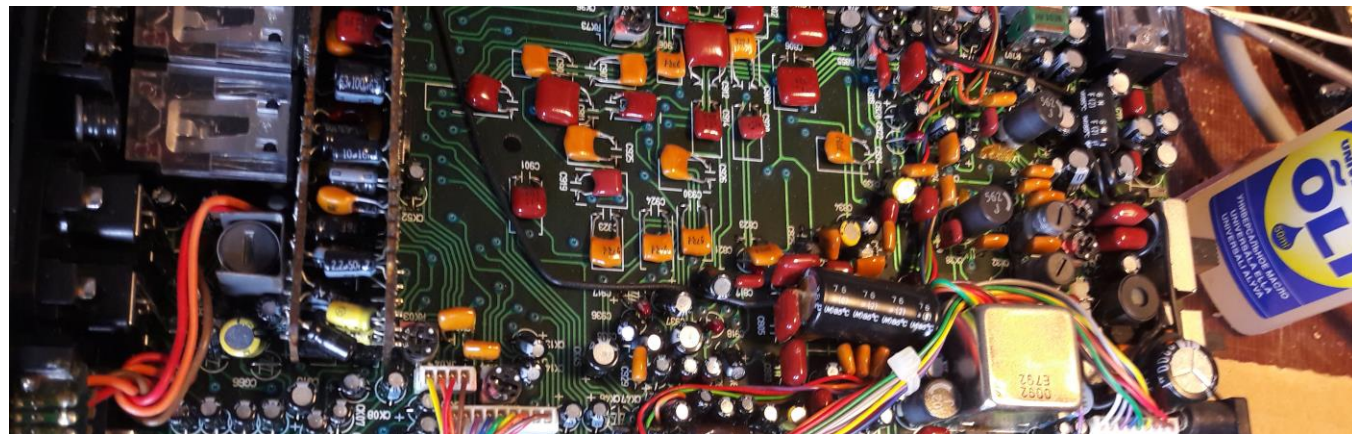
$$K_v = 20 \log \left| \frac{1}{1 - 49000^2 * 400 * 10^{-3} * 1 * 10^{-9}} \right| = 20 \log(1/0.0396) = 20 \log(25) = 27.9\text{dB}$$

(absoluutväärtuse märgid on seepärast, et tuleb leida moodul, mis avaldub:

$$\sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2} \quad , \text{ kuid imaginaarosa sel juhul taandus välja.)}$$

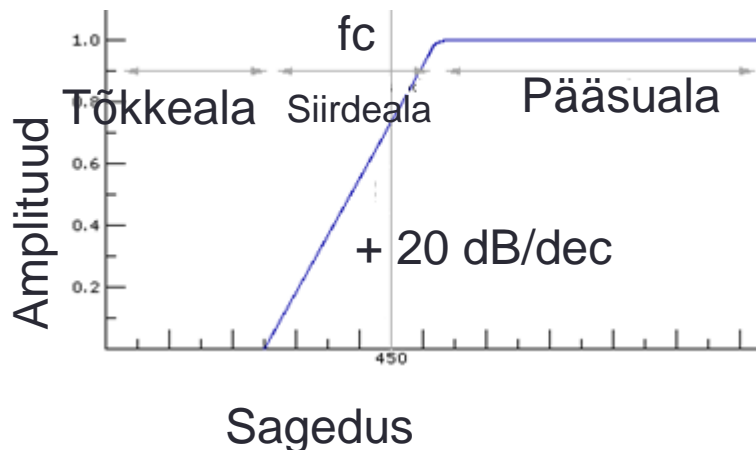
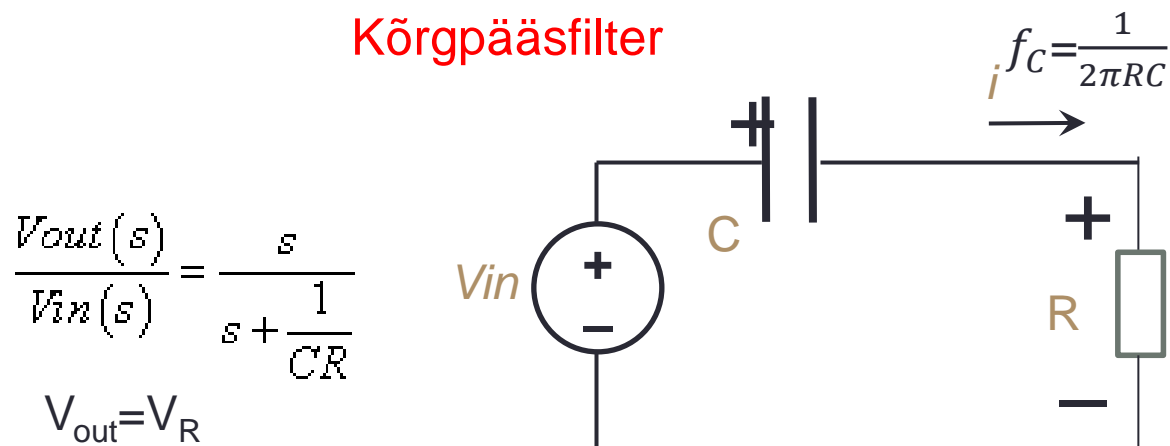
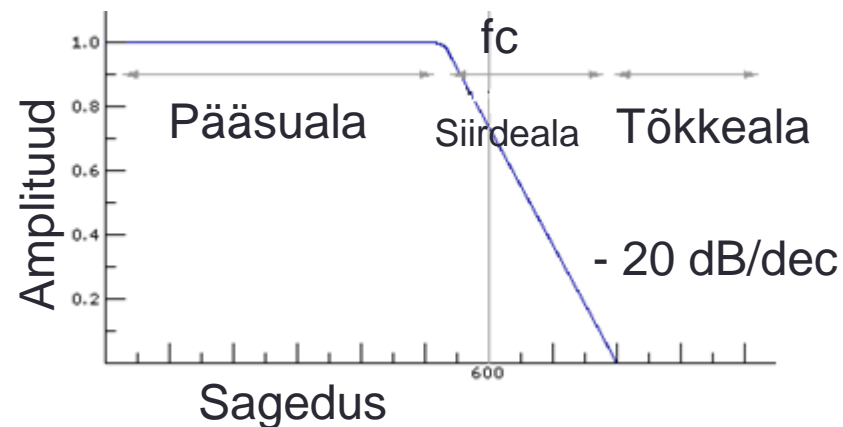
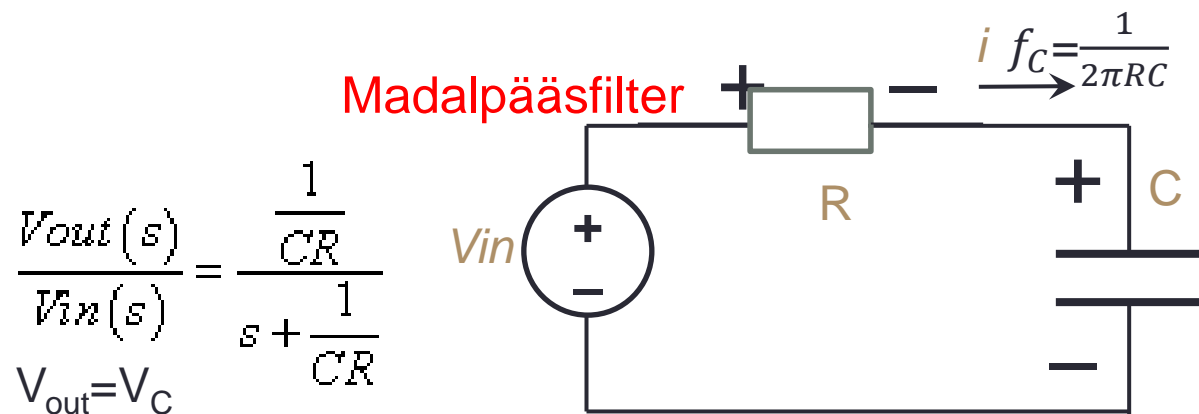
Filtrid

- Eesmärk -eraldada signaalist teatud sagedusega komponente
- Ehk teisendada signaali teatud reeglite järgi
- Levinum on sageduslik filteerimine – kanda sisendist väljundisse soovitud sagedused, pidurdades muude sageduste läbipääsu
- Smas meedias erinevate signaalide samaaegne ülekandmise põhiliseks realisatsiooniks on signaalide spektri transformeerimine kandesageduse ümbrusse . Vastuvõtja peab eraldama vastuvõetud signaalide kogumist sobiva sagedusvahemiku .
- Põhimõtteliselt ei ole võimalik ehitada ideaalset filtrit
- Mida parem filter , seda suurem on hilistumine.



Filtrid

f_c – murdesagedus (lõikesagedus)



Lihtsaimad RC passiivfiltri realisatsioonid

Võimaldavad muuta signaaliülekanne sagedusarakteristikuid
 Piltidel on amplituudsagedusarakteristikud
 Olemas on ka faasisagedusarakteristikud

Madalpääsfilter - demo

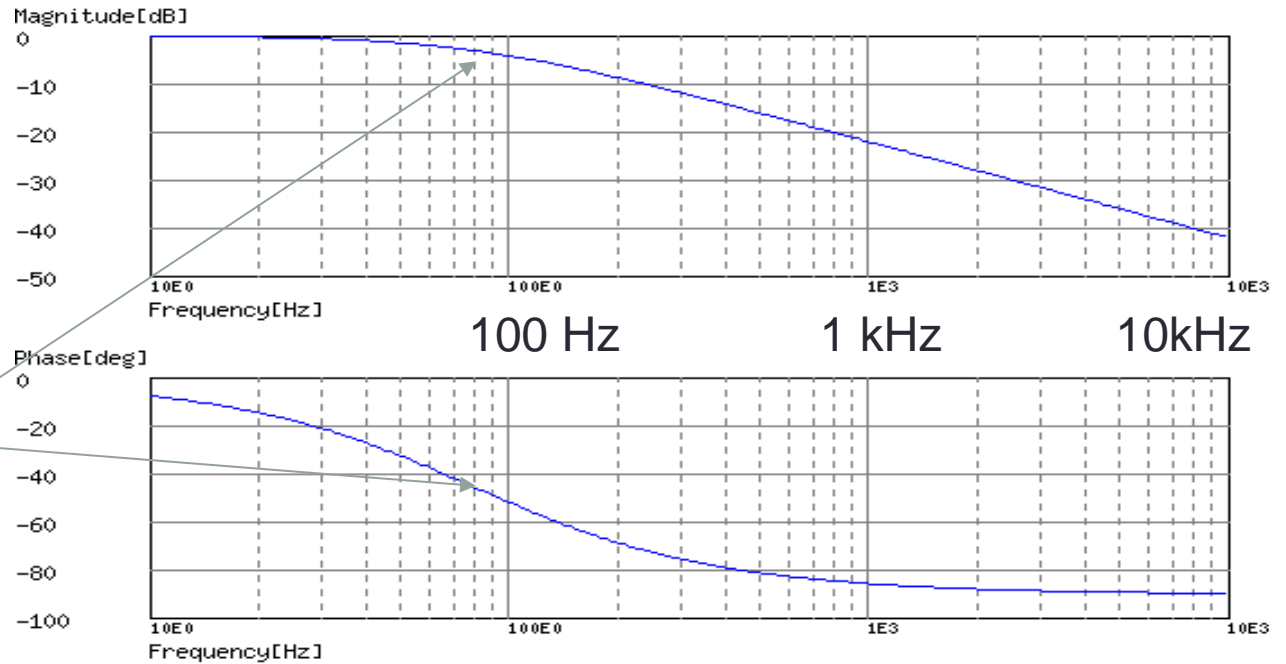
$$R = 20\text{k}\Omega \quad f_c = \frac{1}{2\pi RC} = 79,5 \text{ Hz}$$

$$C = 0,1 \mu\text{F}$$

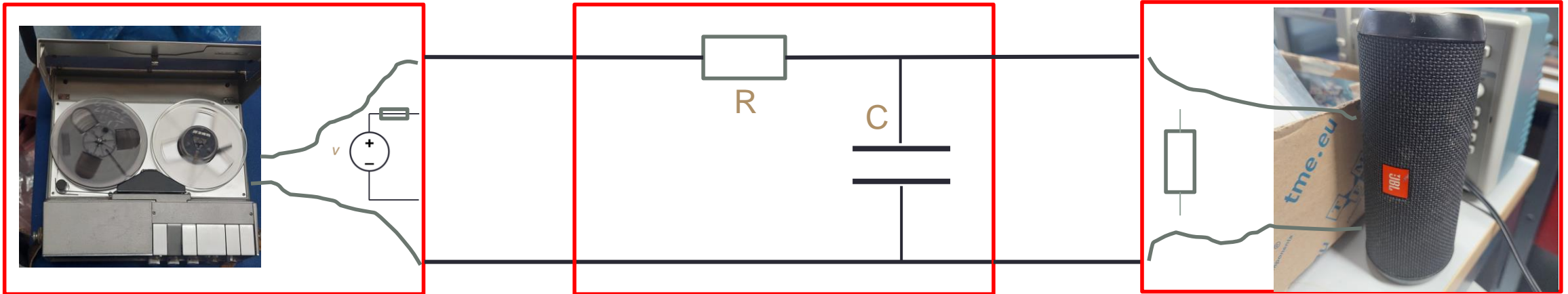
Ülekandefunktsioon:

$$T(s) = \frac{500}{s+500} \quad j\omega \rightarrow s \rightarrow \frac{500 \text{ rad/s}}{2\pi \text{ rad}} = 79,5 \text{ Hz}$$

BodeDiagram



Demo – kõrged helisagedused nõrgenevad



Allikas – (Uher Report 4400) →

Madalpääsfilter 79,5 Hz

→ Koormus (JBL Flip 3)

NB ! **See on ka ülekandeliini aseskeem** – mida pikem see on, seda suurem on juhtme takistus R ja parasiitmahtuvus C (tegelikult lisandub ka induktiivsus L) ja seda suuremad on kaod kõrgematel sagedustel ! **Piirab andmeside kiirust !**

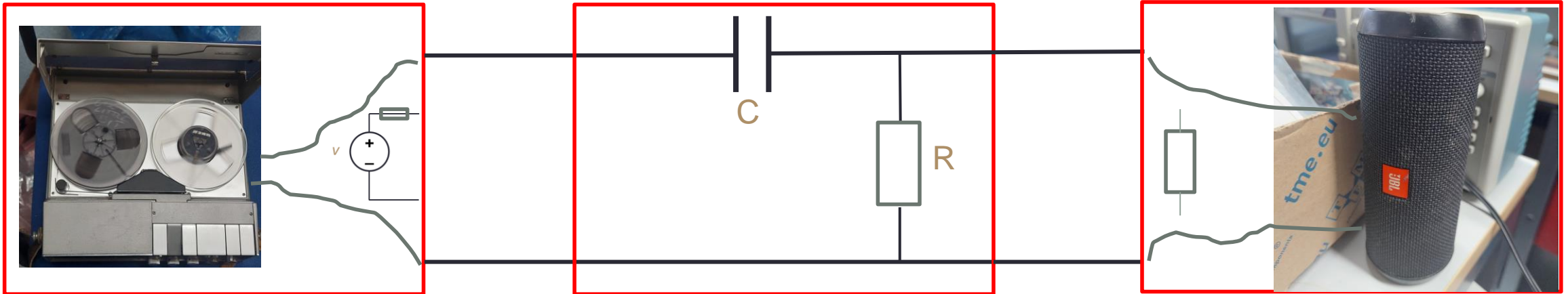
Kõrgpääsfilter - demo

$$R = 2.2 \text{ k}\Omega \quad f_C = \frac{1}{2\pi RC} = 12,9 \text{ kHz}$$
$$C = 5600 \text{ pF}$$

Ülekandefunktsioon:

$$T(s) = \frac{s}{s+81683} \quad j\omega \rightarrow s$$

Demo – madalad helisagedused nõrgenevad



Allikas – (Uher Report 4400) →

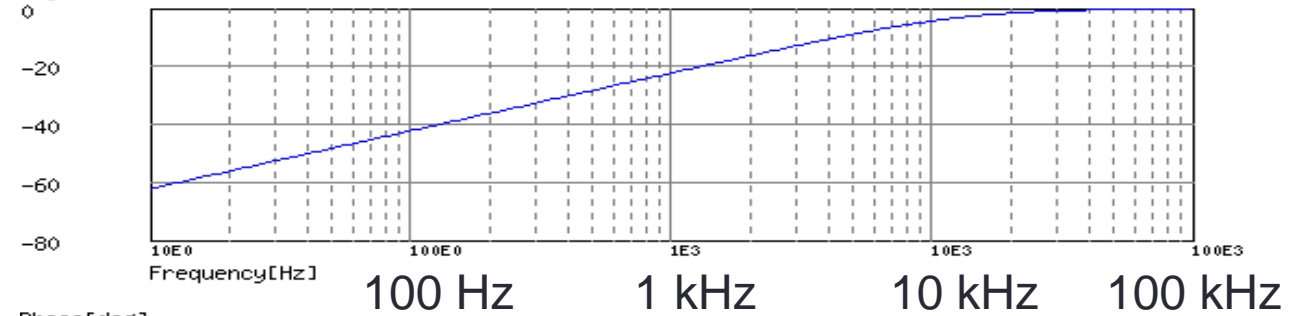
Kõrgpääsfilter

→

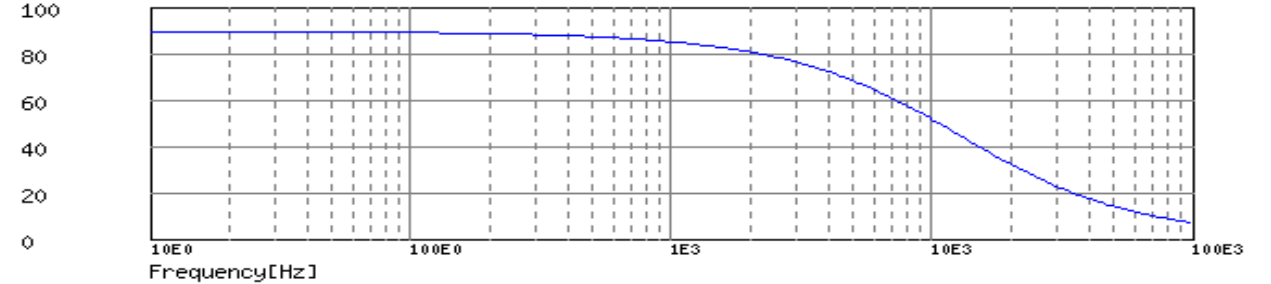
Koormus (JBL Flip 3)

BodeDiagram

Magnitude[dB]



Phase[deg]



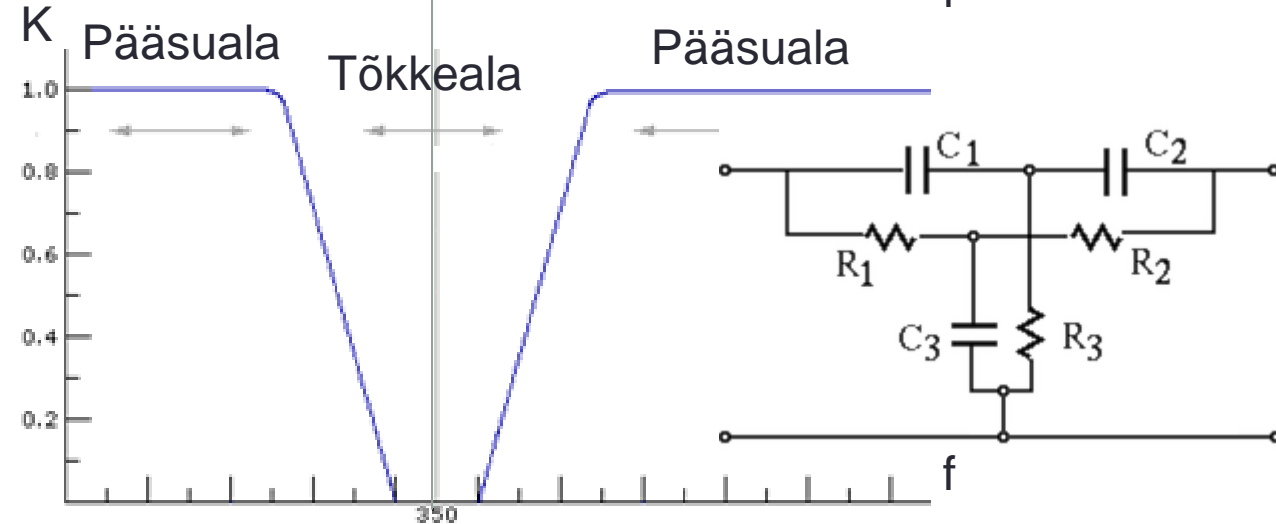
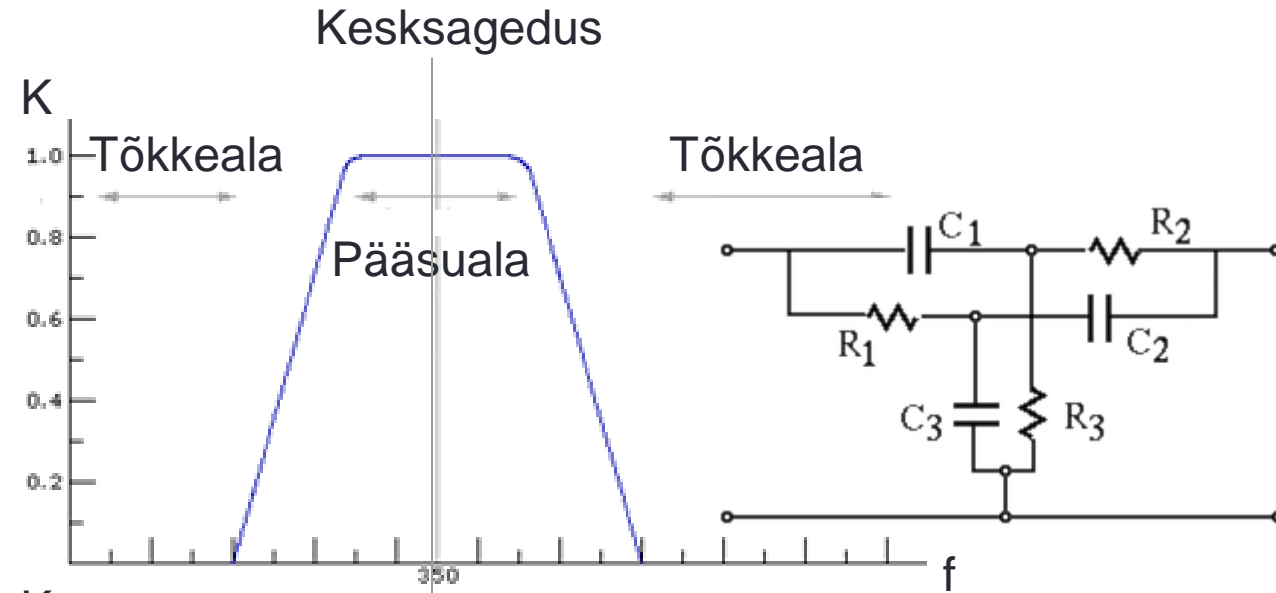
(c)okawa-denshi.jp

Filtrid

Ribafilter

- Pääsufilter

- Tõkkefilter



Disainitakse madal ja kõrgpääsfiltritest (lihtsamad näited aga juba 3- järku!)

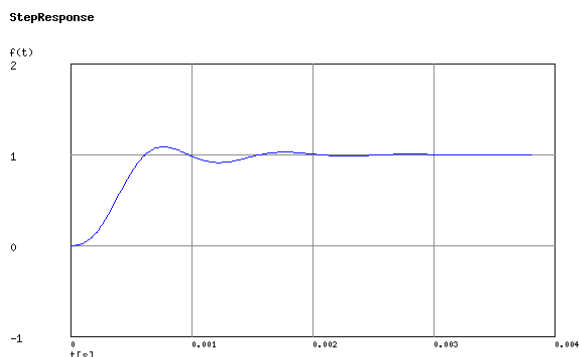
Filtrid (näide – kõrgemat järku)

- 3. järku madalpääsfilter (näiteks bassikõlari aktiivfilter)
- Arvutused on keerukad (kuni 2 järku saab arvutada veel käsitsi)
- tänapäeval kasutatakse simulaatoreid.
- Kõrgemat järku filtrid on hädavajalikud sidetehnikas.
- Disain on vastupidi – on teada ülekanne ja tuleb arvutada komponendid

- 60 dB/dec

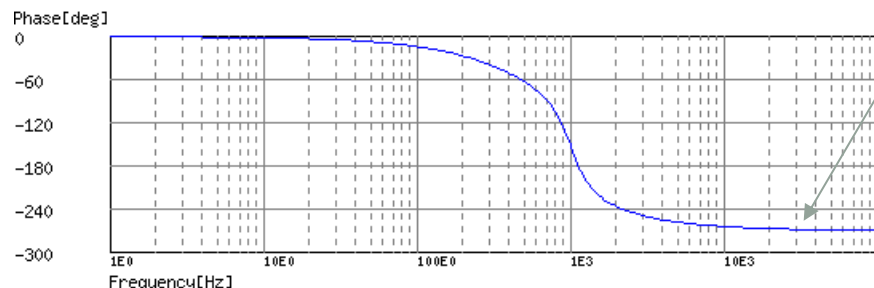
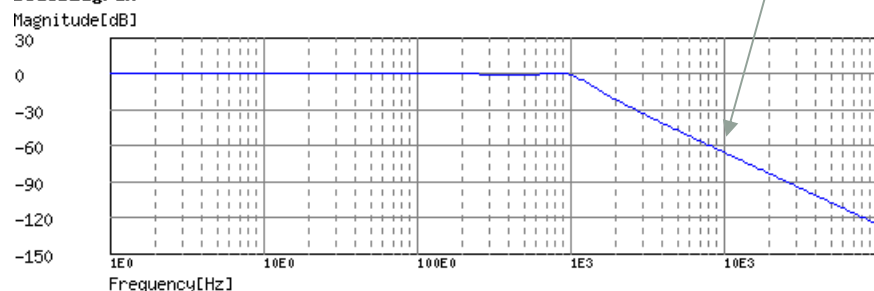
$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{1}{s^3 + s^2 \left(\frac{1}{C_1 R_1} + \frac{1}{C_1 R_2} + \frac{1}{C_2 R_3} + \frac{1}{C_2 R_2} \right) + s \left(\frac{1}{C_2 C_3 R_2 R_3} + \frac{1}{C_1 C_2 R_2 R_3} + \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_3} + \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2} \right) + \frac{1}{C_1 C_2 C_3 R_1 R_2 R_3}}$$

Hüppekaja



(c)okawa-denshi.jp

BodeDiagram



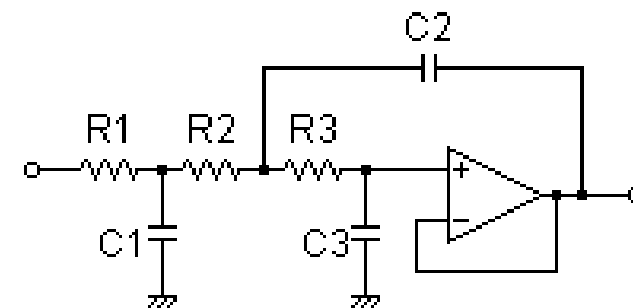
-270°

(c)okawa-denshi.jp

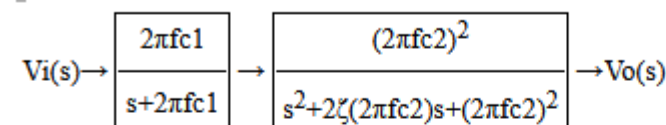
(Sample) Transfer Function:

$$G(s) = \frac{133362301759}{s^3 + 6607.88013729s^2 + 50305327.1219s + 133362301759}$$

- R1 = 9.1kΩ
- R2 = 68kΩ
- R3 = 36kΩ
- C1 = 0.033μF
- C2 = 0.015μF
- C3 = 680pF



Equivalent block diagram:



Cut-off frequency fc1, fc2 of equivalent block diagram:

$$fc1 = 538.768389471[\text{Hz}]$$

$$fc2 = 998.954448652[\text{Hz}]$$

Damping ratio ζ of equivalent block diagram:

$$\zeta = 0.256722615545$$

Pole(s) (Nimetaja nullkohad)

$$p = -256.454198869 + 965.474616116i[\text{Hz}]$$

$$|p| = 998.954448652[\text{Hz}]$$

$$p = -538.768389471[\text{Hz}]$$

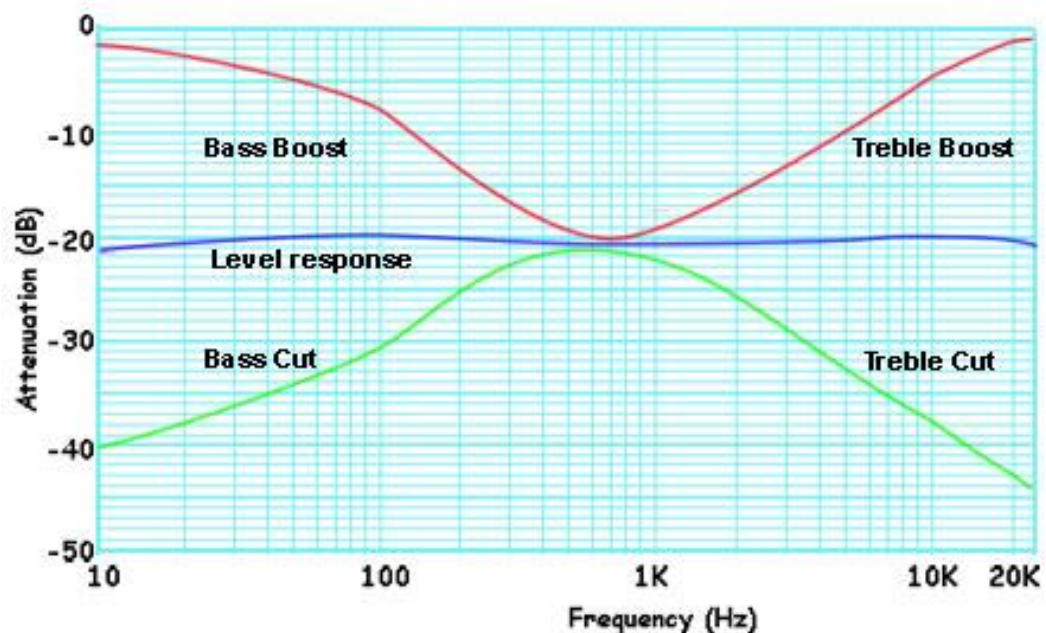
$$|p| = 538.768389471[\text{Hz}]$$

$$p = -256.454198869 - 965.474616116i[\text{Hz}]$$

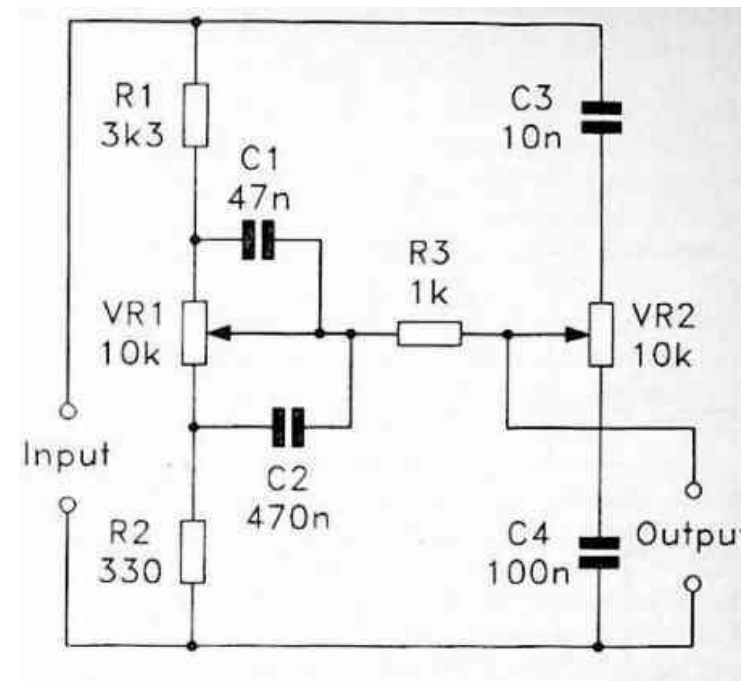
$$|p| = 998.954448652[\text{Hz}]$$

Filtrid (näide - tämbriregulaator)

- Kasutusel olmeelektroonikas
- Olemuselt muudetava murdesagedusega filter.

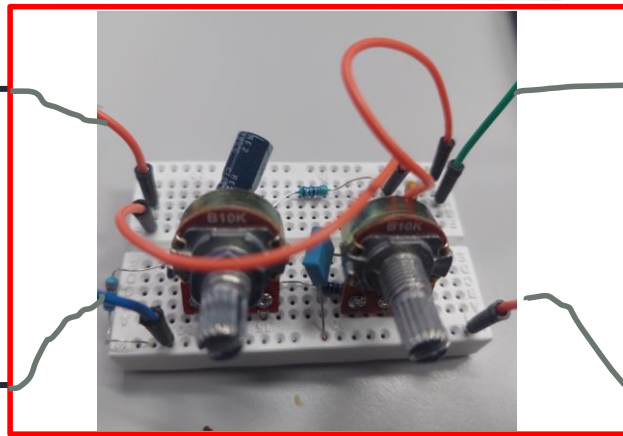
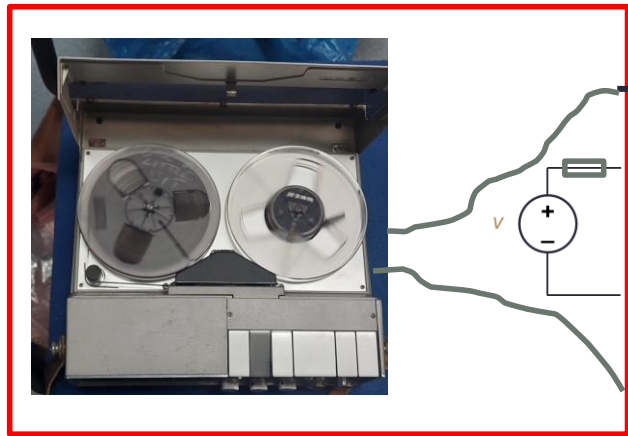
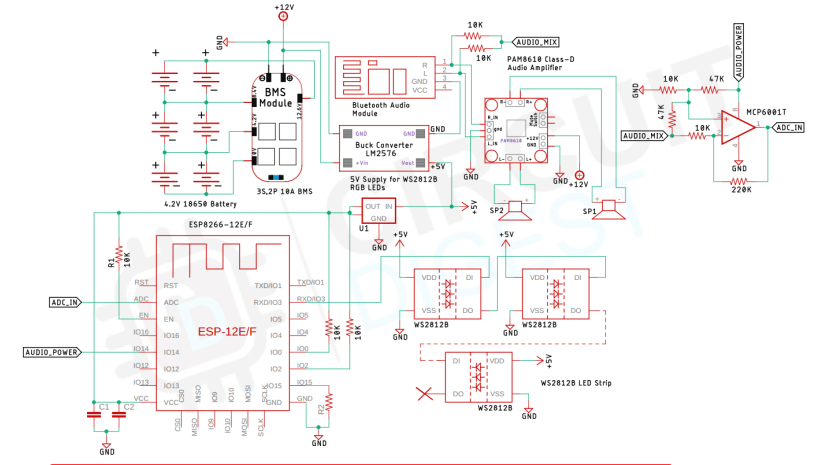
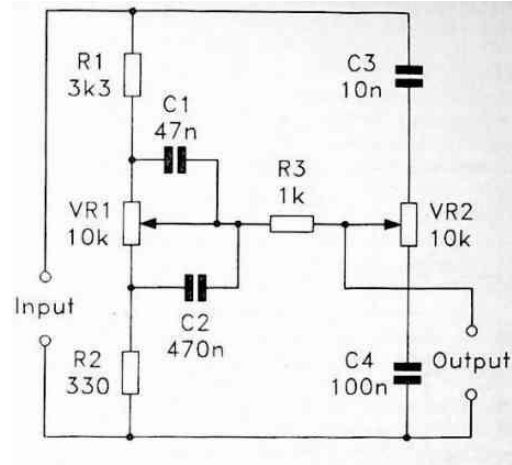
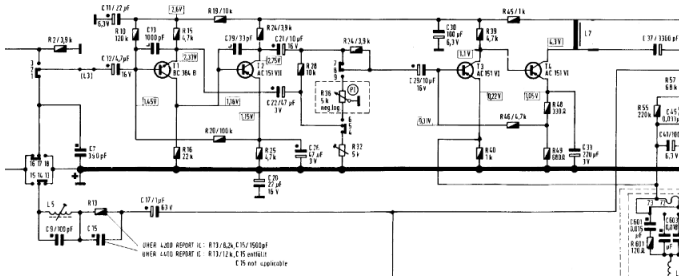


Peter Baxandall'i skeem (1950)



<http://www.radiosantiguas.com/Books%20Audio/2004%20THE%20JAMES%20BAXANDALL%20PASSIVE%20TONE%20CONTROL%20-%20Inictel.pdf> (teoreetilised arvutused, ülekandefunktsioonid)

Tämbriregulaator- demo



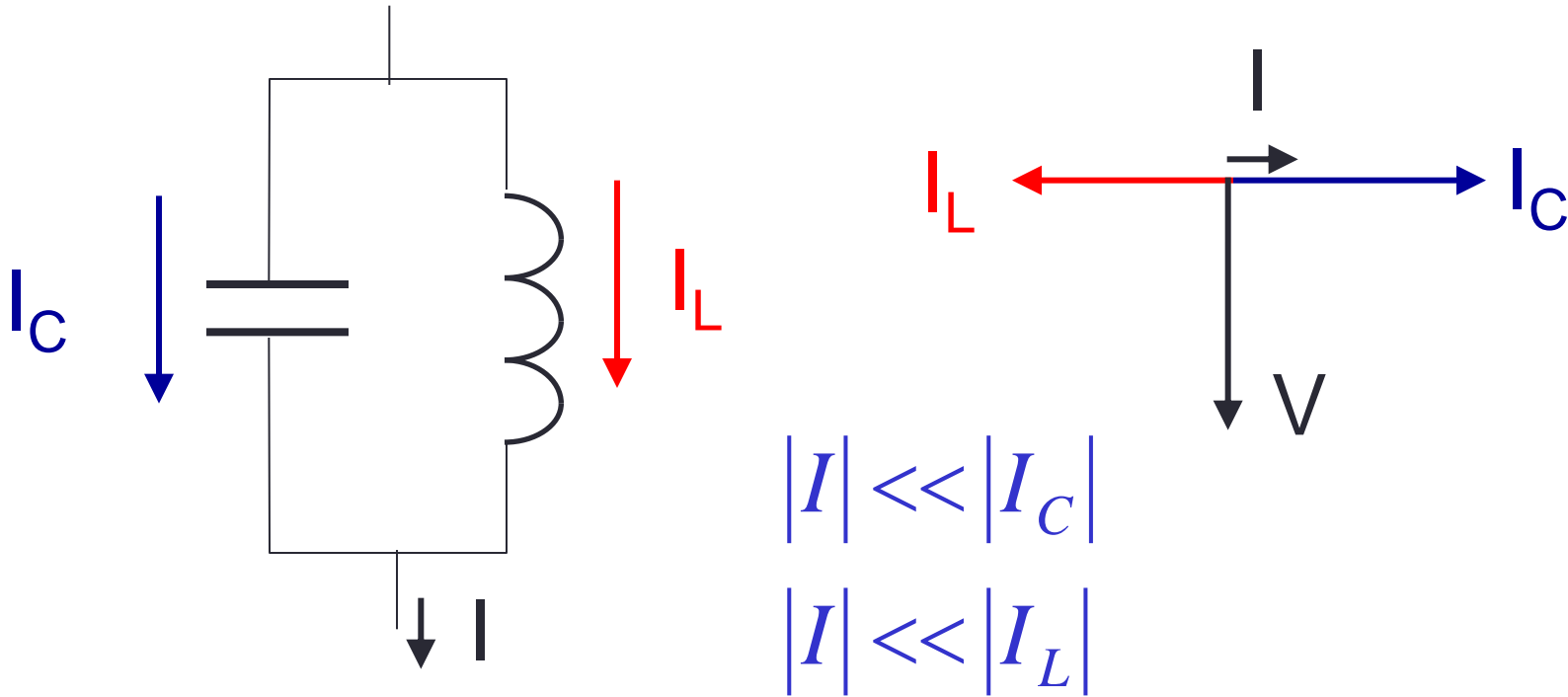
Allikas – (Uher Report 4400) →

Muudetava murdesagedusega passiivfilter

→ Koormus (JBL Flip 3)

Resonants

Resonants on nähtus, mille puhul energia vahetab asukohta (kahe elemendi vahel) ja see energiahulk ületab tunduvalt seda energiavahetust, mis toimub ümbruskonnaga.

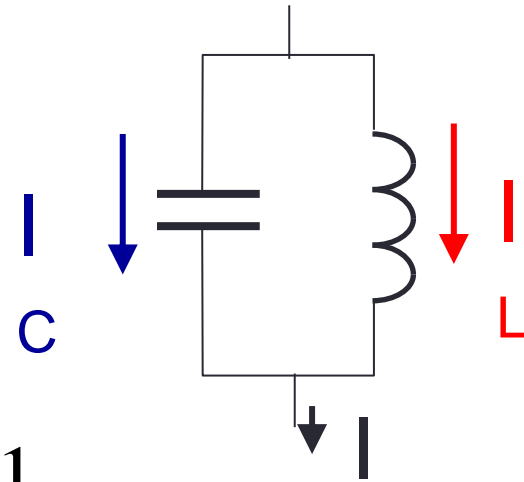


Resonantsitingimus

Selleks peab olema:

$$I_C = j\omega C \times V$$

$$I_L = \frac{1}{j\omega L} \times V$$



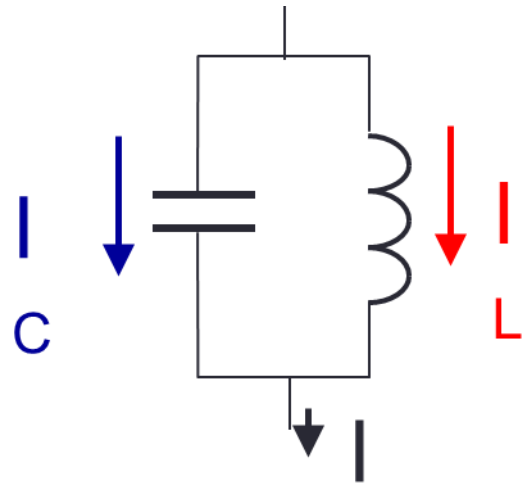
$$I = \left(j\omega C + \frac{1}{j\omega L} \right) \times V = \frac{-\omega^2 LC + 1}{j\omega L} \times V$$

$$\omega^2 LC \approx 1 \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\Omega s \times S s = s^2)$$

Kui sagedus on võrdne resonantsagedusega, siis väline vool on null!

Resonants

Resonantsi puhul vahetab energia sellises *võnkeringis* perioodiliselt kohta ja iseloomu: kondensaatoris on energia elektriväljas, induktoris – magnetväljas. Kummaski elemendis pole kadusid – energia säilib.

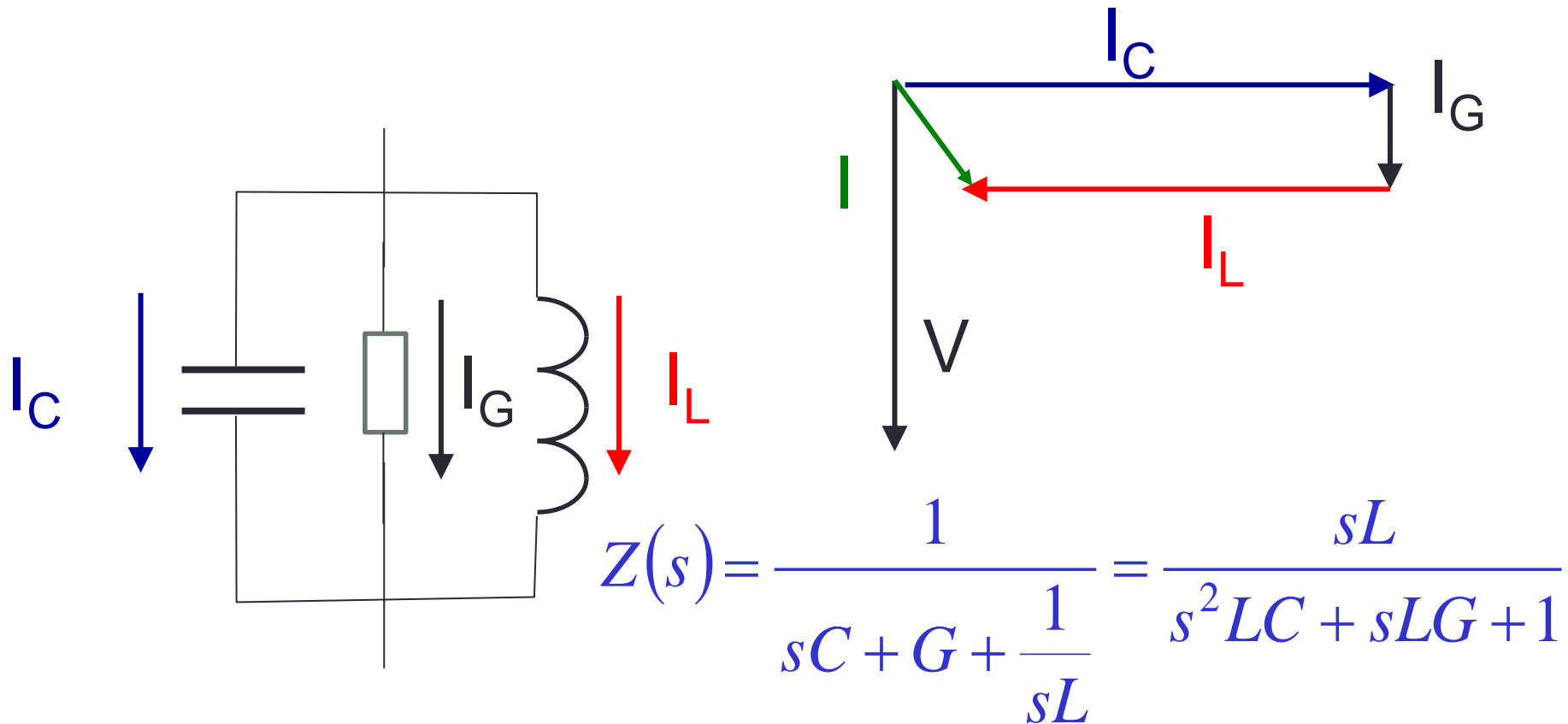


See on
paralleelresonants;
(vooluresonants)

jadaühenduse
korral tekib
jadaresonants
(pingeresonants)

Reaalne resonants

Reaalselt on lisaks L ja C-le ka takisti, mis energiat kulutab:

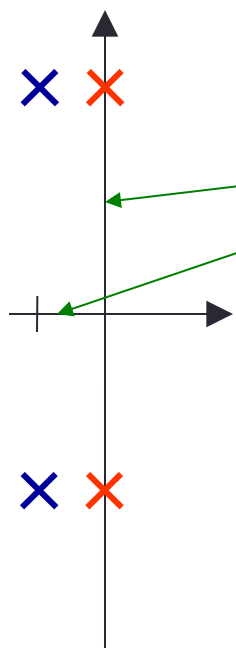


Teist järku ülekanne !

Võnkeringi poolused

$$\frac{-LG \pm \sqrt{(LG)^2 - 4LC}}{2LC} = -\frac{G}{2C} \pm \sqrt{\left(\frac{LG}{2LC}\right)^2 - \frac{1}{LC}} =$$

$$= -\frac{G}{2C} \pm \sqrt{\frac{LG^2}{4C} \omega^2 - \omega^2} = -\frac{G}{2C} \pm j\omega \sqrt{1 - \frac{LG^2}{4C}}$$



$$\frac{G}{2C} = \frac{G}{2C} \frac{\sqrt{LC}}{\sqrt{LC}} = \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \omega = \frac{1}{2} G \rho \omega$$

Karakteristlik takistus $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$

Hüvetegur

$$s^2 LC + sLG + 1 = \frac{s^2}{\omega^2} + s \frac{\rho G}{\omega} + 1 = \left(\frac{s}{\omega} \right)^2 + \frac{1}{Q} \frac{s}{\omega} + 1$$

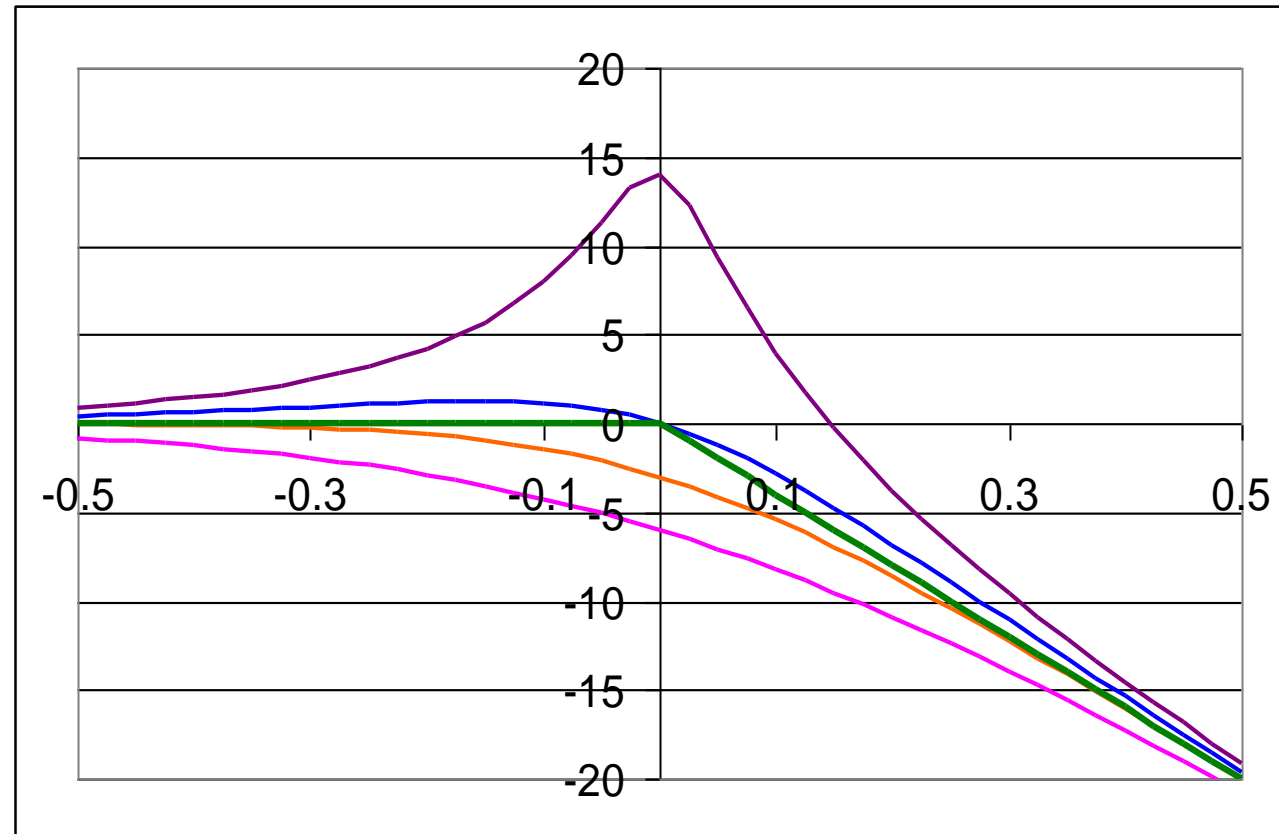
$$Q = \frac{1}{\rho G} = \frac{R}{\rho} \quad \text{Hüvetegur}$$

Hüvetegur – ideaalsuse näitaja

Poolused imaginaarteljel: $Q = \infty$

Amplituudsageduskarakteristik

Resonantsi puhul on poolused kompleksed ja imaginaartelje lähedal – sageduskarakteristik näitabki suuri amplituudi väärtusi.



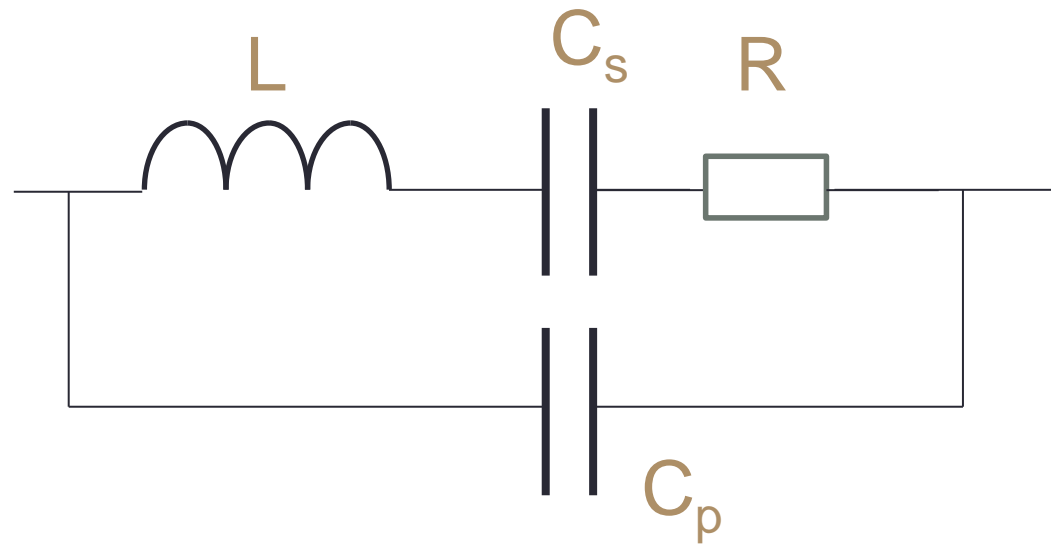
Kvartsresonaator

$$L=10.485\text{kH}$$

$$C_s=2.25\text{fF}$$

$$R=70\text{k}\Omega$$

$$C_p=10\text{pF}$$



$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{10.485\text{k}}{2.25\text{f}}} = 2.16\text{G}\Omega$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 0.205 \frac{\text{Mrad}}{\text{s}} (= 32.768\text{kHz})$$

2^{15}

$$Q = \frac{\rho}{R} = \frac{2.16\text{G}\Omega}{70\text{k}\Omega} = 30860$$

$$df = \frac{32768}{30860} \approx 1\text{Hz}$$