

Professor peab sissejuhatavat loengut mingis tehnikaülikoolis.

„Alustuseks selgitan me teile, kes on insener! Niisiis, kujutage ette tehast, kuhu tuuakse iga päev tehnilisteks vajadusteks autotsisterni täis piiritust. Tehases on hiiglaslik paak, kuhu see piiritus valatakse. Paagi alumises otsas on kraan ja paagi kõrval istub arvepidaja, kes väljastab piiritust rangelt laoarvete alusel. Õhtul valatakse piirituse ülejääk sama kraani kaudu välja. Ja nüüd küsimus: kuidas varastada tehasesest piiritust?”

Tudengid on täiesti pöördes, pakuvad välja erinevaid versioone ...

„Aga nüüd vastus!” jätkab professor. "Insenerid panid paagi põhja pange. Kui hommikul paaki täideti, siis täitus ka pang. Kui õhtul piirituse ülejääk välja valati, siis tõsteti pangetäis piiritust paagi põhjast välja ja see jagati omavahel ära. Aga nüüd hakkame õppima, kuidas saada inseneriks!”

# ISC0100

# KÜBERELEKTROONIKA

---

Kevad 2025

Sissejuhatus signaalitöötlusesse , 2

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>

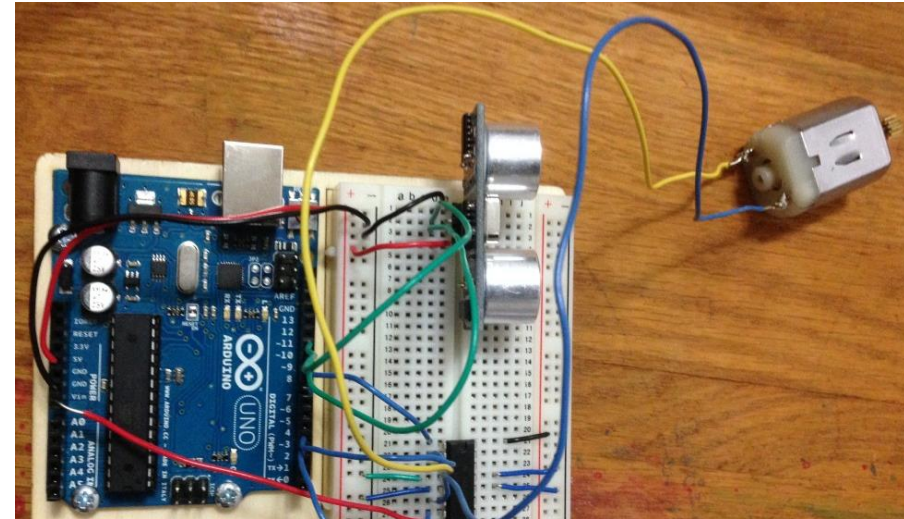
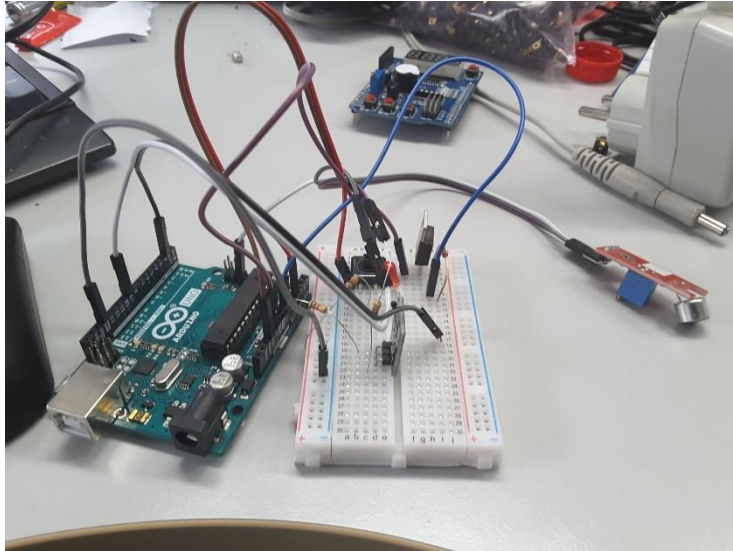
# Teemad

Elektroonika ja muu maailm.

- Analooq ja digitaalmaalma piirid
- Digitaal/Analooq (ja vastupidi) muundamine

# Kuidas ühendada seadmeid omavahel ?

- Sedasi ?

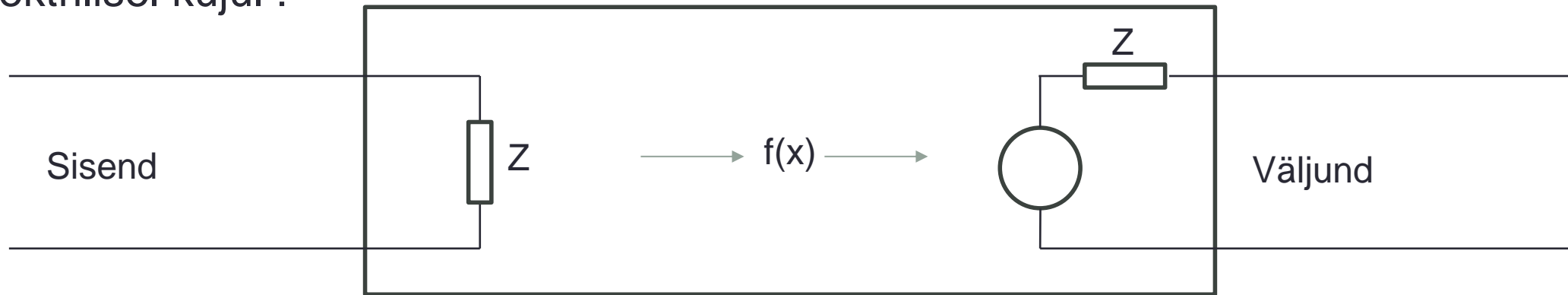


- Võibolla hakkab isegi tööle....
- Aga võibolla ei hakka, kuigi “skeem” on õigesti koostatud.

Tüüpilised väljakutsed elektroonikas, robotikas, sidetehnikas (ma ju tegin kõik õigesti aga ikka see ei tööta)

# Signaali ülekandeahel

- Meedia, kaksport, peaks paistma kasutajale nähtamatuna
- Ideaalsus : Lineaarne, kindel ribalaius . Häirevaba
- Sisend ja väljund võivad olla nii analoogis kui ka digitalis
- Elektrilisel kujul :



## Probleemid :

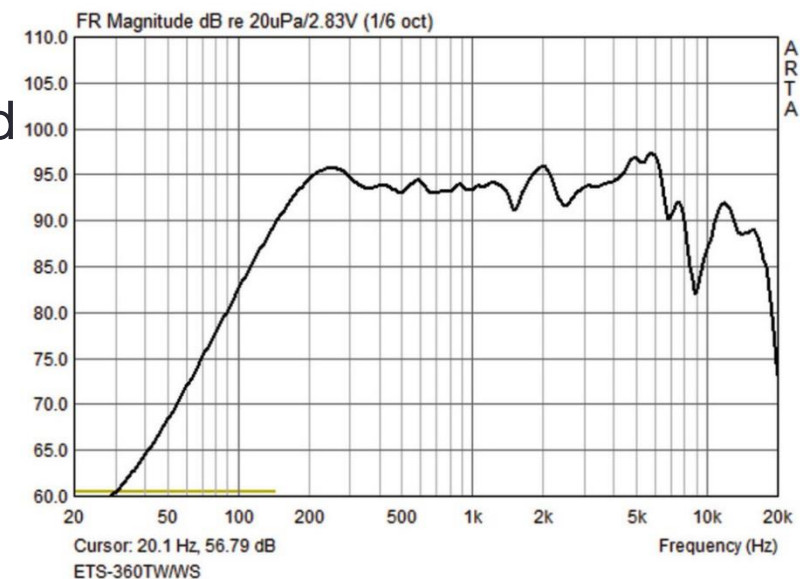
- Sagedusmoonutused (linearmoonutused)
- Mittelineaarsus (amplituudikarakteristik pole sirge)
- Lisanduvad häired ja mürad (aditiivne – liitub, multipikatiivne –korrutub )
- Müra – loodusliku iseloomuga lisanduv parasiitsignaali .
- Häire –tehisliku iseloomuga, kunstlik parasiitsignaali.

# Lineaarmoonutused

- Signaalile ei lisandu juurde mitte midagi sellist, mida seal enne polnud
- Iga signaali saab kirjeldada baassignaalide (sin või cos kaalutud summana)
- Muutuvad komponentide osakaalud (amplituudid, algfaasid)
- Teoreetiliselt on võimalik need hiljem kõrvaldada, lastes signaali läbi filtri, mis realiseerib täpselt vastupidist sageduskarakteristikut. Praktiliselt on see tülikas, isegi võimatu, eriti analoogtehnikas.
- Sageli tekitame lineaarmoonutusi tahtlikult juurde (tämbriregulaator, ekvalaiser)

$$s_{in}(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad i = 1, 2, 3 \dots, N$$

$$s_{out}(t) = \sum_{i=1}^N G_i A_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i + \theta_i) \quad i = 1, 2, 3 \dots, N$$



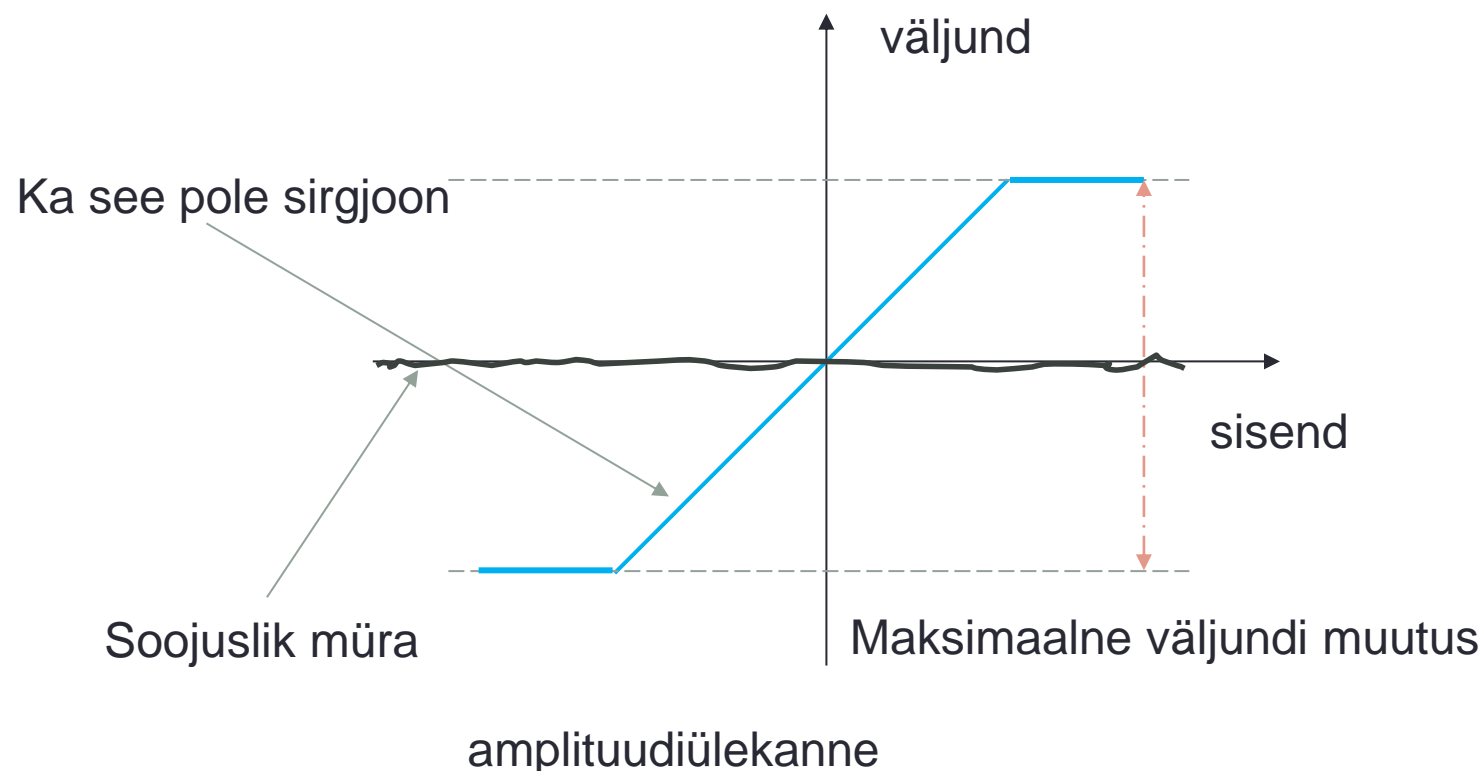
Kõlari helirõhu amplituudsageduskarakteristik  
Tootja : <https://monacor-international.com>



Heli edastuses moonutavad signaali kõige rohkem kõlarid ja kuulamiskeskond

# Amplituudi mittelineaarsus

- Ideaalne võimendi – väljund on rangelt võimendusteguri kordselt suurem iga sisendsignaali lubatud amplituudi – ning sagedusvahemikus.
- Ideaalset võimendit ei eksisteeri – võimendi võib teha üsna ideaalilähedaseks. Aitab sisemise negatiivse tagasiside kasutamine (kuni 0.0001 % mittelineaarsust, reaalselt 0.001...0.01). Opvõimenditega skeemid.



Selle tulemusel tekivad väljundisse signaalikomponendid, sagedused, mis sisendis puuduvad.

See on **mittelineaarmoonutus**, mida ei saa enam signalist hiljem kõrvaldada.

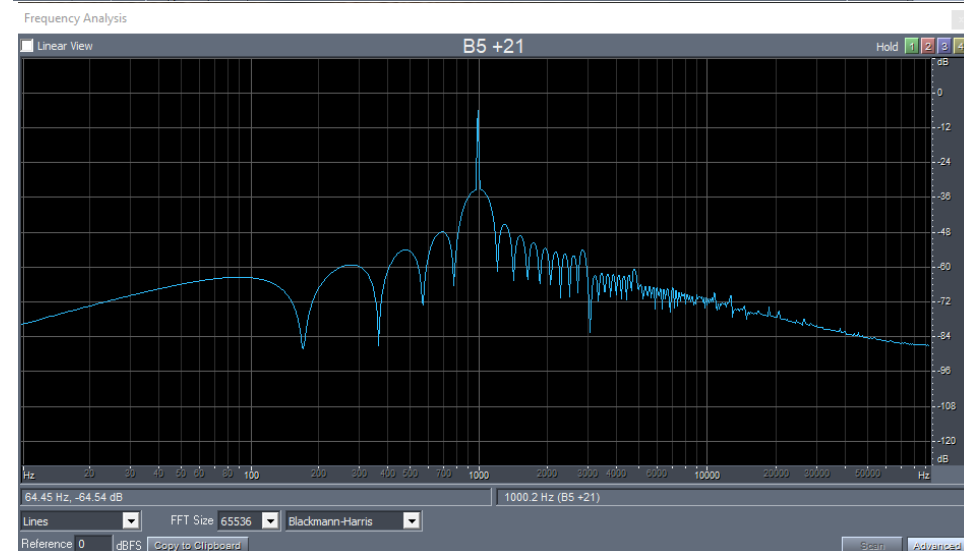
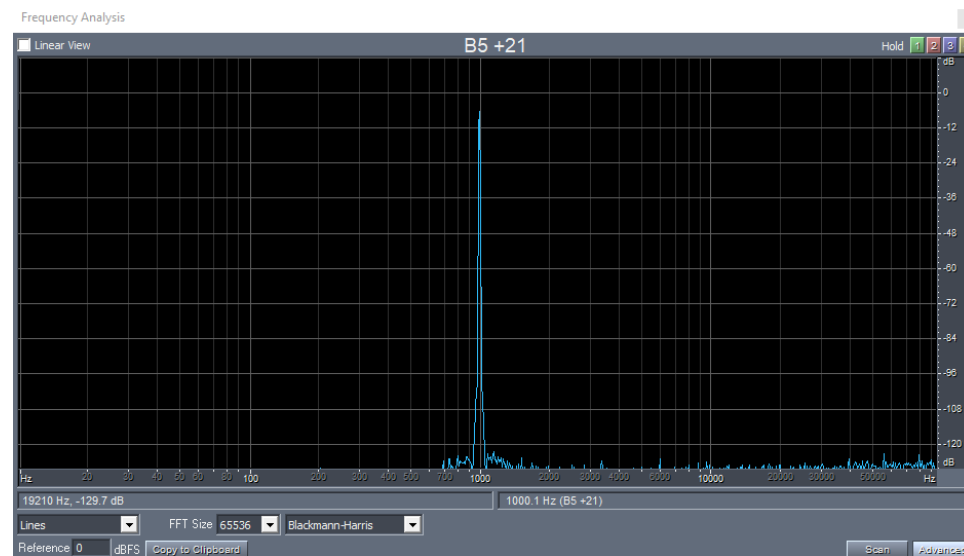
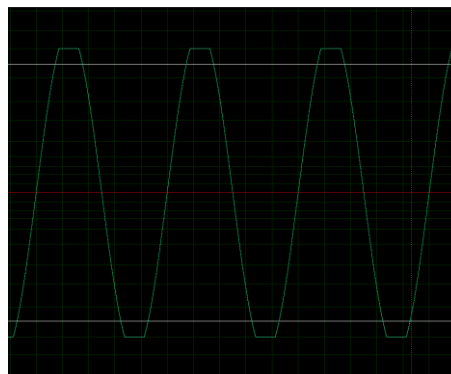
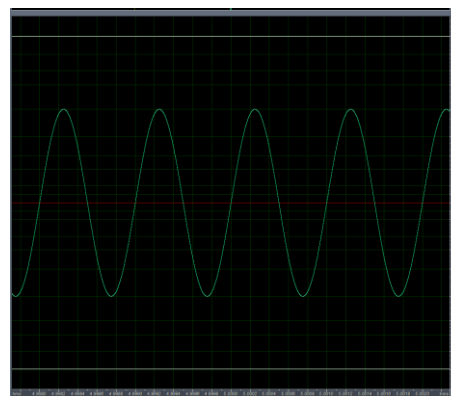
- THD (total harmonic distortion)

Sageli protsentides, kui palju lisandub muid komponente.

Mõnikord on need moonutused taotluslikud, Elektrooniline muusika, kirarriefektiplokid

# Mittelineaarmoonutus

- Anname võimendisse 1kHz siinus-signaali.
- Kui amplituud on piisavalt väike, signaal ei moonutu
- Suurendame amplituudi (maakeeli- keerame heli valjemaks) – tipud lõigatakse ära
- Juba väiksel äralõikamisel (siin 1 dB) tekivad silmaga nähtavad lisakomponendid



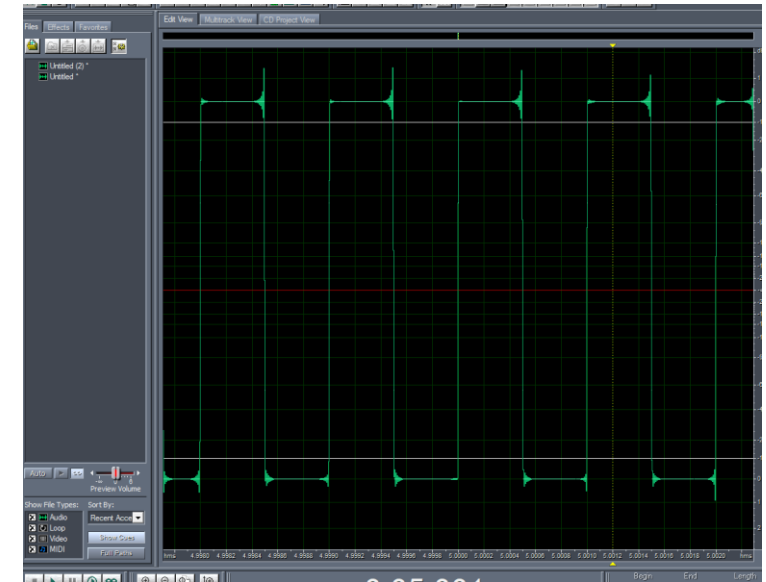
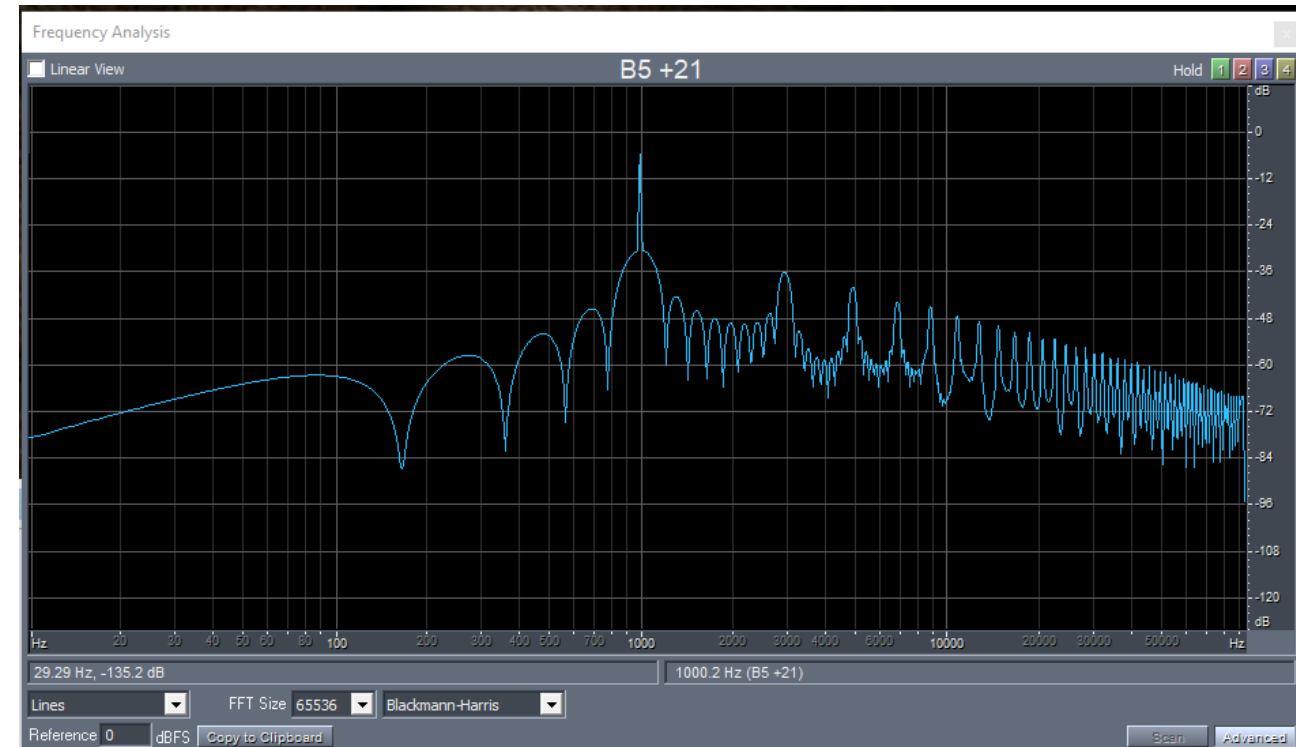
$$\sin(\omega t) + n_1 \sin(3\omega t) + n_2 \sin(5\omega t) + n_3 \sin(5\omega t) + \dots$$



# Mittelineaarmoonutus

- Suurendame sisendpinget veel , mingist hetkest muutub väljund nelinurga sarnaseks
- On selgelt näha, et signaali on lisandunud kolme, viie, seitsme ühheksa...jne kordne sageduskomponent
- **Hiljem neid eemaldada ei saa** , (tegelikult saab, aga siis eemaldame ka selle, mis oli algses signaalis)

$$\sin(\omega t) + n_1 \sin(3\omega t) + n_2 \sin(5\omega t) + n_3 \sin(5\omega t) + \dots \dots$$



# Mitelineaarmoonutus ja matemaatika

- Iga signaal on summa tema baassignaalistest (harilikult siinus või kosinus)

$$s_{in}(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, N$$

Lineaarsel töötlemisel toimub see : Kuigi, iga komponendil mõjutatakse amplituudi ja faasi (aga seda me tahame)

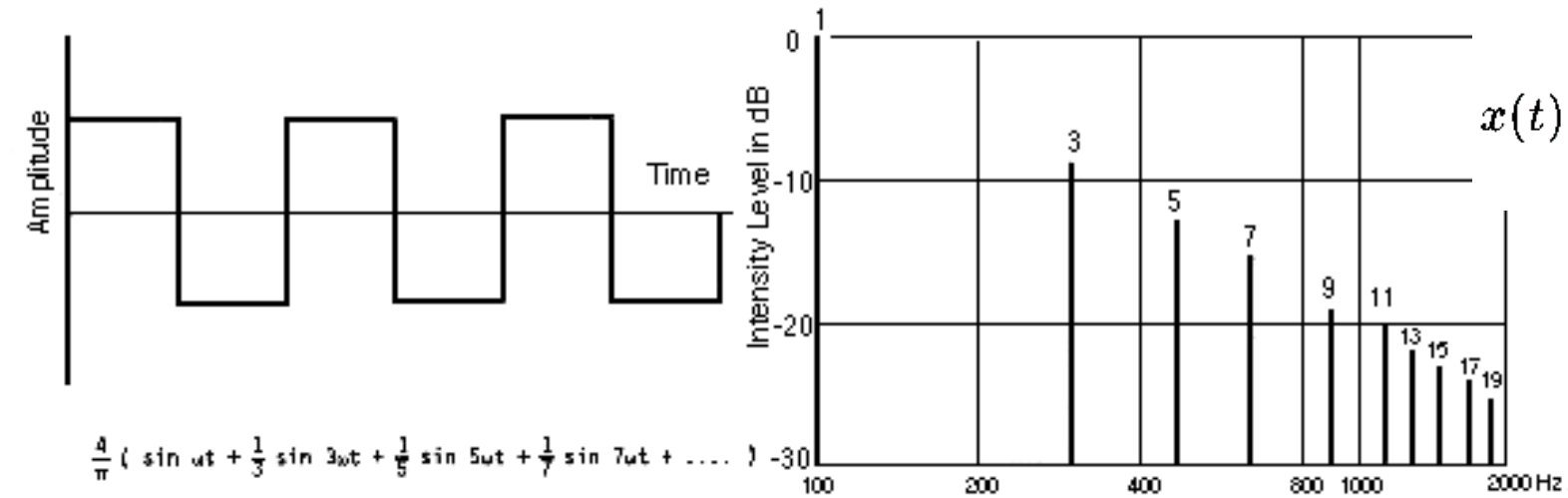
$$s_{out}(t) = \sum_{i=1}^N G_i A_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i + \theta_i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, N$$

Mittelineaarsel aga lisanduvad juurde komponendid: Millised ja kui palju, sõltub amplituudkarakteristikust

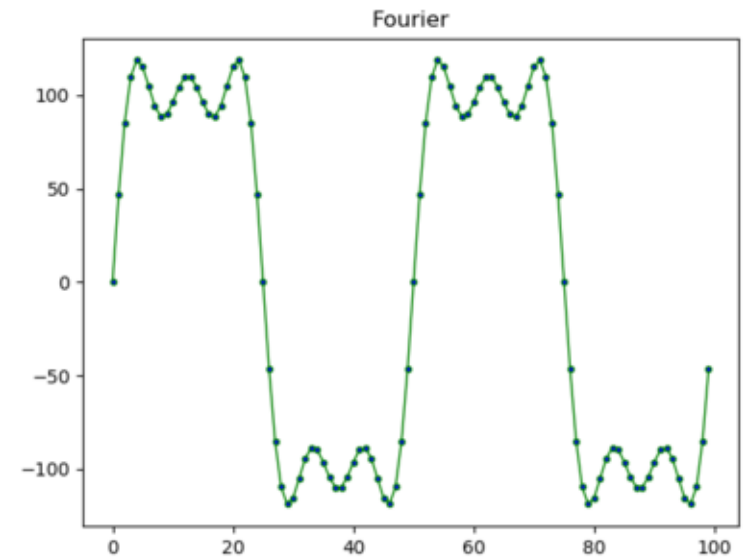
$$s_{out}(t) = \sum_{i=1}^N G_i A_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i + \theta_i) + \sum_{k=N+1}^M A_k \cos(2\pi f_k t + \varphi_k)$$

Võimendi ületüürimisel muutub signaal “kandilisemaks”, seepärast lisanduvad paaritud harmoonilised (spekter lõpmatu)

# Nelinurksignaali spekter



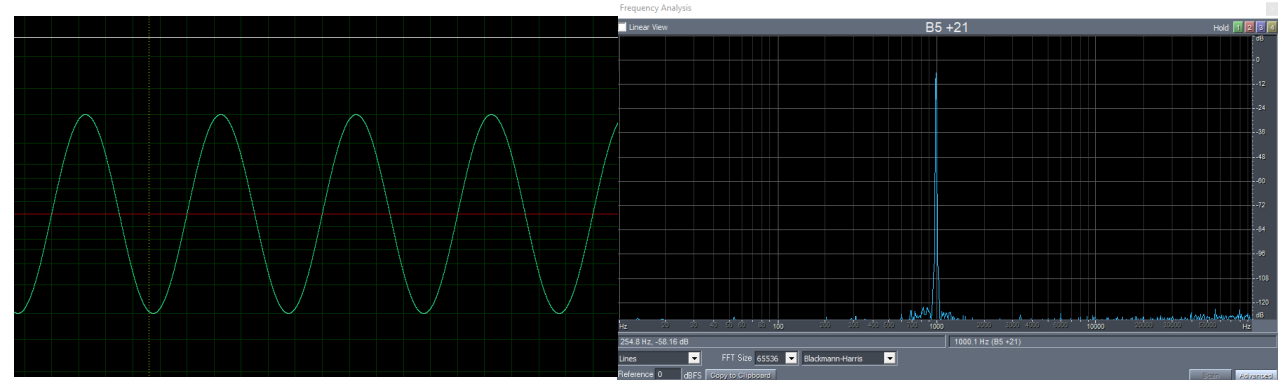
$$x(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2k-1} \sin(2\pi(2k-1)t)$$



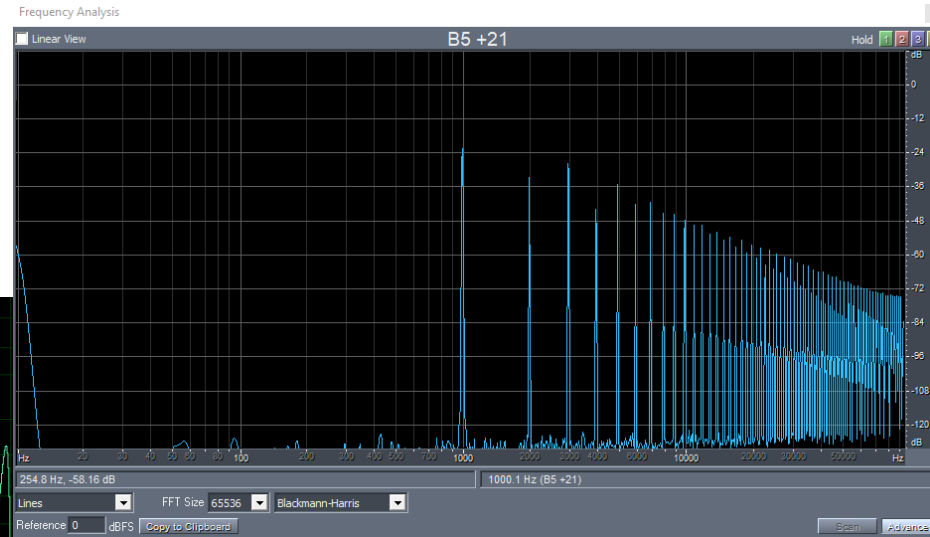
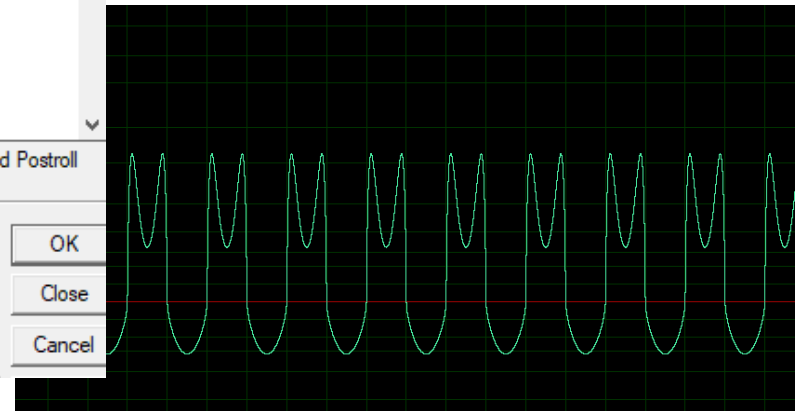
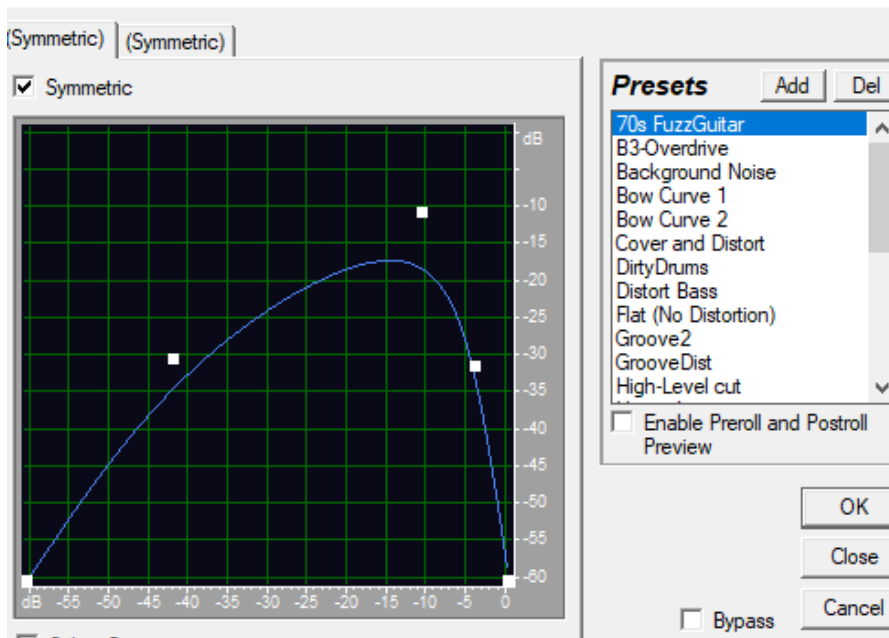
Kolm esimest harmoonilist

# Mittelineaarmoonutus

- Tegelikuses ei ole ka “lineaaralas” võimendus lineaarne
- Väike “liialdus”, et oleks paremini näha (kitarriefekt)



Sisend



Väljund

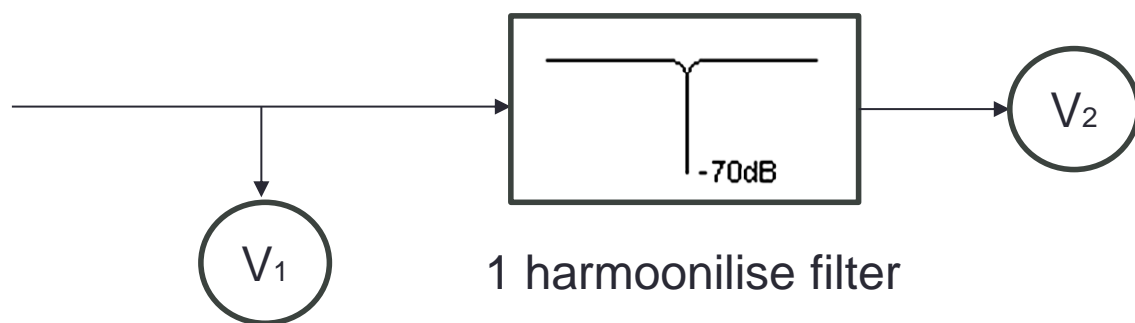
# Mittelineaarmoonutuste mõõtmine

- Idee – mõõtetakse lisandunud spektraalkomponentide osakaal

- $THD(\%) = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} * 100\%$  , kus  $V_1$  on esimese harmoonilise amplituud ,  $V_2 \dots V_n$  järgmiste harmooniliste amplituudid

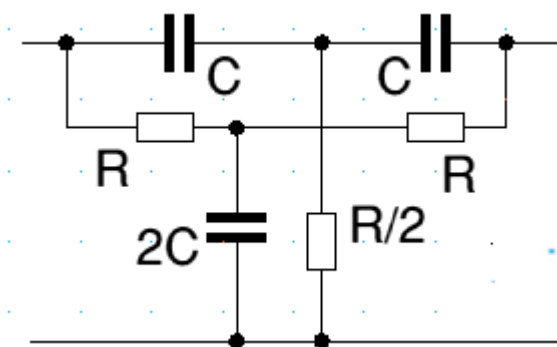
- Spektrianalüsaatoriga mõõtmine tänapäeval lihtne, saab ka  $THD + N$

- Analoogetehnika :  $THD + N (\%) = \frac{V_2}{V_1} * 100\%$  , N on müranivoo, mis liitub juurde



Kui valida komponendid sedasi on tõkkesagedus:

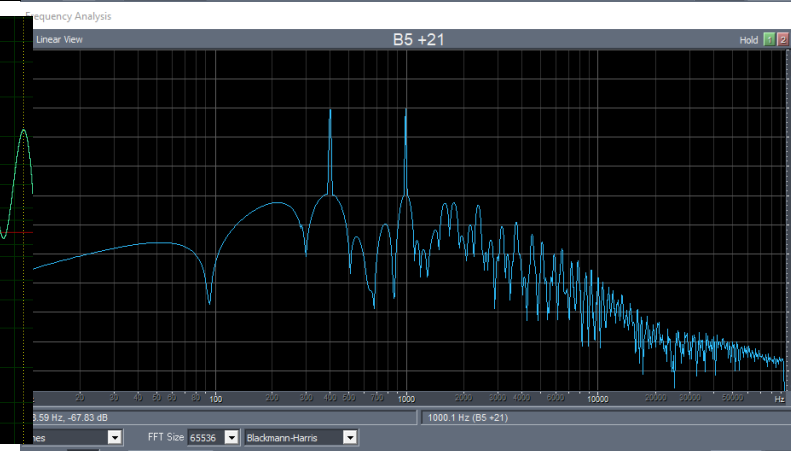
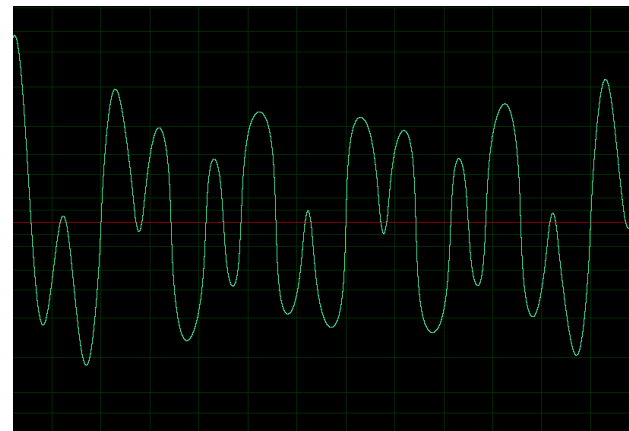
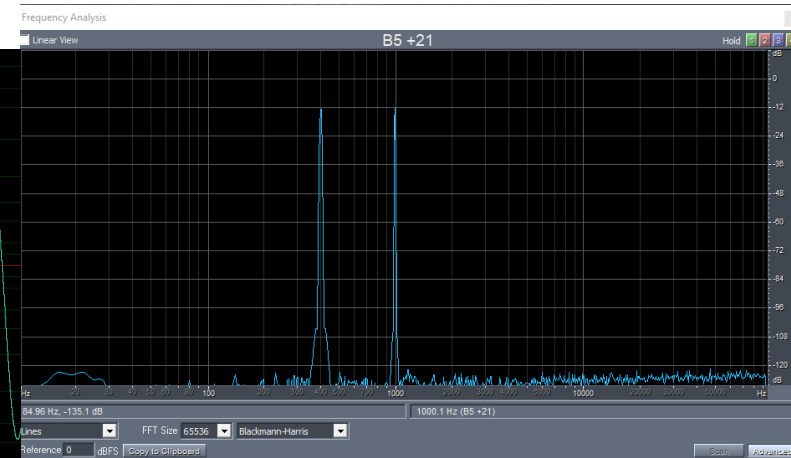
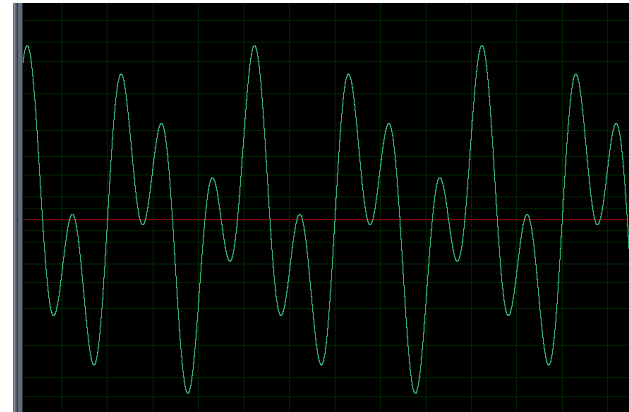
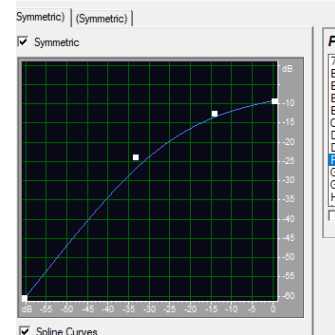
$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$



Topelt T ribatõkkefilter

# Intermodulatsioonimoonutus (IMD)

- Reaalne signaal sisaldab palju erinevate sageduste ja algaasidega komponente. Need on juhuslikud, vastavalt edastatava info omapärale.
- Keskkonna mittelineaarsuse tõttu need komponendid korrutuvad ja moduleerivad teineteist.
- Näide – sisendis sagedused 400 Hz ja 1 kHz
- Lisame vaid väikese mittelineaarsuse (tavalise võimendi amplituudkarakteristik)



Tulemusena tekivad kõikvõimalikud kombinatsioonid mõlemast signaalist, ka **alamharmoonilised**, kostuvad need kõlarist sageli hägusa, dissonantse bassihelina.

Kvaliteetses helisüsteemides on seetõttu bassikõlar teistest eraldi

# Mürad

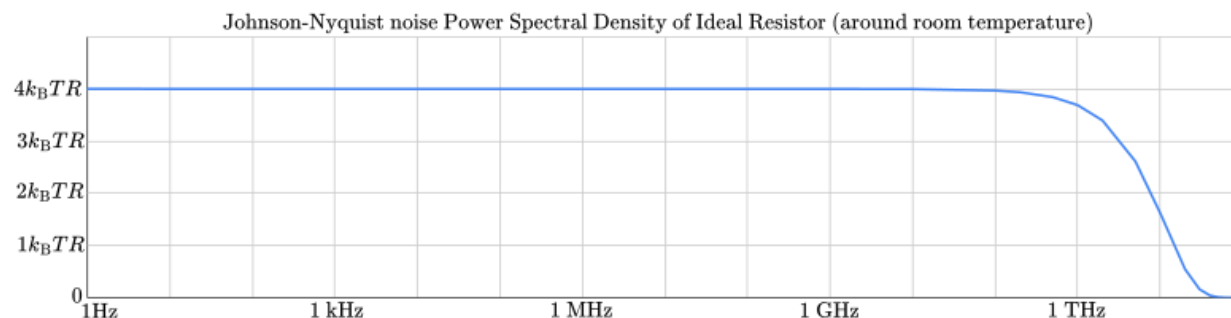
- Kasulikule signaalile (infole) lisanduv parasiitsignaal (info). Kõikvõimalik tahtmatu signaal.
- Aditiivne : signaali hetkväärtustele liituvad soovimatud hetkväärtused.
- Multiplikatiivne : signaali hetkväärtused korrutuvad juhuslike soovimatute hetkväärtustega
  
- Signaali /müra suhe (harilikult detsibellides , näitab signaali kasuliku võimsuse ja müravõimsuse suhet (SNR - signal to noise ratio)
  
- $SNR (dB) = 10 \log \frac{P_S}{P_N} = 20 \log \frac{V_S^2}{V_N^2}$
- Kõrgekvaliteetne heliülekanne (>60 dB... 1000 korda pinge järgi ) , odavad muusikakeskused kõigest 20..30 dB , digitaalsides vahest kõigest vaid 3..10 dB
  
- Minimaalse (eristub veel mürast) ja maksimaalse võimaliku signaalitaseme suhe määravad ära dünaamika (harilikult antakse detsibellides)

# Soojuslik müra

- Analoogetehnika suur probleem , lisaks mittelineaarsusele.
- 1927 Jonson –Nyquisti müra. Eksisteerib kõikjal ja mitte ainult elektiahelates, seotud osakeste liikumise mittekorrapärasusega
- Piirab ära signaalide minimaalsed nivood (raadioside, analoog(heli)salvestus,jne )
- Pinge väärtus piiratud sagedusribas avaldub:

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{V_n^2} = \sqrt{4k_B T R \Delta f}$$

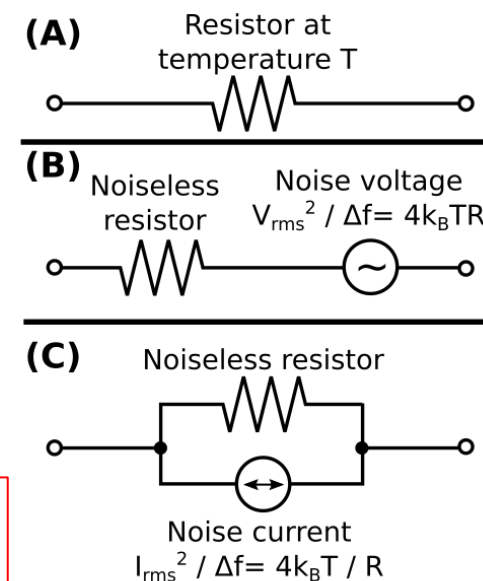
Müra lisandumine antakse ka detsibellides  $N_F$  , Noise Figure , elektroonikakomponentidel



Takisti müraspekter, (Wikipedia)

3kΩ takisti tekitab toatemperatuuril soojusliku müra sagedusvahemikus 20 kHz umbes 1 μV.

Mürapinge ühik :  $V\sqrt{Hz}$

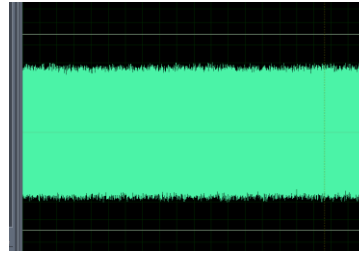


Takisti aseskeemid

Kus  $k_B$  on Boltzmanni constant, T absoluutne temperatuur, R takistus ja  $\Delta f$  vaadeldav sagedusvahemik

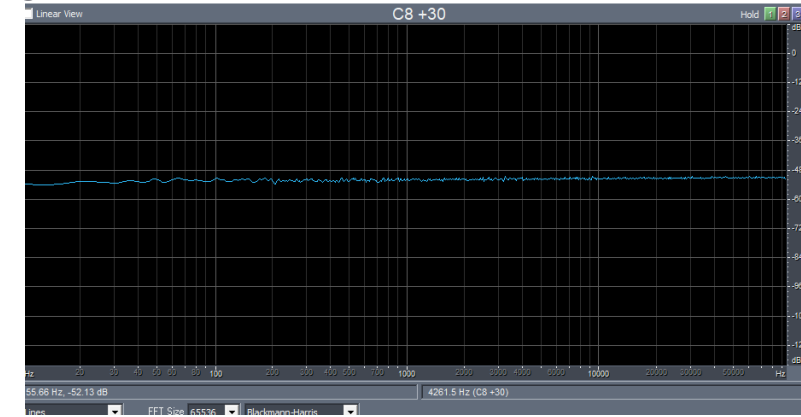


# Mürageneraatorid

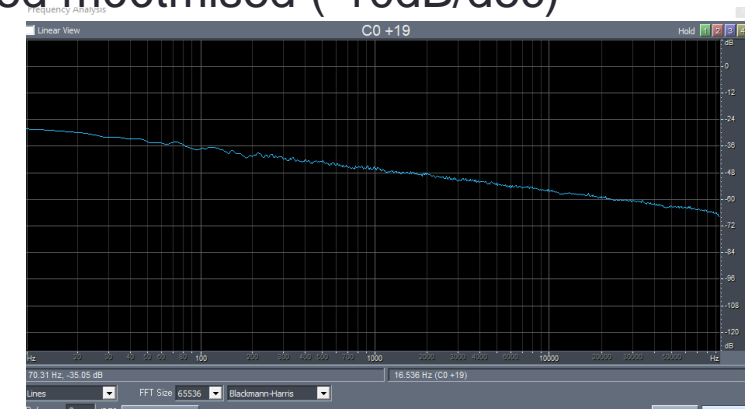


- Kasutatatakse suure mürateguriga komponenti (nt vastupingestatud stabilitron läbilöögi lähedal, transistor “valepidi”)
- Spektrianalüüs
- Elektrooniline muusika
- Raadioside segajad
- Juhuslikud arvud → Analoogmüra digiteerimine (statistika, teadusuuringud, hasartmängud, krüptograafia ) Digiteerimises pole juhuslikkus võimalik (pseudojuhuslikkus on)
- Müraspektri intensiivsuse järgi (võrreldakse valguspektriga ) , on saanud värvide nimetused. Levinumad on valge, roosa ja pruun müra. Saavutatakse filtritega.

Valge müra – spekter ühtlaselt täidetud



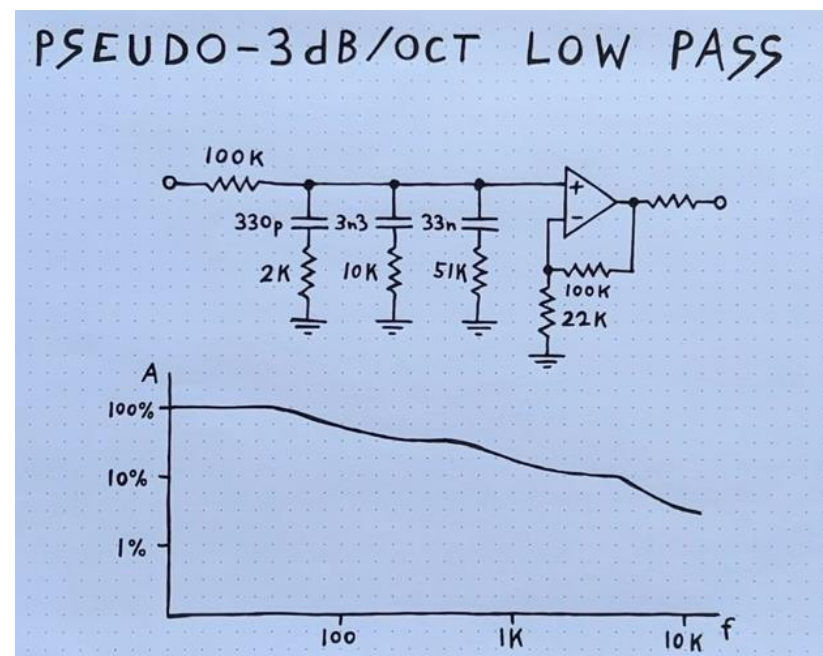
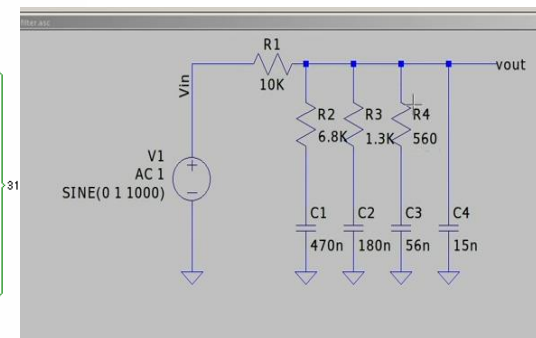
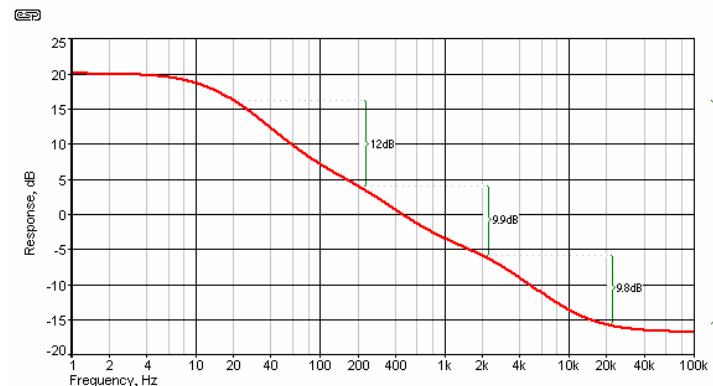
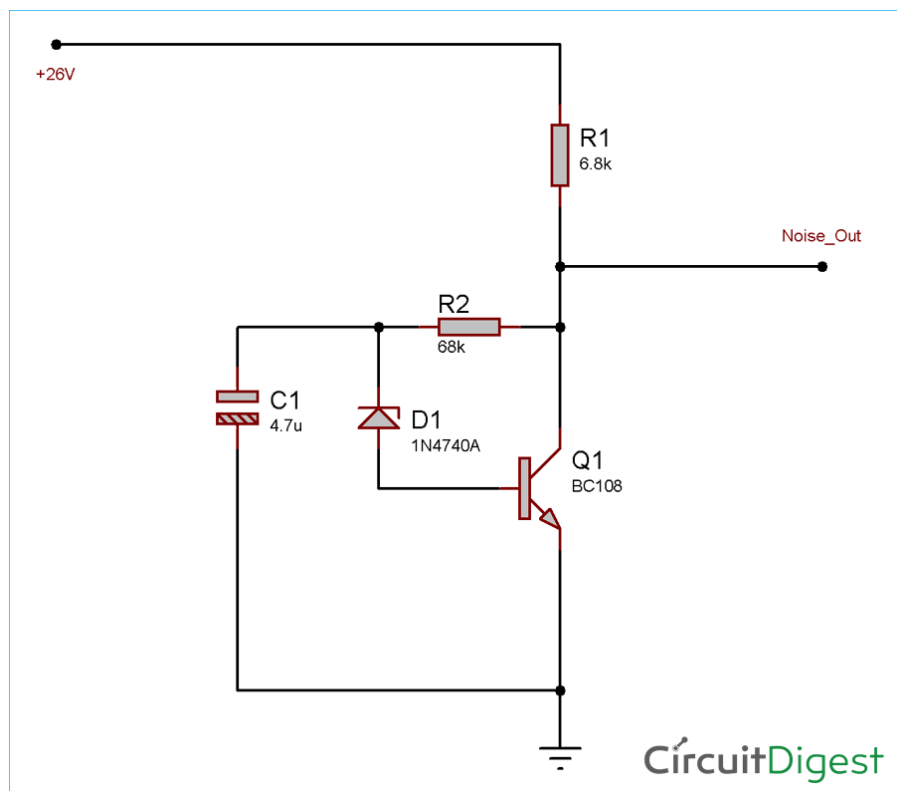
Roosa müra – madalatel sagedustel intensiivsus suurem (arvestatud inimese kuulmisega – tundub kõrvale ühtlane- akustilised mõõtmised (-10dB/dec)



Pruun (ka punane) müra – madalatel sagedustel intensiivsus veelgi suurem (-20 dB/dec)

# Valge müra generaator

- Skeeminäide



Roosa müra filter (-10dB/dec) , 0,5 järku integraator !!!  
[https://www.youtube.com/watch?v=0yB\\_h\\_wFkh4](https://www.youtube.com/watch?v=0yB_h_wFkh4)

# Madala müraga analoogblokkide disain

- Astmete kaskaadühendusel korrutuvad ABCD ülekandemaatriksid (sh võimendustegurid) . Ehk iga eelneva astme soojuslik müra võimendatakse järgmises astmes edasi, sinna lisandub ka järgmiste astmete müra.
- Seetõttu ei optimeerita võimendite sisendastmed (mõõtetehnika, helitehnika, raadiotehnika) mitte võimenduse vaid mürateguri järgi.
- Valitakse selline režiim, kus lisanduv müra on minimaalne , kuigi üldine võimendus ei pruugi olla optimaalne.
- **Valitakse mürateguri järgi kõik komponendid, sh takistid ja kondensaatorid.**
- Need on ka keskmisest kallimad
- Vajadusel toimub võimendi jahutamine (tundlikud mõõteseadmed)

# Häired

- Parasiitsidestuse kaudu lisanduv signaal kõrvalahelast , ka läbi raadiolainete.
- Ka läbi toiteahelate ja halva disaini tõttu.
- Kõik juhtmed, trükirajad on induktorid - antennid, omavad lõplikku takistust ja omavahelist vastastikust induktiivsust ja mahtuvust

Seetõttu **EI TOHI** :

- Segamini trükkplaadil (ja ka juhtmepundis) vedada analoog ja digitaalvahelaid
- Segamini vedada tugev ja nõrkvooluahelaid (nii analoog kui digitaal).
- Kasutada ühist “maajuhet” (olgu, kui tegu on vaid digitaalplaadiga, siis võib)
- **Varjestus”maas” ei tohi joosta vool !**

# Nõrga signaali allikate ühendamine

Mikrofonid, magnetpead-andurid, aga ka termopaarid jms .

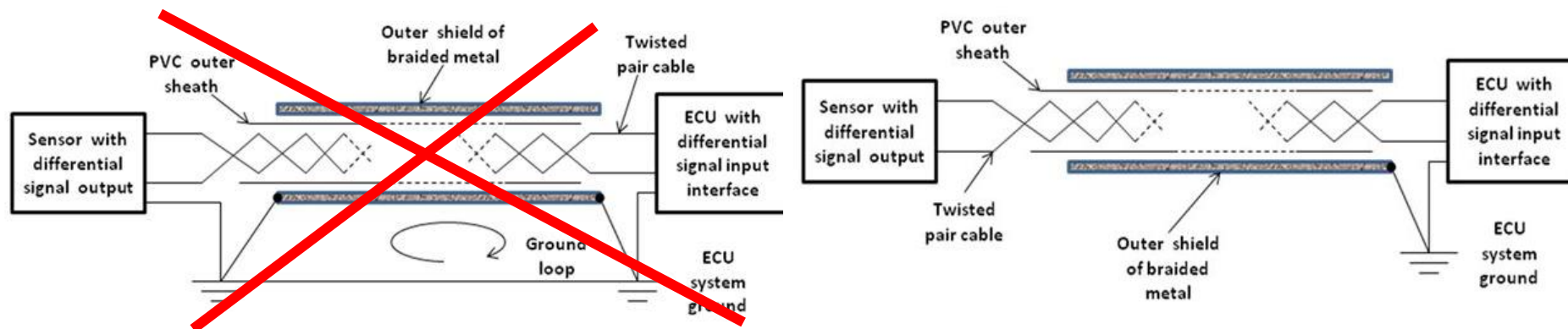
- Varjestada välise magnetvälja eest ! Voolu indutseerib juhtmes samamoodi nii kasulik magnetvälja muutus kui ka välise magnetvälja muutus.
- Paigutada tundlikud elektromagnetilised allikad võimalikult kaugemale trafodest, induktoritest, mootoritest ning tugeva vooluga juhtmetest , samuti digitaallülitustest. Vajadusel tuleb needki varjestada !
- Vaskplekk varjestab elektrivälja, raudplekk lisaks ka magnetvälja.



<https://www.youtube.com/watch?v=PY061qeM8xA>

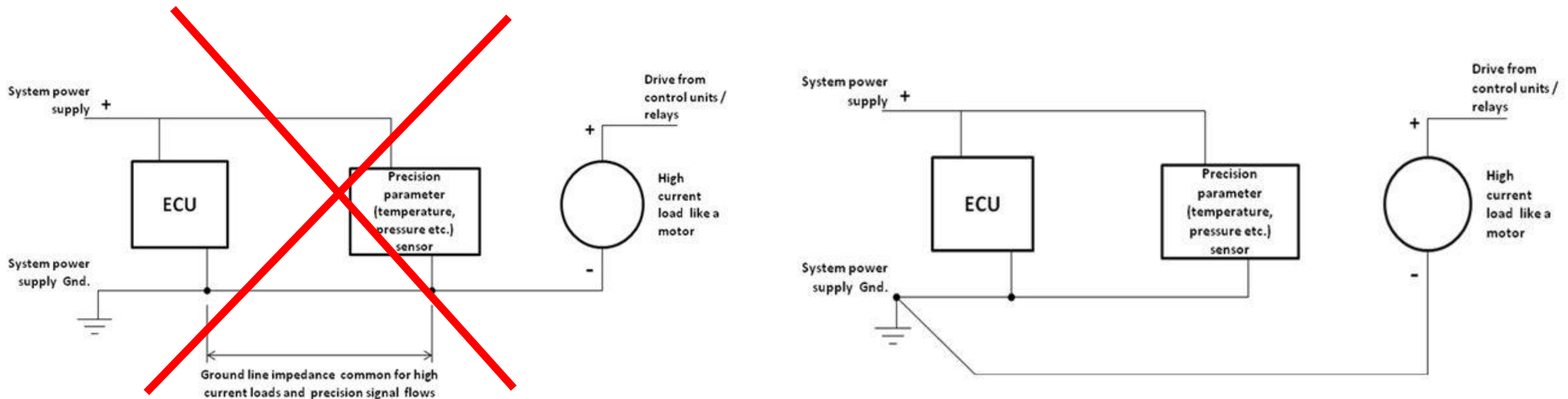
# Nõrga signaali allikate ühendamine

- Austa Kirchhoffi seadusi ja probleemide hulk väheneb !
- Varjestuses ei tohi signaal liikuda !
- Kuigi allika üks ots võib olla „maa“ tuleb see ühendada „maaga“ alles võimendusastme juures.
- Võimalusel kasutada difrentsiaalvõimendit ja sümmeetrilist ühendamist.
- Väldi “maasilmuseid” (ground –loop)



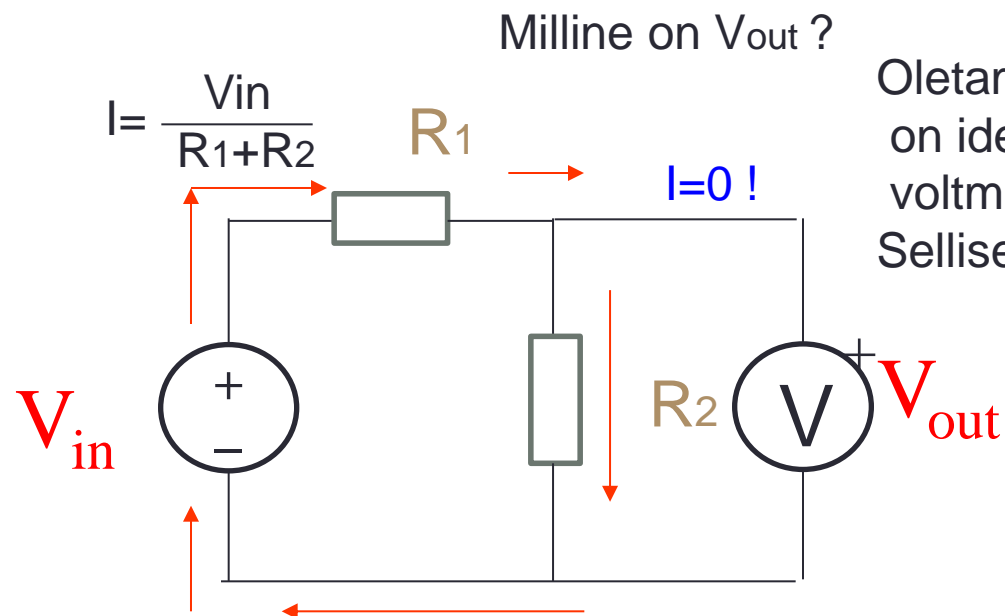
# Nõrga signaali allikate ühendamine

- Väldi tugev- ning nõrgavooluahate ühiseid maajuhtmeid ! Ka digitehnikas !
- Tavaline eksimus algajatel inseneridel, aga ka kogenutel.
- (kõige tavalisem sümptom – vigane infoedastus teatud olukorras)





# Juhtmete mõju



Oletame arvutustes, et allikas ja mõõtur on ideaalsed ( pingeaallikas on lühis ja voltmeeter tühis).  
Sellisel juhul **voltmeetrit läbiv vool on 0.**

Ahelas tekkiv vool läbib mõlemat takistit ja avaldub Ohmi seaduse järgi :  $I = \frac{V_{in}}{R_1 + R_2}$

Takistil  $R_2$  tekib pinge  $V_{out}$  :  $V_{R_2} = V_{out} = I * R_2$  Asendades sisse voolu, saame, et

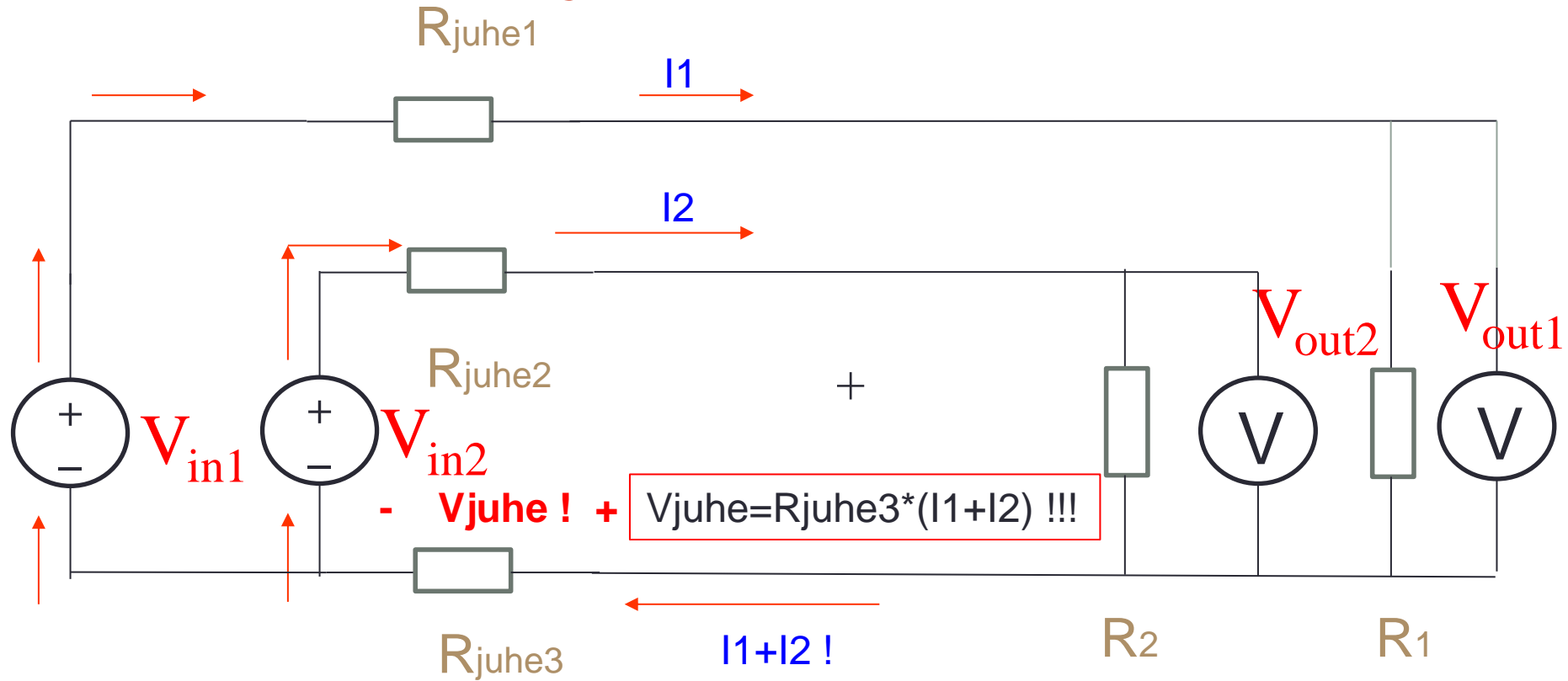
$$V_{R_2} = V_{out} = R_2 * \frac{V_{in}}{R_1 + R_2}$$

Ülekanne avaldub sellest:

$$K = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



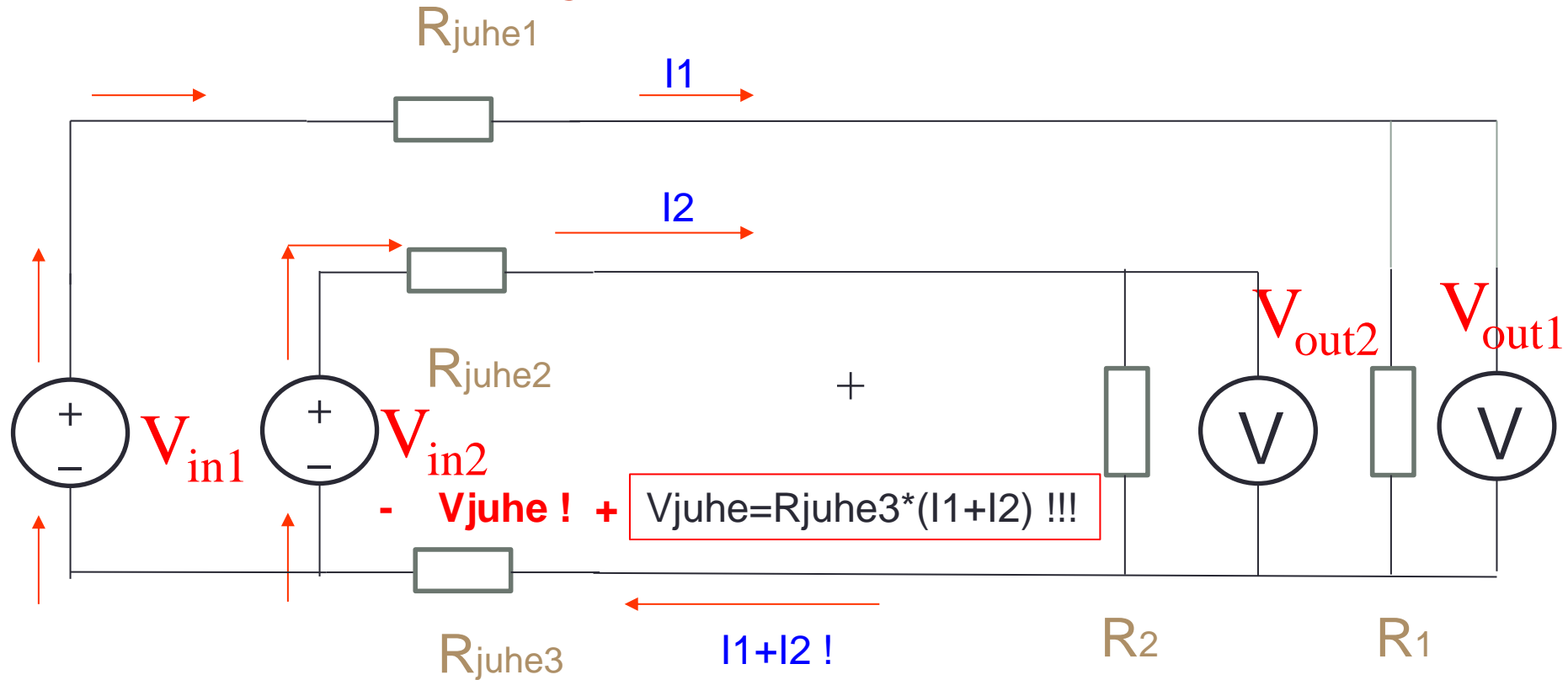
# Juhtmete mõju



Soov on, et  $\frac{V_{out1}}{V_{in1}}$  ja  $\frac{V_{out2}}{V_{in2}}$  oleks teineteisest sõltumatud (ja võimalikult lähedased 1-le). Tegelikkus on aga :

$$V_{out1} = \frac{V_{in1} * R_1}{R_1 + R_{juhe1} + \frac{R_{juhe3}(R_{juhe2} + R_2)}{R_{juhe3} + R_{juhe2} + R_2}} - \frac{V_{in2} * R_{juhe3}}{R_2 + R_{juhe2} + R_{juhe3}}$$

# Juhtmete mõju



Näiteks,  $V_{in1}$  on toiteallikas, pinge 12 V, juhtmete takistus 0.1  $\Omega$ , koormuse  $R_1$  takistus on 10  $\Omega$  (näiteks mootor).

$V_{in2}$  on anduri väljundpinge, suurusjärgus 1 mV,  $R_2$  (võimendi sisendtakistus 10 k $\Omega$ .)

$V_{in1}$  põhjustab takistil  $R_2$  pinge -117 mV !

# ANALOOGIST DIGITAALSEKS

---

Ja vastupidi

# Komparaator

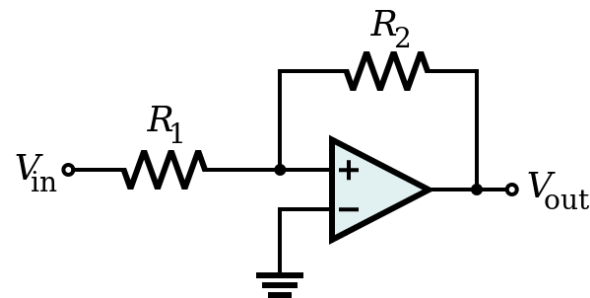
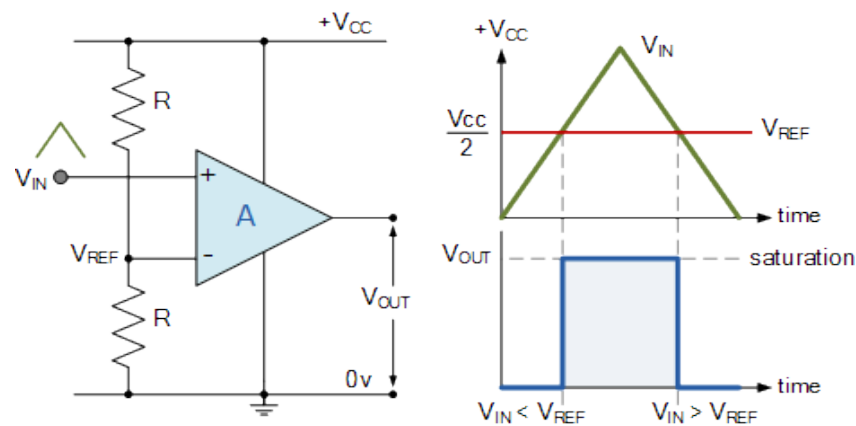
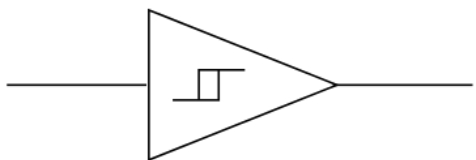
- Töö sarnaneb OV tööga, sageli kasutataksegi OV-d
- Kõige lihtsam 1 bitine A/D muundur
- Kui lisame positiivse tagasiside, saame Schmitti trigeri

Väljund:

- Kõrge (1) kui  $V_{in} > V_{ref}$
- Madal (0) kui  $V_{in} < V_{ref}$

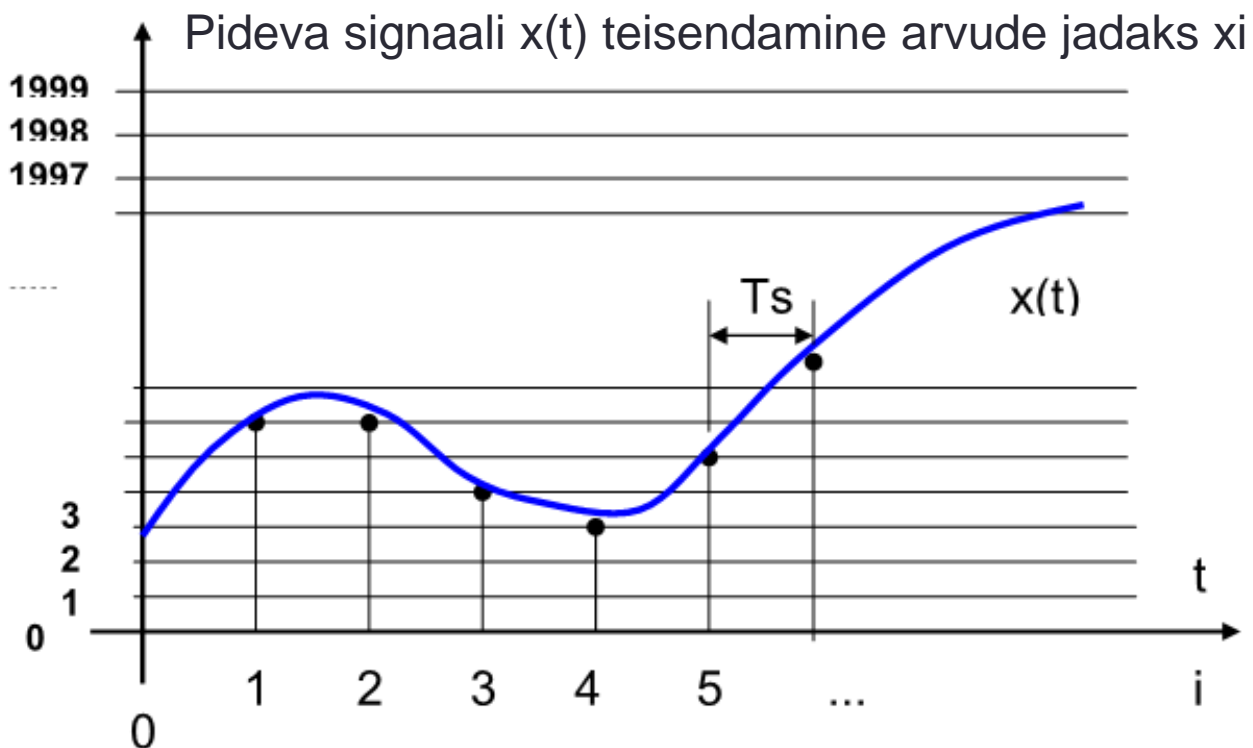
Veel kasutusala:

- Signaali nullist läbimise detektor
- Digisignaali müra puhastaja



# Analoog-digitaalmuundur

- Digitaalsignaali eelis – Häirekindlus, probleemid tekivad muundamisel, töötlemisel
- Suuremad vead on seotud ebapiisava muunduskvandi ja aja valimisega



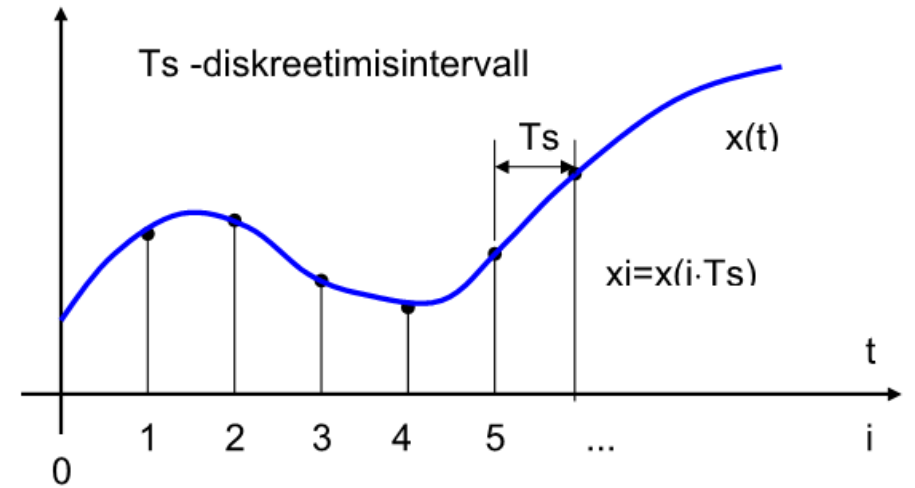
Meie EI TEA, mis toimub signaalikvantide ja ajakvantide vahel  
Kas need kvandid on ühesugused ?  
**Lõplik** arv väärtusi väljundis.

# Diskreetimine

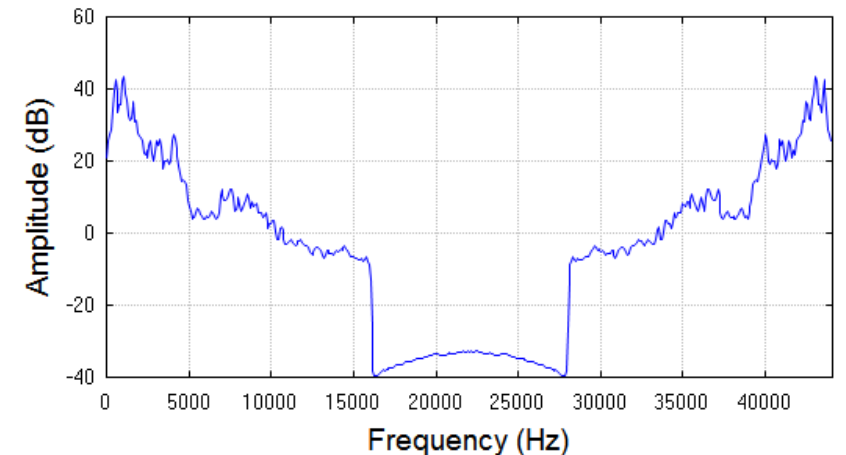
Pidevate signaalide  $x(t)$  esitus arvude jadana  $x_i$ ,  $i=1, 2, 3, ..$

Kui signaali spektris on maksimaalne sagedus  $f$ , siis tuleb  $F(f)$  diskreetimisintervall  $T_s$  valida tingimusest:  $T_s \leq \frac{1}{2f}$  ehk  $F_s > 2f$ .

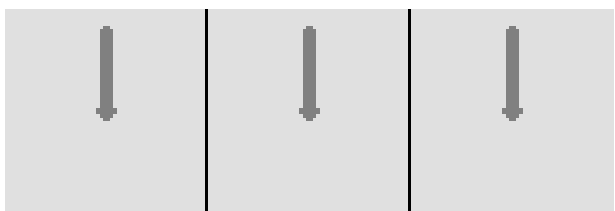
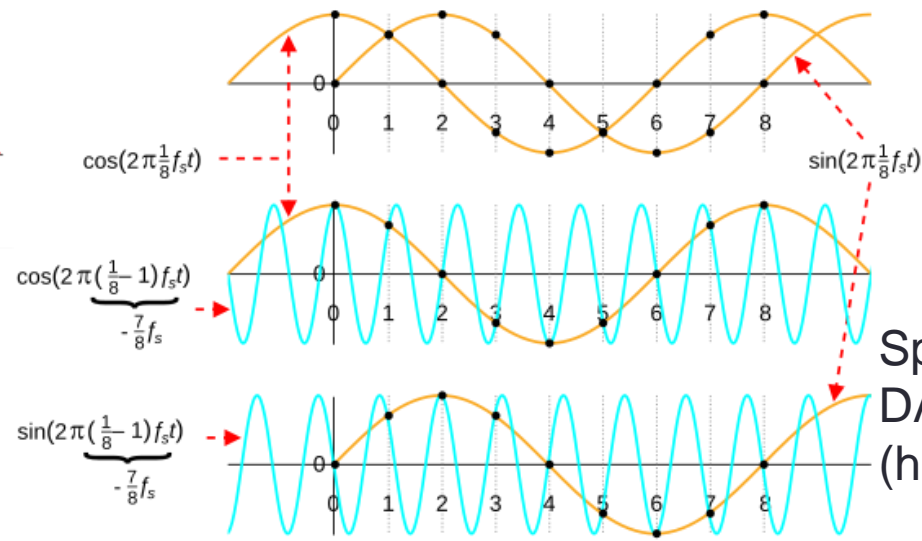
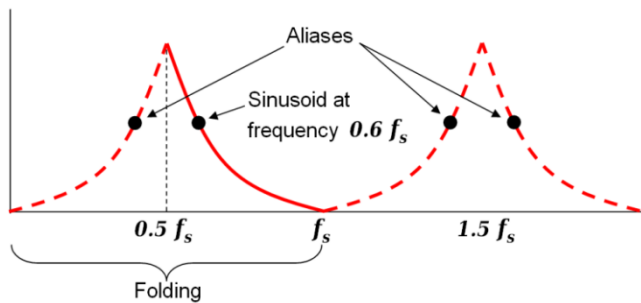
Kui ei ole täidetud, tekivad moonutused – kõrgemad sagedused “peegelduvad” allapoole (tekib alias, Nyquist–Shannoni teoreem),



Spectral folding, caused by sampling



Spektri peegeldus (murdumine) 44.1 kHz DA muundamisel, väljundfiltrita (helitehnika)



# Diskreetimine

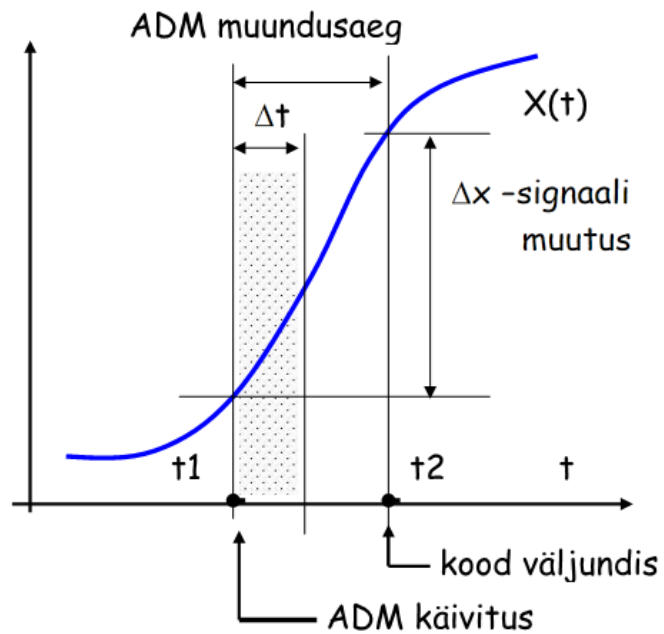
Lahendus – tuleb enne AD muundit lisada filter, mis eemaldab kõik selle, mida muundada pole vaja. Sageli on see filter muunduri mikroskeemi sisse ehitatud, aga ei pruugi alati olla. NB Arduinol see puudub ! Enamike rakenduse jaoks teist järku filtrist piisab, jättes muundussageduse ja löikesageduse vahele veidi ruumi.

Samasugune filter on vajalik ka DA väljundis, et treppsignaal muuta sujuvaks.

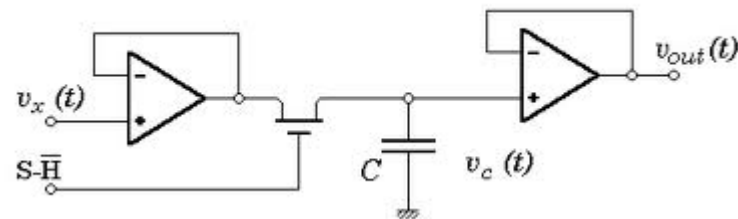
Ajamoonus – Ts pole ühtlane ajas (Jitter), ka faasimüra , ehk diskreetimisajad on erinevad. Oluline see kõrgetel sagedustel (andmeedastus, video ), signaali tekivad amplituudi ja faasimoonused. Määratud taktigeneraatori täpsusega. AD ja DA taktisagedused erinevad alati vähesel määral (kui muundamist ei tehta sünkroonis)  
Analoogtehnikas avaldub ajamoonus salvestamisel liikuvale kandjale (detonatsioon, heli “ujub”, vale kiirus)

# Muundusaeg

- **Muundusaeg** . Signaal ei tohi muundamishetkel muutuda



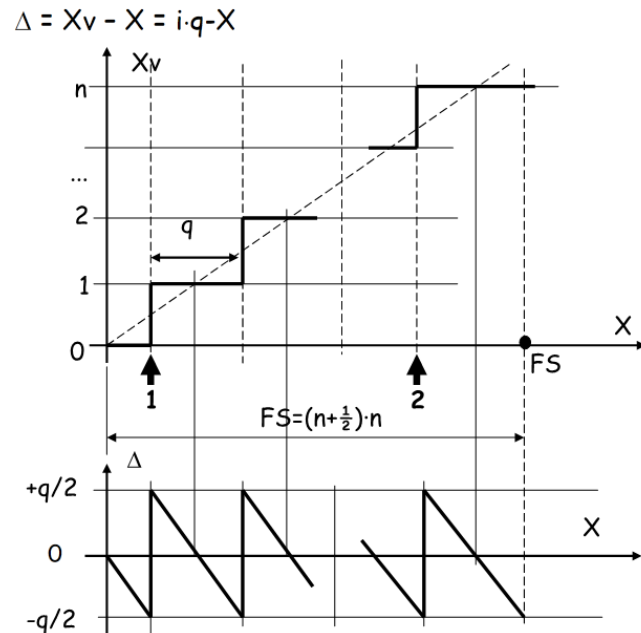
Fikseerida  $X(t)$  väärtused kindlatel ajahetketel ja teha siis ADM-ga muundamine. (**sample & hold**)



Signaal  $X(t)$  muutub ajas. Tulemus saadakse ajahetkel  $t_2$ , see vastab signaalile mingil eelneval ajahetkel, seda hetke on raske fikseerida täpselt, eksisteerib ebamäärasus  $\Delta t$  nn. "apertuuriaeg".

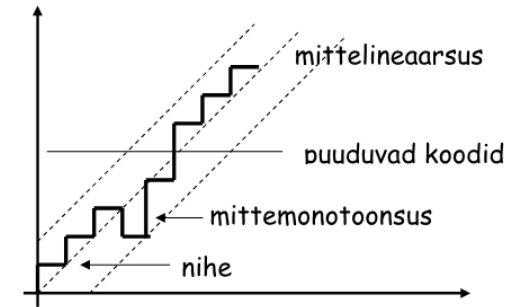


# Kvantimine



Signaalile (reaalarvule  $X$ ) seatakse vastavusse väljundsignaal (ratsionaalarv  $m/n$  ehk täisarv kvante  $i=1/n$ ).

Mõõtepiirkond (Full Scale) on sisendsignaali vahemik kus viga  $\Delta$  ei välju piiridest  $\pm q/2$  ning on väärtusega  $FS = (n + 1/2) \cdot q$  nn. „täisskaala“)



Kvantimisvead – kvant  $q$  ei ole ühtlase väärtusega kogu piirkonnas (nonlinearity – vt andmelehti)

Puuduvad koodid ja mittemonotoonsus – tänapäeval praktiliselt ei esine

Põhjustavad signaali mittelineaarset muundamist (mittelineaarmoonutus)

Nii AD kui ka DA muundamisel

Parim karakteristik koostatakse järgmiselt:

(sisendsignaali on pidev suurus, väljundsignaal – diskreetne.

sisend ja väljundsuurusi mõõdetakse kvantides  $q$ )

- sisendi väärtusel 0 on väljund 0 - sisendsignaali  $q/2$  muutub väljund  $q$
- sisendi muutudes  $q$  võrra muutub väljund  $q$  võrra.

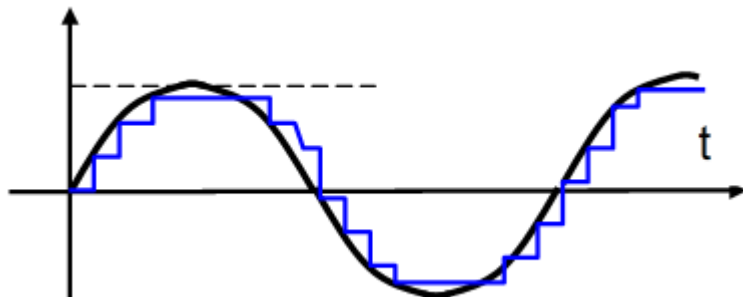
# Kvantmüra

Järkude arv  $n = \log_2(N)$

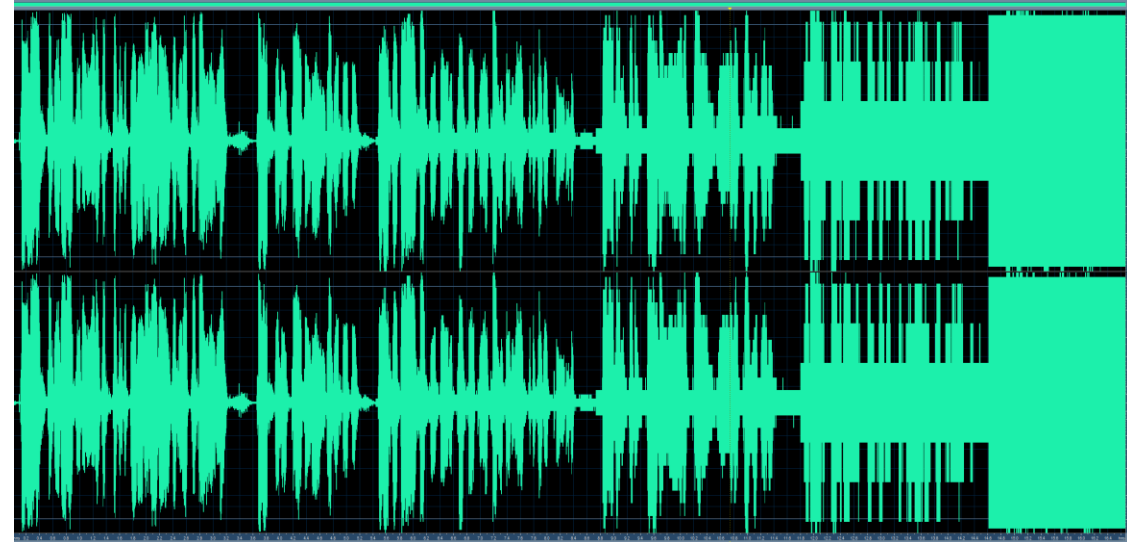
- 8 bitisel muunduril 256 nivood
- 10 bitisel muunduril 1024 nivood (Arduino)
- 16 bitisel muunduril 65536 nivood

Mida suurem, seda täpsemini saab signaali digiteerida.

AD/DA muundamisel tekib **kvantimismüra** ( $q/2$ ), mis lisandub kasulikule signaalile.



$K_n(\text{dB}) = 6n + 3$ . See on alati olemas !!!



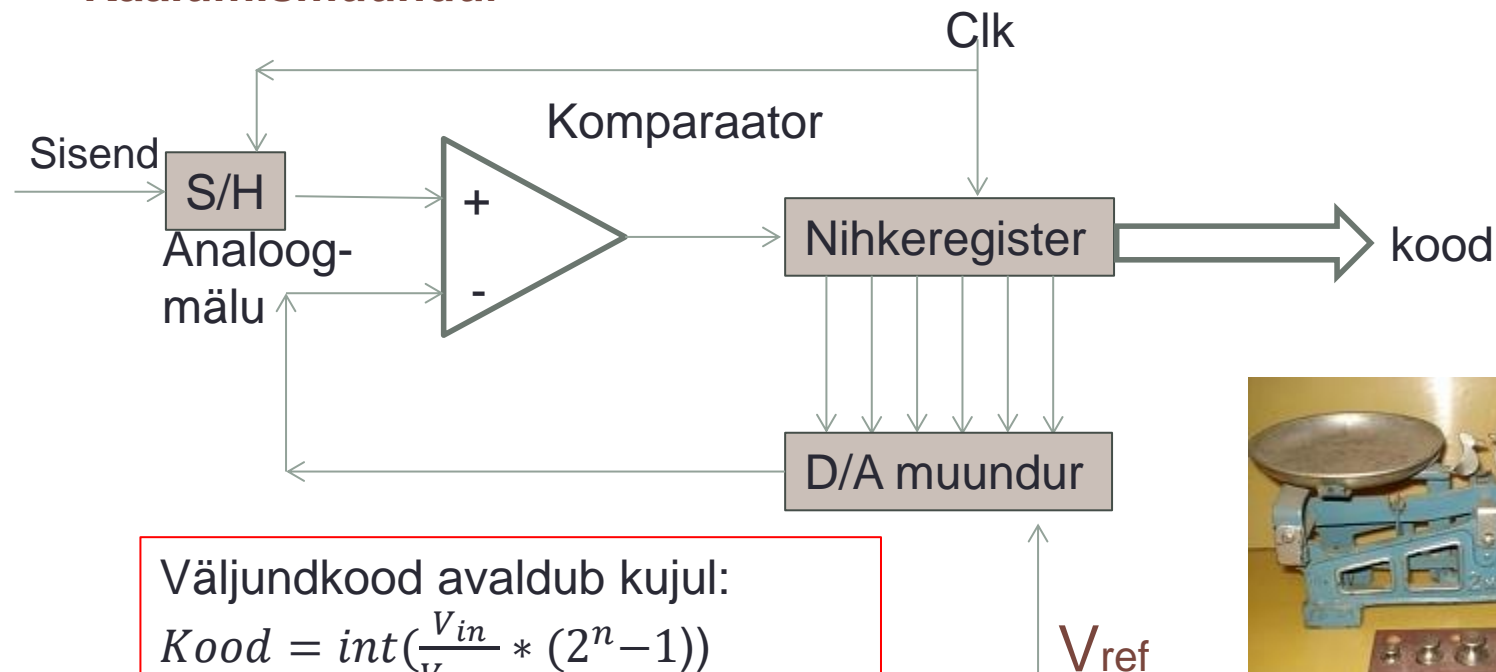
16 12 10 8 6 4 2 bit

Helisalvestus – 44.1 kHz sãmplimine



# Analoog-digitaalmuundur

## Kaalumismuundur



Väljundkood avaldub kujul:

$$Kood = \text{int}\left(\frac{V_{in}}{V_{Ref}} * (2^n - 1)\right)$$

Kus n on muunduri bittide arv ,int - täisosa



- Tööpõhimõte sarnaneb kangkaaludega kaalumisega. Koodid proovitakse läbi.
- Enamlevinud meetod. Täpsus sõltub D/A muunduri kvaliteedist.
- muundusaeg- n-takti ( n- muunduri bittide arv)

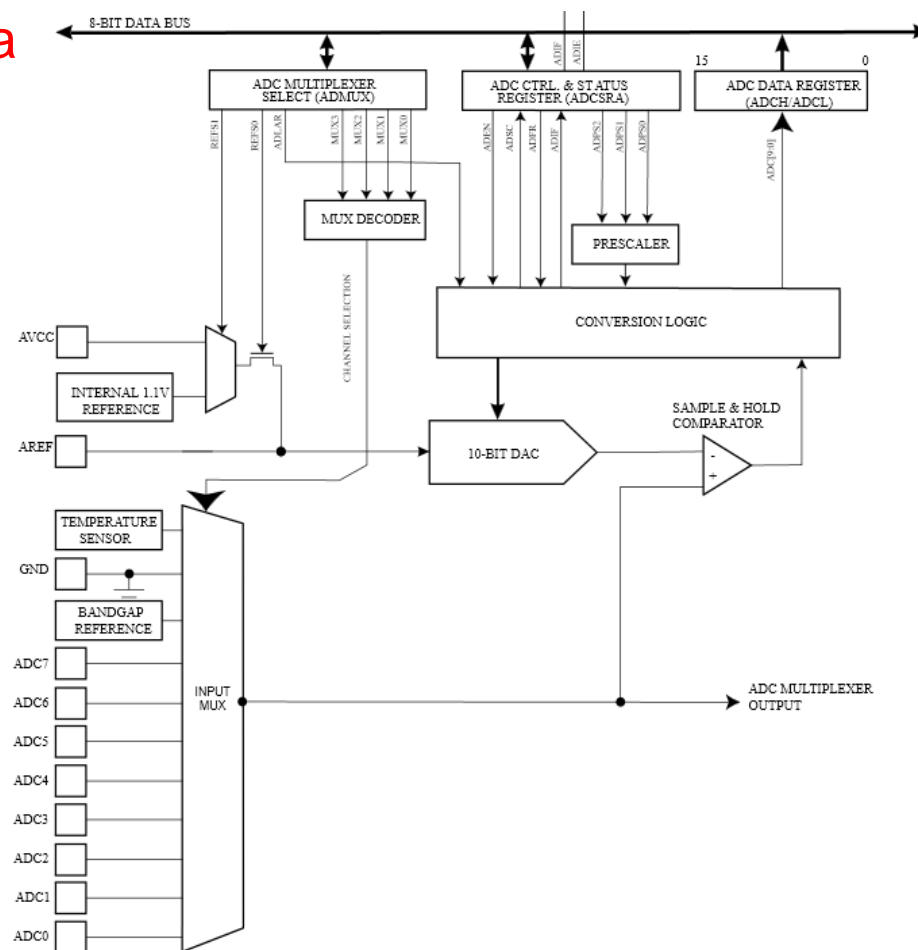
# AD muundur tänapäeva mikrokontrolleris

- **Kasutamisel tuleb hoolega lugeda andmelehte (datasheet) !**
- Reeglina on sisendis mux ja üks muundur protsessori kohta.
- Tavaliselt kas 8 või 10bitine.
- Mõnikord on lisatud ka võimendi.
- V<sub>Ref</sub> kas sisene või väline.
- Sisend ja V<sub>Ref</sub> peavad olema positiivsed ja mitte suuremad kui toitepinge.

Väljundkood avaldub kujul:

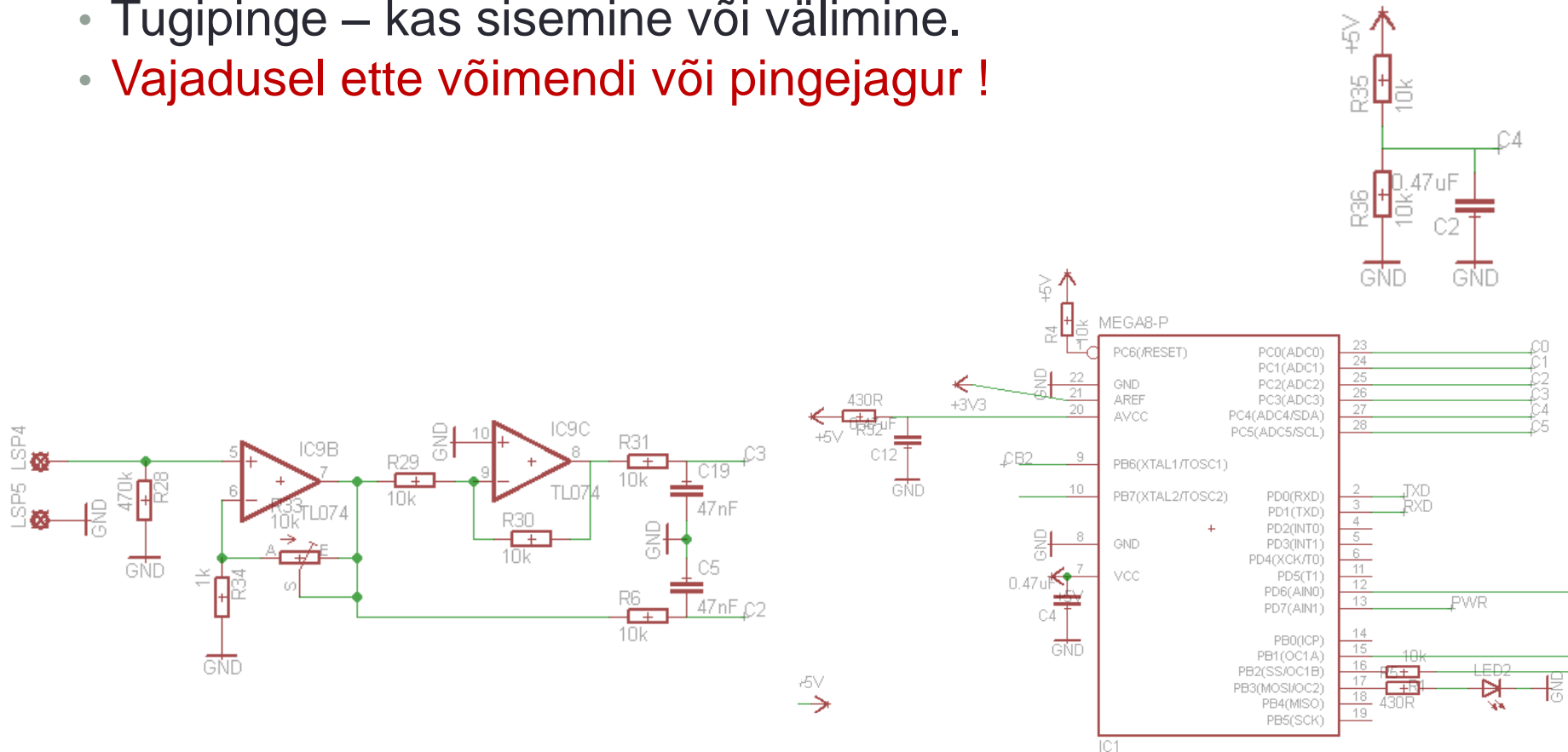
$$Kood = \text{int}\left(\frac{V_{in}}{V_{Ref}} * (2^n - 1)\right)$$

Kus n on muunduri bittide arv ,int - täisosa



# AD muundur tänapäeva mikrokontrolleris

- Enamikes mikrokontrolleris on AD muundur
- Kasutatakse multiplexerit, juhtimine **täpselt** andmelehe järgi.
- Tugipinge – kas sisemine või välimine.
- **Vajadusel ette võimendi või pingejagur !**



# AD muundur tänapäeva mikrokontrolleris

```
void setup() {
  analogReference(INTERNAL); // Sisemine referents
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  int sensorValue = analogRead(A0);
  Serial.println(sensorValue);
  delay(1);
}
```

- NB ! **analogReference** parameter sõltub kasutatavast protsessorist !
- Arduino UNO puhul –
- **INTERNAL** - 1.1 V
- **DEFAULT** – 5 V
- **EXTERNAL** – see ping, mis on Vref klemmidele antud (0..5 V)

- Arduino **analogRead** töötab vaid nende klemmidega, millel on analoogisendi võimalus. Muu klemmi kasutamisel (nii parameetrina kui ka ühendusena) kompilaator viga ei anna, aga tulemuseks saab juhusliku väärtuse .
- **analogRead** annab väljundiks tüüpi **int** – ehk ka muutuja, millele funktsiooni väärtus omistatakse, **peab olema märgiga täisarv** ! Tüüpi **byte** kasutamisel (ilma nihutustehteta, lähevad kaks esimest bitti kaduma ning tulemus on ebameeldiv)

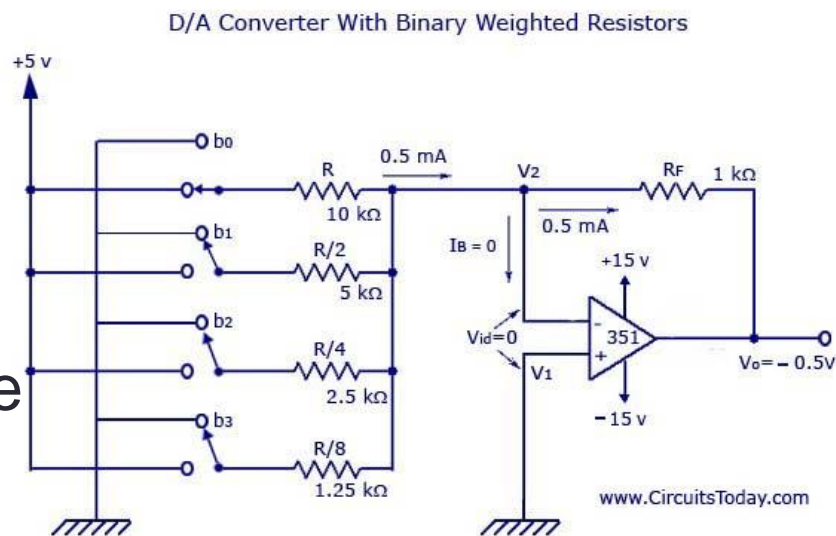
Kui on vaja lugeda 8 bitiselt , tuleb teha nii : `byte sensorValue = analogRead(A0)>>2;`  
`Serial.println(sensorValue);`

# DA muundur

## Paralleelmuundur

- Iga biti väärtus korrutatakse tema kaaluteguriga  $2^n$  ning korrutised liidetakse.
- Lihtsam variant –kasutada takisteid, millest iga järgmine on 2 korda väiksem

Kasutusala – diskreetelemendid (takistid), kui vajalik bittide arv on väike (näiteks mikrokontrollerite heliliides). Näiteks 12 biti puhul peab takistite suhe olema juba 2048 ! Seetõttu on see variant ebapraktiline ja vähe kasutuses.

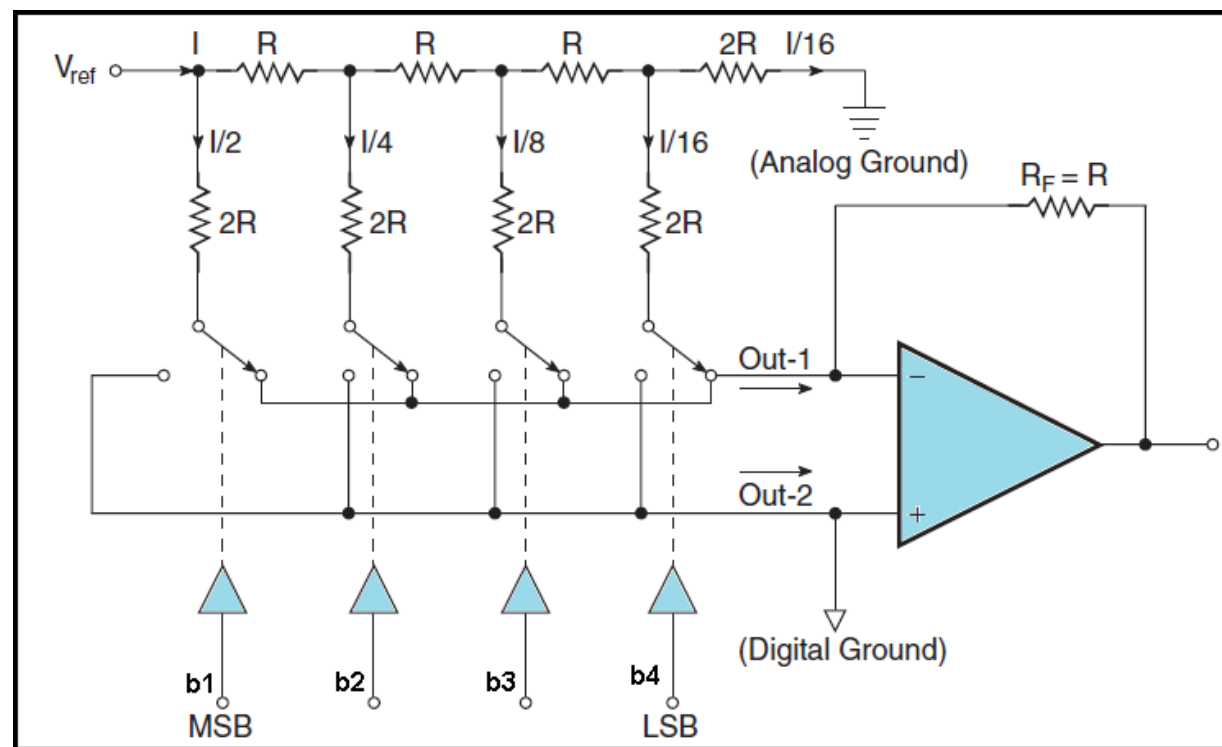
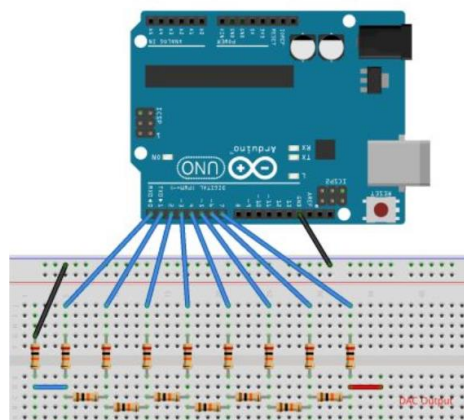


# DA muundur

## Paralleelmuundur

- Iga biti väärtus korrutatakse tema kaaluteguriga  $2^n$  ning korrutised liidetakse.
- Parem variant –kasutada püsiva impedantsiga R-2R ahelat

Eelis- takistite takistused ei ole kriitilise suurusega, kuid peavad olema võimalikult ühesugused, mikroskeemides lihtne realiseerida.

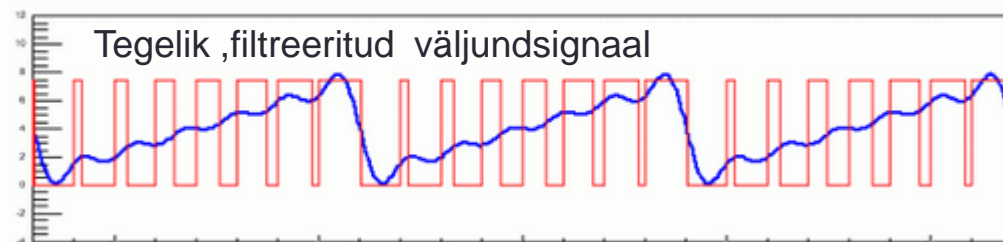
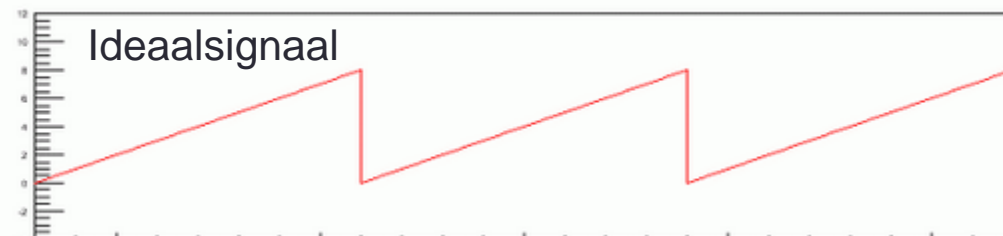
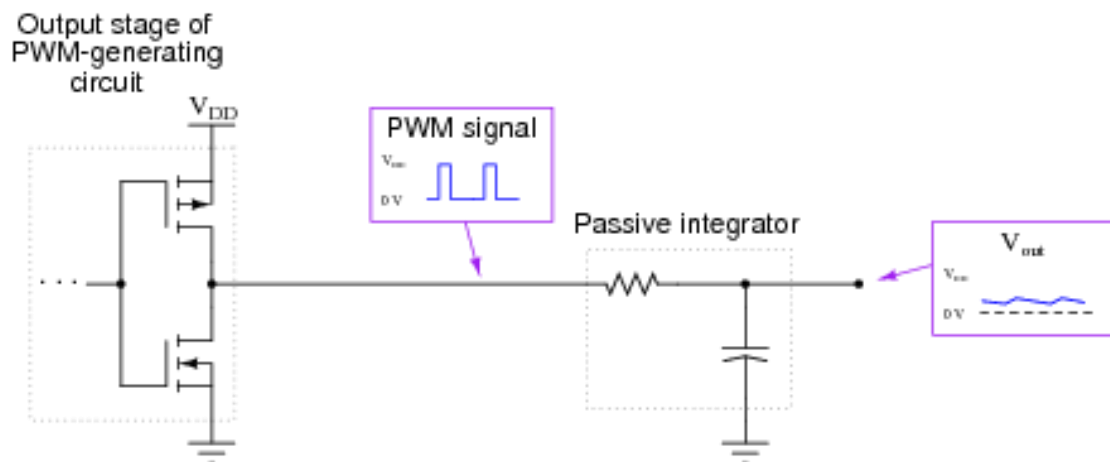




# DA muundur

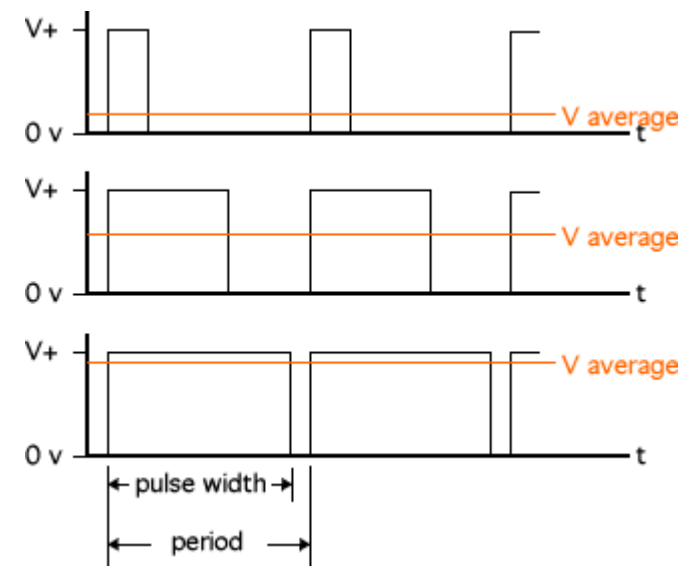
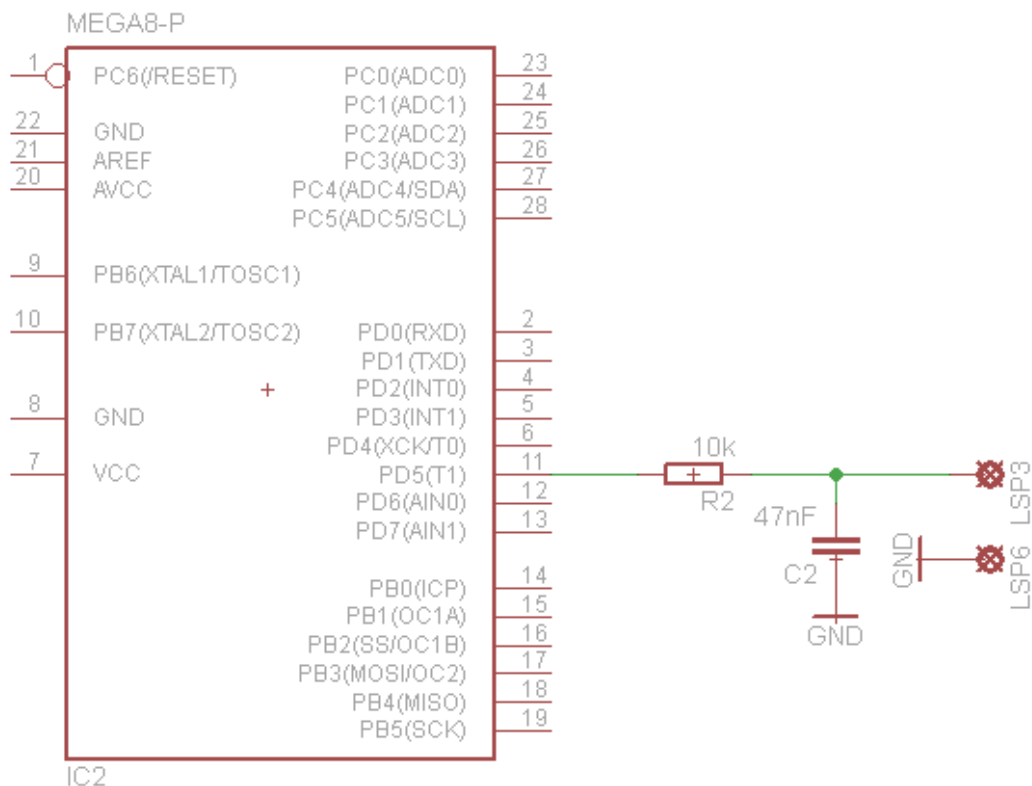
1 bitine muundur (impulss-laius muundur, PWM)

- Sisendsignaali on nelinurksignaali, mille harvendustegur (duty cycle) muutub vastavalt keskväärtusele.
- Lihtsuse tõttu masskasutus (robotika, elektroenergeetika ja ka odavam helitehnika )
- **Väljundis peab olema kindlasti integreeriv element** (kondensaator, mootor, küttekeha, valjuhääldi) !
- Vajab signaali sãmplimissageduse tõstmist  $2^n$  korda (n-bittide arv)
- Odav
- Kvaliteetse analoogsignaali saamiseks vajab väga head filtrit !



# PWM mikrokontrolleris

- Reguleeritakse nelinearsignaali harvendustegurit
- Võimalus reguleerida näiteks valgusdiodi heledust
- Lihtne võimalus saada analoogpinget.
- Arduino – **analogWrite** – riistvaralise taimeriga kasutamine



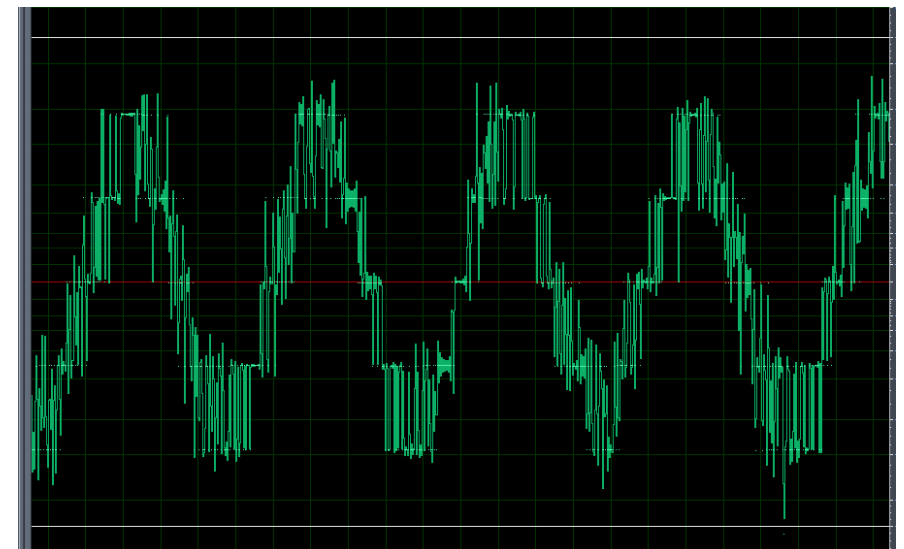
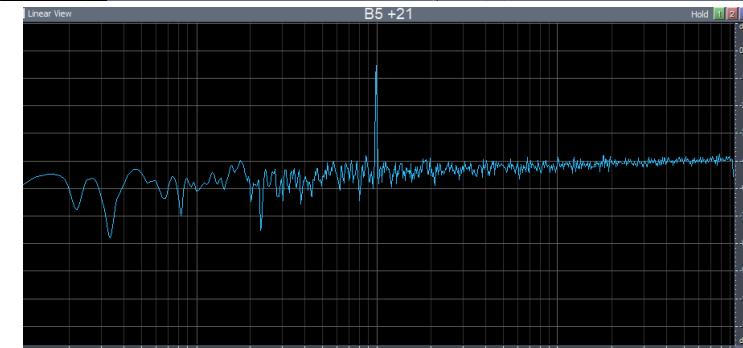
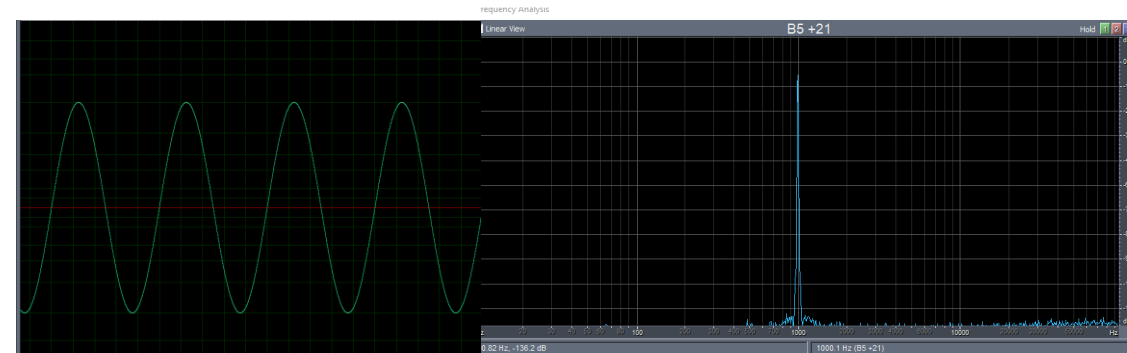
$$\text{Väljundpinge keskvaartus} = \text{Toitepinge} * \frac{\text{Impulsi pikkus}}{\text{Perioodi pikkus}}$$

$$\text{Väljundpinge efektiivvaartus} = \text{Toitepinge} * \sqrt{\frac{\text{Impulsi pikkus}}{\text{Perioodi pikkus}}}$$

# Digitöötluse probleeme

- **Amplituudi muutmine (ehk konstandiga korrutamine /jagamine).** Bitte ei pruugi jätkuda (seepärast kasutatakse ka kõige levinumal 16 bitises digihelitöötleses sisemistes arvutustes 64 bitist täpsust. (Helisämplid on valdavalt 16 bitised märgiga täisarvud)
- **Alatäitumine , Katse :** Tekitame -6 dBFS tasemega (16 bitti) siinussignaali, Nõrgendame seda 60 dB ja pärast võimendame 60dB (1000 korda, mis analoogtehnikas pole ületamatu probleem )

dBFS – detsibell täisskaala (Full Scale) suhtes , 0dBFS=maksimum



# Digitöötluse probleeme

- Maakriksarvutused (nt FFT), on samuti täpsus lõplik. Helis kostuvad näiteks mulksumiste, omapäraste resonatshelidena, pilt läheb “ruuduliseks”
  - Kui murru nimetaja ja lugeja lähenevad samaaegselt nullile, tekivad arvutusvead ja tulemus on ettearvamatu.
  - Ümardamisvead
  - Ületäitumine – tulemus kipub suuremaks minema kui maksimum.
- 
- Analoogethnikas on ülekandeahela kergelt mittelineaarne ala (nn “Headroom”) tasemeindikaatoritel sageli punane, tavaliselt antakse detsibellides ,dBFS ,dBm ), digitehnikas seda pole. Signaal lõigatakse lapikuks (clipping)

