

Esimese aasta tudeng istub hommikul ühikas ja hoiab kahe käega peast kinni ja värisevate kätega joob pudelist Värskat: "Rohkem alkoholi ei joo! Raisk, tõesti rohkem ei joo..."

Neljanda aasta tudeng astub sisse ja vaatab seda värisevate kätega soiguvat esmakursuslast. Kuulab natuke tolle soigumist, vangutab siis pead:

"Kuule , sõber , nii sa elus kaugele ei jõua! Nõrk oled ! Kui juua veel ei oska, siis treeni, õpi ! Mitte ära loobu peale esimest ebaõnnestumist!"

# ISC0100 KÜBERELEKTROONIKA

---

Kevad 2025

Sissejuhatus signaalitöötlusesse, raadioside

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

- Spekter
- Fourier' teisendus
- Moduleerimine /demoduleerimine
- Infoedastus

# Ortogonaalsus

Tegelik võimsus on kahe signaali korrutis - näiteks voolu ja pinge korrutis  $i(t)v(t)$ . Kui korrutise keskväärtus on null, siis on signaalid **ortogonaalsed**:

$$(v_1, v_2) = \overline{v_1(t)v_2(t)} = 0$$

Arvu

$$(v_1, v_2) = \overline{v_1 v_2}$$

nimetatakse signaalide **skalaarkorrutiseks**

# Ortogonaalne baas

Erineva sagedusega harmoonilised signaalid on ortogonaalsed. Signaali on võimalik lahutada ortogonaalsete komponentide summaks, kusjuures komponendi sisalduse saab leida skalaarkorutise abil:

$$v = a_1 v_1 + a_2 v_2 + a_3 v_3 + \dots$$

$$(v_1, v_2) = 0, \quad (v_1, v_3) = 0, \quad (v_2, v_3) = 0, \dots$$

$$a_k = \frac{(v, v_k)}{\sqrt{(v_k, v_k)}} = \left( v, \frac{v_k}{\|v_k\|} \right)$$

ühikvektor

Signaali on otstarbekas esitada mingite baas- (põhi-) signaalide kaudu, mille käitumine on lihtne ja võimalik üldkujul väljendada. Eriti mugavaks teeb sellise lahutuse juhtum, kus baassignaalid on ortogonaalsed.

# Spekter

Signaali spektriks nimetataksegi signaali esitust komponentide kaalude kaudu, seega nt baassignaale

$V_1, V_2, V_3, \dots$  puhul arvude komplekti

$a_1, a_2, a_3, \dots$

Lineaarses süsteemis, teades reaktsioone baassignaale, võime need eelnevalt leida ning mistahes spektri korral opereerida vaid spektri kordajatega.

Paraku peab paljudel juhtudel baassignaale hulga lugema pidevaks, st spektri pole mitte arvude jada, vaid pidev funktsioon. Siiski, seegi võib olla väga otstarbekas esitus.

# Fourier' spekter

Tuntuim baassignaalide hulk on harmoonilised signaalid. Kuna kõik erineva sagedusega harmoonilised on ortogonaalsed, siis on tegemist pidevast parameetrist (sagedus  $\omega$ ) sõltuva baassignaalide kogumiga:

$$\sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta$$

$$\sin(\alpha - \beta) = \sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta$$

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta$$

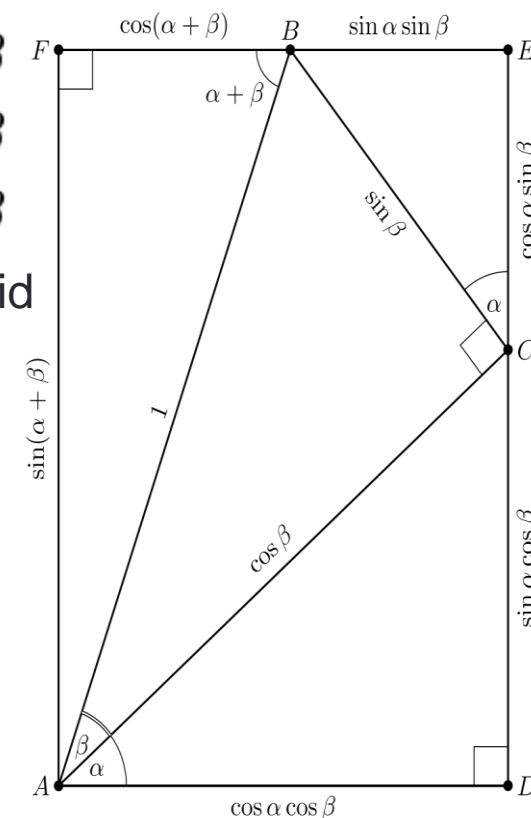
$$\cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta$$

Matemaatikast tuntud trigonomeetria teisendusvalemid

$$A \cos(\omega t + \varphi)$$

spekter

$$= A \cos \varphi \cos(\omega t) - A \sin \varphi \sin(\omega t)$$



Signaalitöötlus ongi harmooniliste signaalide matemaatika, eelkõige korrutamine ja liitmine.

# Koosinus

Harmonilise signaali sisalduse määramiseks signaalis  $v(t)$  tuleks leida projektsioon (skaalarkorrutis ühiksinaaliga):

$$\|\cos(\omega t)\| = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \Rightarrow \quad \text{ühik} : \sqrt{2} \cos(\omega t)$$

$$(v(t), \sqrt{2} \cos(\omega t)) = \lambda \quad \Rightarrow \quad v(t) = \dots + \lambda \sqrt{2} \cos(\omega t) + \dots$$

$$(v(t), \cos(\omega t)) = \mu \quad \Rightarrow \quad v(t) = \dots + 2\mu \cos(\omega t) + \dots$$



# Perioodilise signaali spekter

Kui signaal  $v(t)$  on perioodiline perioodiga  $T$ , siis kui  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$

$$v_k = 2(v(t), \cos(k\omega_0 t)) = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \cos(k\omega_0 t) dt$$

Teiste sageduste ( $\omega \neq k\omega_0$ ) sisaldus on null. Samuti

$$v_k = 2(v(t), \sin(k\omega_0 t)) = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \sin(k\omega_0 t) dt$$

$$v_0 = (v(t), 1) = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt$$

# Kompleksne Fourier' spekter

Ühtlane käsitus saadakse, kui kasutada komplekset signaali

$$e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t$$

Komplekse signaali korral peab skalaarkorrutis olema kujus (et võimsus ehk normi ruut oleks positiivne):

$$(v_1(t), v_2(t)) = \overline{v_1(t)v_2^*(t)} \quad \text{Siis} \quad (e^{j\omega t}, e^{j\omega t}) = \overline{e^{j\omega t} e^{-j\omega t}} = \bar{1} = 1$$

Ehk kompleksne eksponent on normeeritud ( $v_{rms}=1$ ).

# Harmonilise signaali spekter

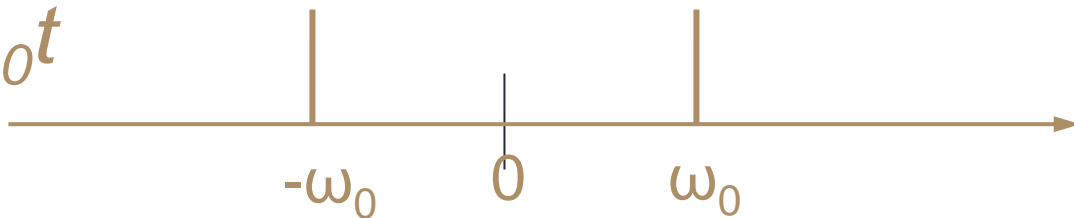
Spektri komponent (NB!  $k=-\infty \dots \infty$ ):

$$\text{Koosinus} \quad v_k = \left( v(t), e^{jk\omega_0 t} \right) = \int_0^T v(t) e^{-jk\omega_0 t} dt$$

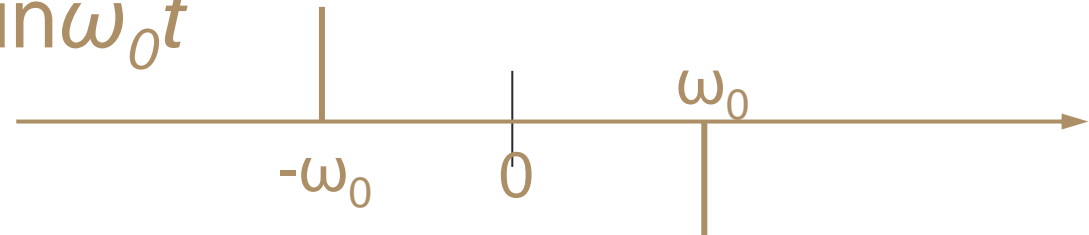
$$\text{Koosinuse efektiivväärtus:} \quad \cos \omega t = \frac{1}{2} (e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}) \quad \|\cos \omega t\|^2 = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{1}{2} \quad \|\cos \omega t\| = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Koosinuse spekter sisaldab kaks komponenti: sagedustel  $-\omega$  ja  $+\omega$ , mõlema amplituud ja efektiivväärtus on  $1/2$ .

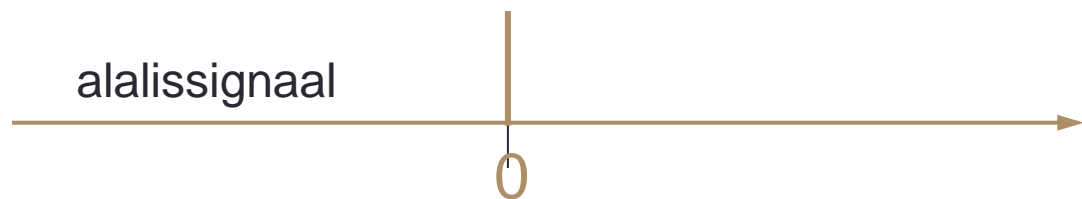
$\cos \omega_0 t$



$\sin \omega_0 t$



alalissignaali



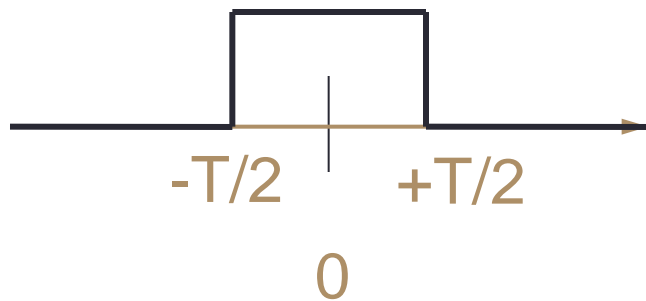
$$\sin \omega t = \frac{1}{2j} (e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}) = -\frac{j}{2} e^{j\omega t} + \frac{j}{2} e^{-j\omega t}$$

# Impulsi spekter

Impulssignaali korral (lõplik energia) on võimsus (ja efektiivväärtus) võrdsed nulliga, spekter on pidev, mitte kontsentreeritud üksikutele sagedustele:

$$V(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} v(t) e^{-j\omega t} dt \quad (\text{Fourier' teisendus})$$

Näiteks nelinurkimpulsi korral:



$$V(\omega) = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} e^{-j\omega t} dt = \frac{e^{-j\omega t}}{-j\omega} \Bigg|_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}}$$

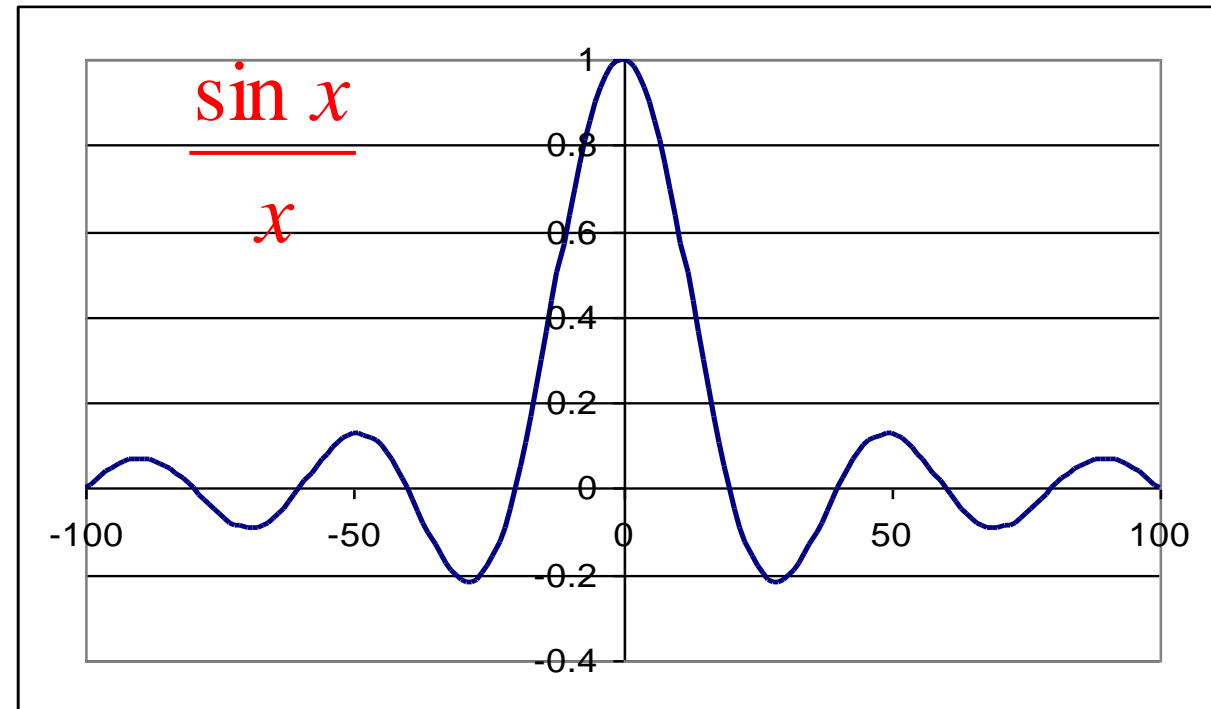
# Nelinurksignaali spekter

$$V(\omega) = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} e^{-j\omega t} dt = \frac{e^{-j\omega t}}{-j\omega} \Big|_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} = \frac{-e^{-j\omega \frac{T}{2}} + e^{j\omega \frac{T}{2}}}{-j\omega} = \frac{2j \sin \omega \frac{T}{2}}{-j\omega} =$$

$$= \frac{2 \sin \omega \frac{T}{2}}{\omega} = T \frac{\sin \frac{\omega T}{2}}{\frac{\omega T}{2}}$$

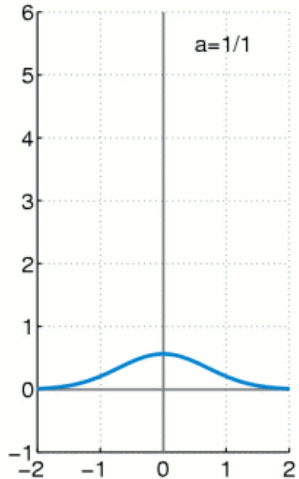
$$\cos x = \frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2}$$

$$\sin x = \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i}$$

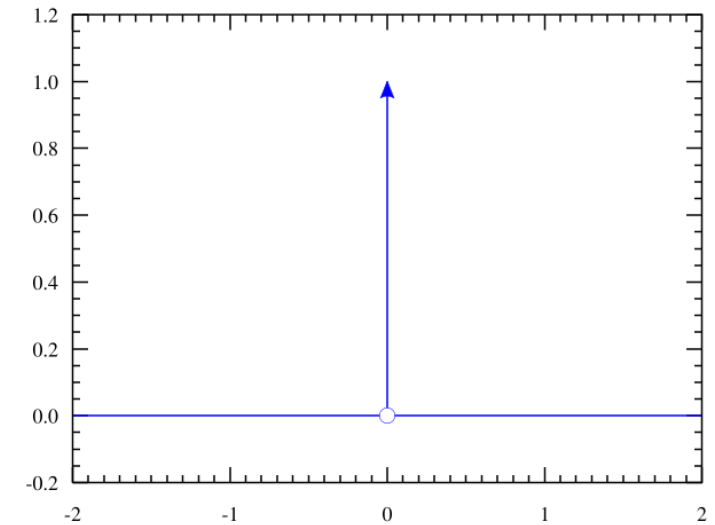


# Deltafunktsioon

Dirac'i ehk  $\delta$  –funktsioon . Kõikjal on väärtus 0, välja arvatud nullist läbimisel , seal on selle väärtus lõpmatus , samas pindala on 1.  
Tuntud ka kui ühikimpulss



$$\delta_a(x) = \frac{1}{|a| \sqrt{\pi}} e^{-(x/a)^2}$$



Konstandi spekter on:

$$V(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} 1 \cdot e^{-j\omega t} dt = 2\pi\delta$$

Pideva spektrina saab esitada ka lõpliku võimsusega signaale, selleks vajame delta-funktsioone. Näiteks koosinuse spekter on korrektselt esitatuna:

$$V(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \cos \omega_0 t e^{-j\omega t} dt = \pi\delta_{-\omega_0} + \pi\delta_{+\omega_0}$$

# Fourier'teiseenduste sümmeetria

Kehtib sümmeetriaomadus: tagasiteisendus (Fourier' pöördteisendus) on sama kui päriteisendus, vaid argumendi märk muutub ning jagada tuleb  $2\pi$ -ga:

$$v(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} V(\omega) \cdot e^{jt\omega} d\omega$$

Seega:

$$F(1) = 2\pi\delta \quad \Rightarrow \quad F(\delta(t)) = 1$$

$$F(e^{j\omega_0 t}) = 2\pi\delta_{\omega_0} \quad \Rightarrow \quad F(\delta(t - t_0)) = e^{jt_0\omega}$$

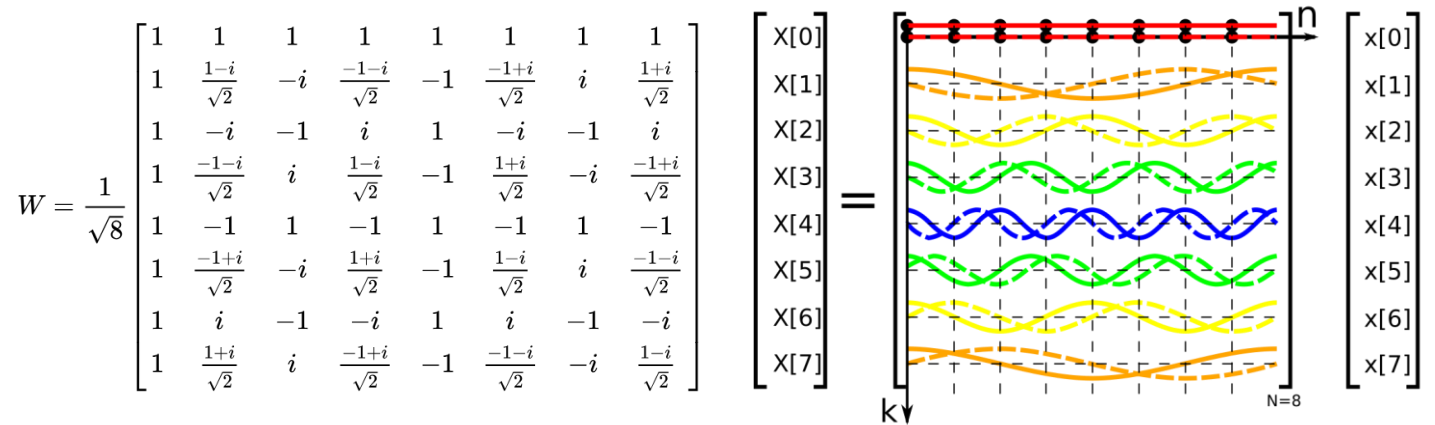
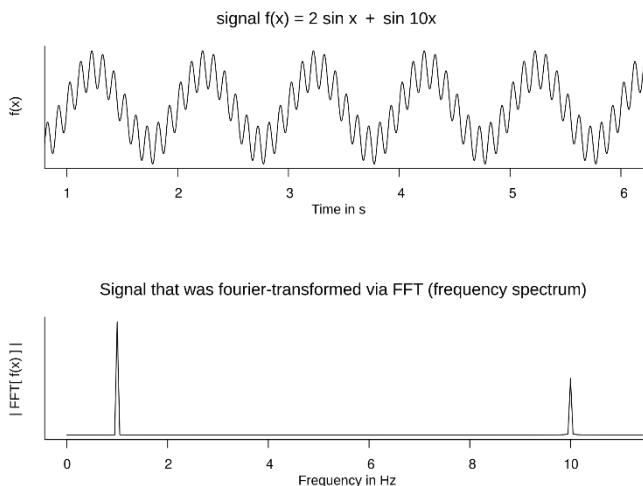
jne (nt nelinurkspekter on signaalil  $\text{sint}/t$ )

# Kiire Fourier' teisendus

- Fast Fourier Transform (FFT)
- Levinuim algoritm (Cooley–Tukey ,1966)
- On olemas eelarvutatud sagedusmaatriks DFT (diskreetne Fourier' teisendus)
- Lähteinfo (massiiv) korrutatakse selle maatriksiga läbi.
- N – maatriksi järk

$$W = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \omega & \omega^2 & \omega^3 & \dots & \omega^{N-1} \\ 1 & \omega^2 & \omega^4 & \omega^6 & \dots & \omega^{2(N-1)} \\ 1 & \omega^3 & \omega^6 & \omega^9 & \dots & \omega^{3(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega^{N-1} & \omega^{2(N-1)} & \omega^{3(N-1)} & \dots & \omega^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix},$$

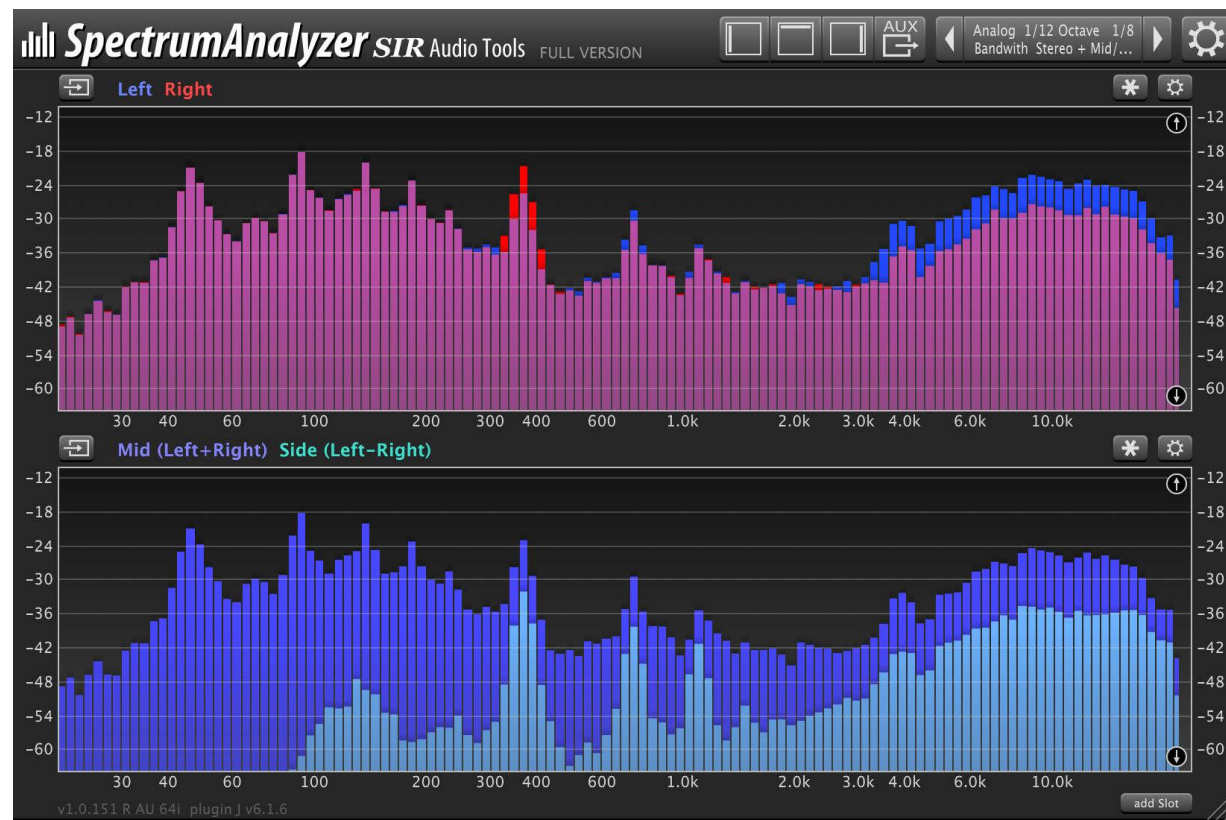
$$\omega = e^{-\frac{2\pi i}{8}} = \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{i}{\sqrt{2}}$$





# Eelnevate slaidide praktiline kasutus

- FFT on mugav digitaaltöötles (digitaalfiltrid, heli/pildi kadudega tihendamine, nt mp3 formaat) Aeg -> sagedus -> töötles ->aeg
- Kogu sidetehnika - sagedusmuundid, modulaatorid, demodulaatorid
- Elektrooniline muusika
- Kõnesüntees
- Jne...jne..



# Moduleerimine

Signaalide korrutamisel toimub spektrite konvolutsioon ehk nad nihkuvad:

$$\cos \omega t \cdot \cos \Omega t = \frac{1}{2} (\cos(\omega + \Omega)t + \cos(\omega - \Omega)t)$$

$$e^{j\omega t} e^{j\Omega t} = e^{j(\omega + \Omega)t}$$

See ongi modulatsioon, mis võimaldab kanda signaali teistele sagedustele - **kommunikatsiooni alus**.

**NB! Sagedus (spektri argumendina) ning aeg on teineteist välistavad - ei ole olemas ajas muutuvat spektrit!**

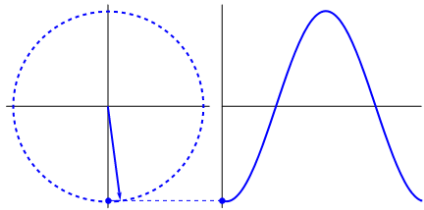
$$\sin \alpha \cos \beta = \frac{\sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)}{2}$$

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)}{2}$$

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)}{2}$$

Kui mingis valemis on sees  $2\pi$ , tähendab see seda, et midagi liigub kuskil mööda ringjoont või vastupidi !

# Vahelduvsignaal



Näiteks:  $u(t) = A \cdot \sin(2\pi t + \varphi)$

Faas

Aeg

Algfaas

Ringsagedus (nurksagedus  $\omega$ )

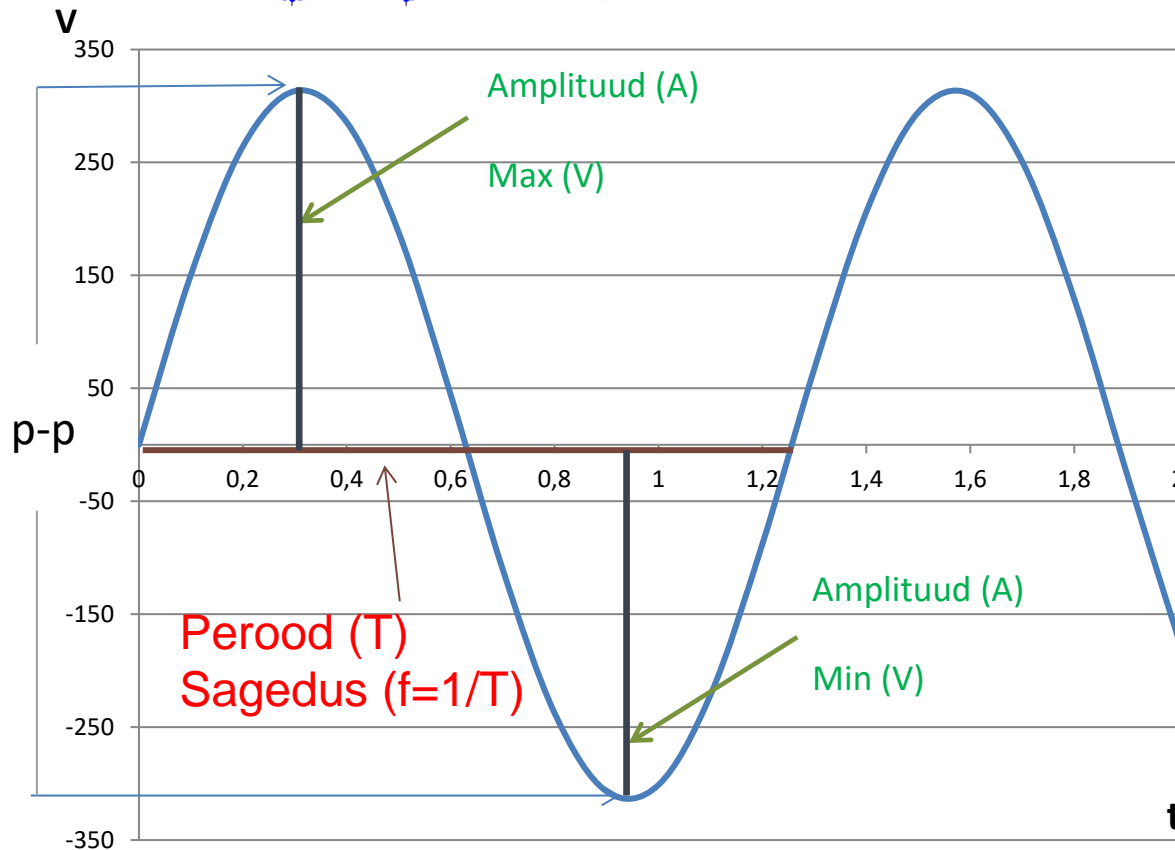
Harmoniline funktsioon (võib olla ka cos)

Amplituud (koos ühikuga, ei pea olema elektriline ühik)

Info edastamiseks võime muuta

- Amplituudi (**A**) – amplituudmodulatsioon (**AM**)
- Sagedust, ehk perioodi T pikkuse pöördväärtust (sagedust),  $f = 1/T$  – sagedusmodulatsioon (**FM**)
- Algfaasi ( $\varphi$ ) – faasimodulatsioon (**PM**)

Peak to peak – tipust tippu = 2A



# Juhtmevaba side

100 10 1 100 10 1 10 1 1 1  
km km km m m m cm cm mm  $\mu$ m

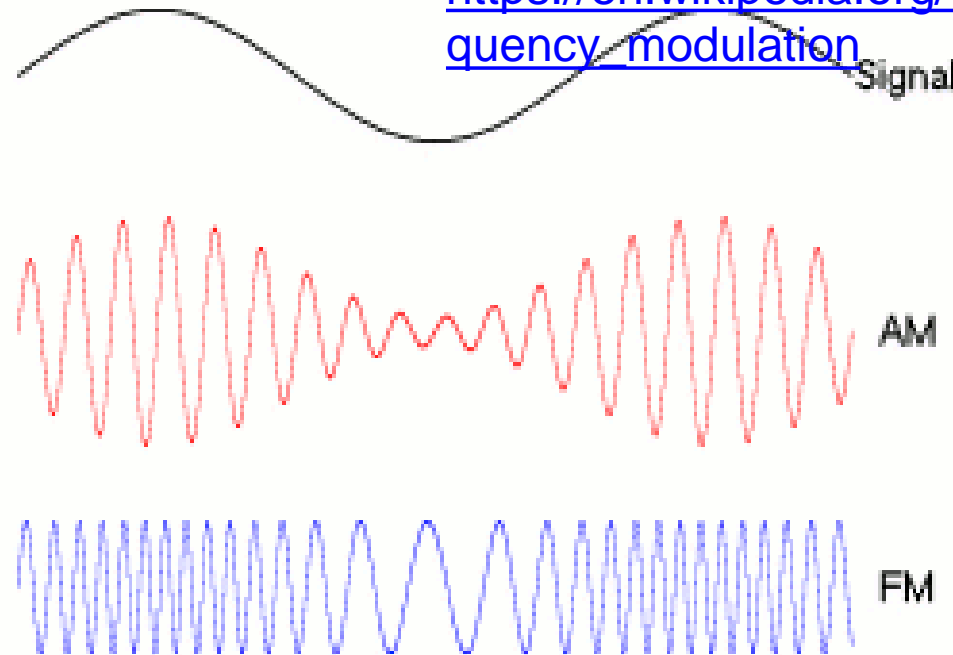
Audio	VLF	LF	MF	HF	VHF	UHF	SHF	mm	infra red
-------	-----	----	----	----	-----	-----	-----	----	-----------

1 10 100 1 10 100 1 10 100 100  
kHz kHz kHz MHz MHz MHz GHz GHz GHz PHz

Mobiilside poolt kasutatav vahemik

FM ringhääling

[https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency\\_modulation](https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency_modulation)



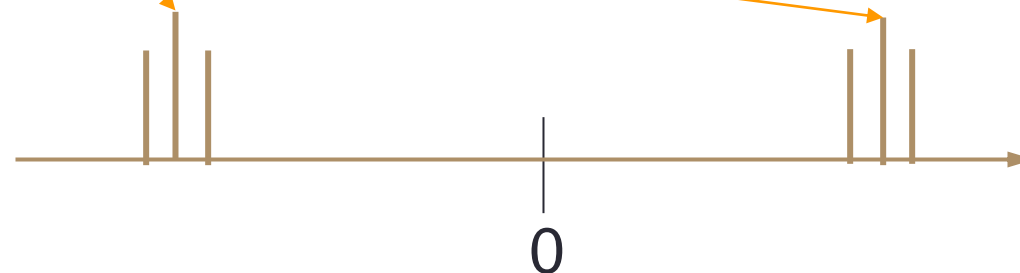
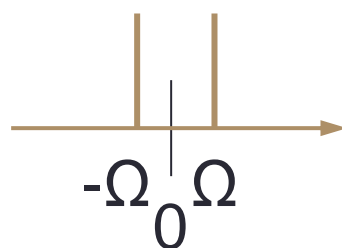
Kasutatakse elektromagnetlaineid

Kasulik signaal on vaja kodeerida, moduleerida:

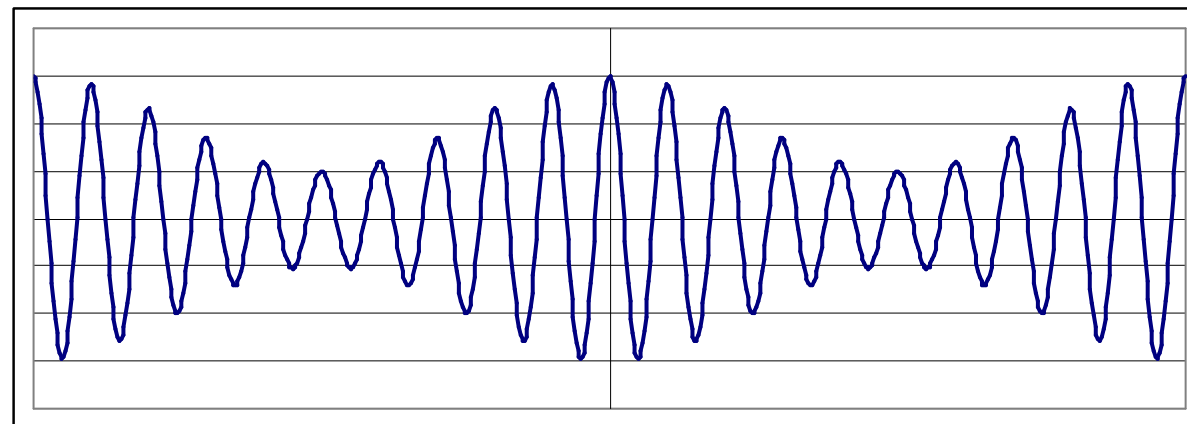
- Amplituudmodulatsioon (AM) – signaal moduleerib kandesageduse amplituudi
- Sagedusmodulatsioon (FM) – signaal moduleerib kandesageduse sagedust
- Faasimodulatsioon (PM) – signaal moduleerib kandesageduse faasi

# Amplituudmodulatsioon (AM)

$$(1 + a \cos \Omega t) \cdot \cos \omega t = \cos \omega t + \frac{a}{2} (\cos(\omega + \Omega)t + \cos(\omega - \Omega)t)$$



- Kõige lihtsam (nii moduleerida kui demoduleerida)
- Ei ole häirekindel
- Suur võimsuskadu AM saatjates
- Saab liita amplituudmoduleeritud signaale



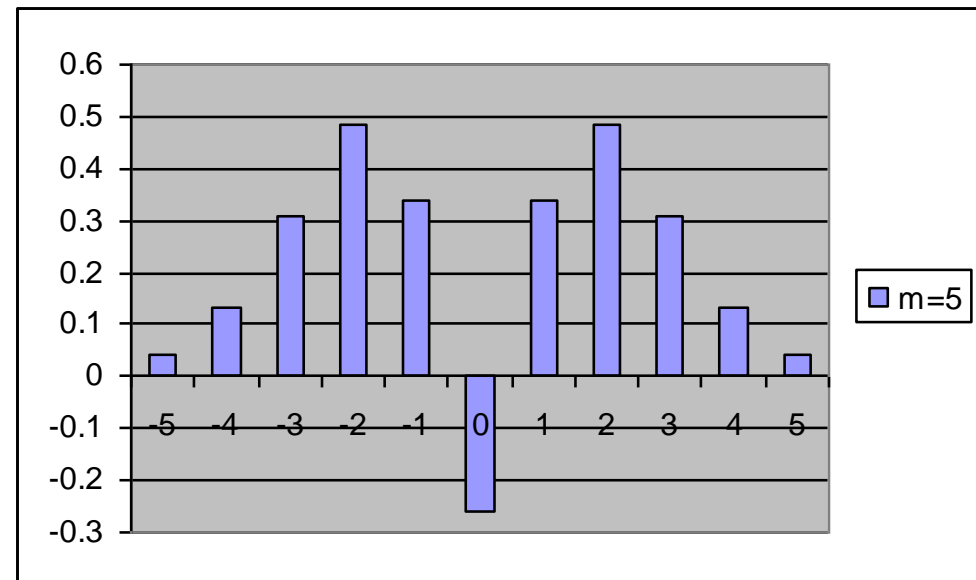
# Sagedus (faasi-) modulatsioon (FM , PM)

$$\cos(\varphi(t)) = \cos(\omega_0 t + \psi(t)) \quad \omega(t) = \frac{d}{dt} \varphi(t) = \omega_0 + \frac{d}{dt} \psi(t)$$

$$\psi(t) = m \sin(\Omega t) \quad \omega(t) = \frac{d}{dt} \varphi(t) = \omega_0 + m\Omega \cos \Omega t$$

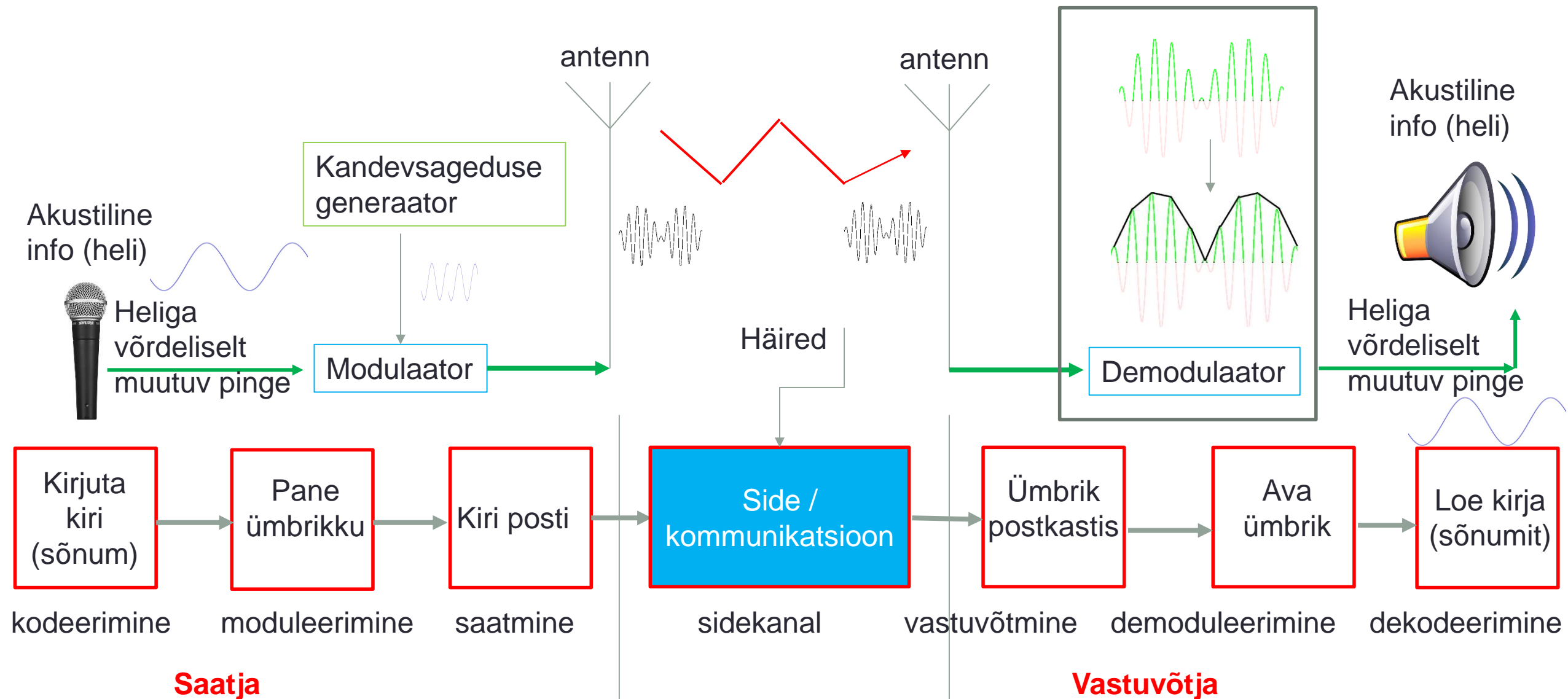
modulatsiooni indeks  $\rightarrow$  Kuigi hetksagedus kõigub vaid  $\pm m\Omega$ , ei tähenda see, et signaali spektris oleks vaid selle vahemiku sagedused; vastupidi, sagedusmoduleeritud signaali spekter on lõpmata lai.

- Keerulisem moduleerida , demoduleerida
- Häirekindel (sagedus ülekandel ei muutu)
- Vajab laia sageduriba (tänapäeval probleem)
- Ringhäälingus kasutusel ultralühilainel
- Sagedusmoduleeritud signaale liita ei saa (keegi ei keela aga tulemus ei ole mõistlik)



# Raadioside

Siin slaidil ei ole näidatud võimendeid – **reaalsuses on nad vajalikud!**





# Tänapäevane digitaalinfo edastamine

- Lähi- või kaugside
- juhtmega (optiline, elektriline) või juhtmevaba (raadioside)
- **Igal juhul tuleb kokku leppida kodeeringus** (nii elektrilises kui ka sümbolite tähenduses). Vastuvõtja peab saatjast aru saama . Sidekanalis lisanduvad häired.
- Edastatakse peamiselt digtaalseid andmeühikuid ehk bitte



<https://digitalsynopsis.com/buzz/smartphone-addiction-funny-sad-images/>



# Andmeedastuskiirus

- Edastuskiiruse ühik bit/s – bitti sekundis
- kbit/s – 1024 (!)  $2^{10}$  bitti sekundis
- Mbit/s – 1024 (!)  $2^{10}$  kilobitti sekundis
- Gbit/s – 1024 (!)  $2^{10}$  megabitti sekundis
- Kasutatakse ka ühikut B/s (bait sekundis) koos  $2^{10}$  kordajatega
- Üks bait on 8 bitti ehk  $1 \text{ B/s} = 8 \text{ bit/s}$
- Telekommunikatsioonis kasutatakse ka ühikut Baud (Bd) Émile Baudot – 1926, mis näitab tegelikku (kasulikku) sümboliedastuskiirust (sümbol võib olla ka 1 bitt/bait aga ei pea olema , võetakse arvesse ka tehnilisel eesmärgil saadetud bitid (kontroll, paarsus ,jms)
- Kasutatakse meetrilist prefixi  $1 \text{ kBd} = 1000 \text{ Bd}$  jne

# Kui kiiresti saab üldse andmeid edastada ?

- 1927 Nyquist avastas, et (telegraafi) ülekande kanali sagedusriba peab olema vähemalt 2 korda laiem edastatavate pulsside sagedusest.  $f_p \leq 2B$
- 1940 ndad Claude Shannon formuleeris (digitaalse) infomatsiooniedastuse teooria.

- Claude Shannoni ja Ralph Hartley seadus :

C – maksimaalne bitiedastuskiirus (sh kontroll jms bitid)

B – ülekandeahela ribalaius ( hertsides)

S – kasuliku signaali võimsus (vattides)

N – müravõimsus (vattides)

S/N tähistatakse ka kui **signaali – müra suhet** (ühikuta suurus), avaldatakse ka detsibellides.

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

Valemis on 1+ jagatis, ehk sidekvaliteet ei sõltu mitte ainult signaalist vaid ka segajatest

# Kui kiiresti saab üldse andmeid edastada ?

- 4G võrk – Ribalaius kuni 20 MHz (sagedusvahemik 450 MHz....3,8 GHz)
- 5G võrk – Ribalaius kuni 150 MHz (sagedusvahemik 450 MHz....6 GHz)
- Näide – Telefoni antennis on edastatava info võimsus  $2 \mu\text{W}$  , Häirete tase on suurusjärgus  $0.1 \mu\text{W}$  . Mobiilsideoperaator lubab 4 G võrgus allalaadimiskiirust **kuni** 100 MBit/s. Kas see on võimalik ?

$$C = 20\text{MHz} * \log_2 \left( 1 + \frac{2 \mu\text{W}}{0.1 \mu\text{W}} \right) = 20 * 4.39 = 87.8 \text{ MBit/s}$$

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

- Lahendus – lähete telefoniga kohta, kus signal on tugevam või häired nõrgemad.

See on ju kuni 100 Mbit/s

Saate oma asukohaga muuta seda

# Digitaalmodulatsioon

- Amplitude-shift keying (ASK)

$$\text{ASK: } s(t) = \begin{cases} A \cos(\omega t), & 0 < t < T, \text{ if } 1 \\ 0, & 0 < t < T, \text{ if } 0 \end{cases}$$

- Phase- shift keying (PSK)
- Differential phase-shift keying(DPSK)
- Quadrature phase-shift keying (QPSK)

$$\text{PSK: } s(t) = \begin{cases} + A \cos(\omega t), & 0 < t < T, \text{ if } 1 \\ - A \cos(\omega t), & 0 < t < T, \text{ if } 0 \end{cases}$$

- Frequency-shift keying (FSK)

$$\text{FSK: } s(t) = \begin{cases} A \cos((\omega + \Omega)t), & 0 < t < T, \text{ if } 1 \\ A \cos((\omega - \Omega)t), & 0 < t < T, \text{ if } 0 \end{cases}$$

- Jne....

- Tänapäeva sidetehnikas on kasutusel need samaaegselt.

- [https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-shift\\_keying#Quadrature\\_phase-shift\\_keying\\_.28QPSK.29](https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-shift_keying#Quadrature_phase-shift_keying_.28QPSK.29)

# QAM

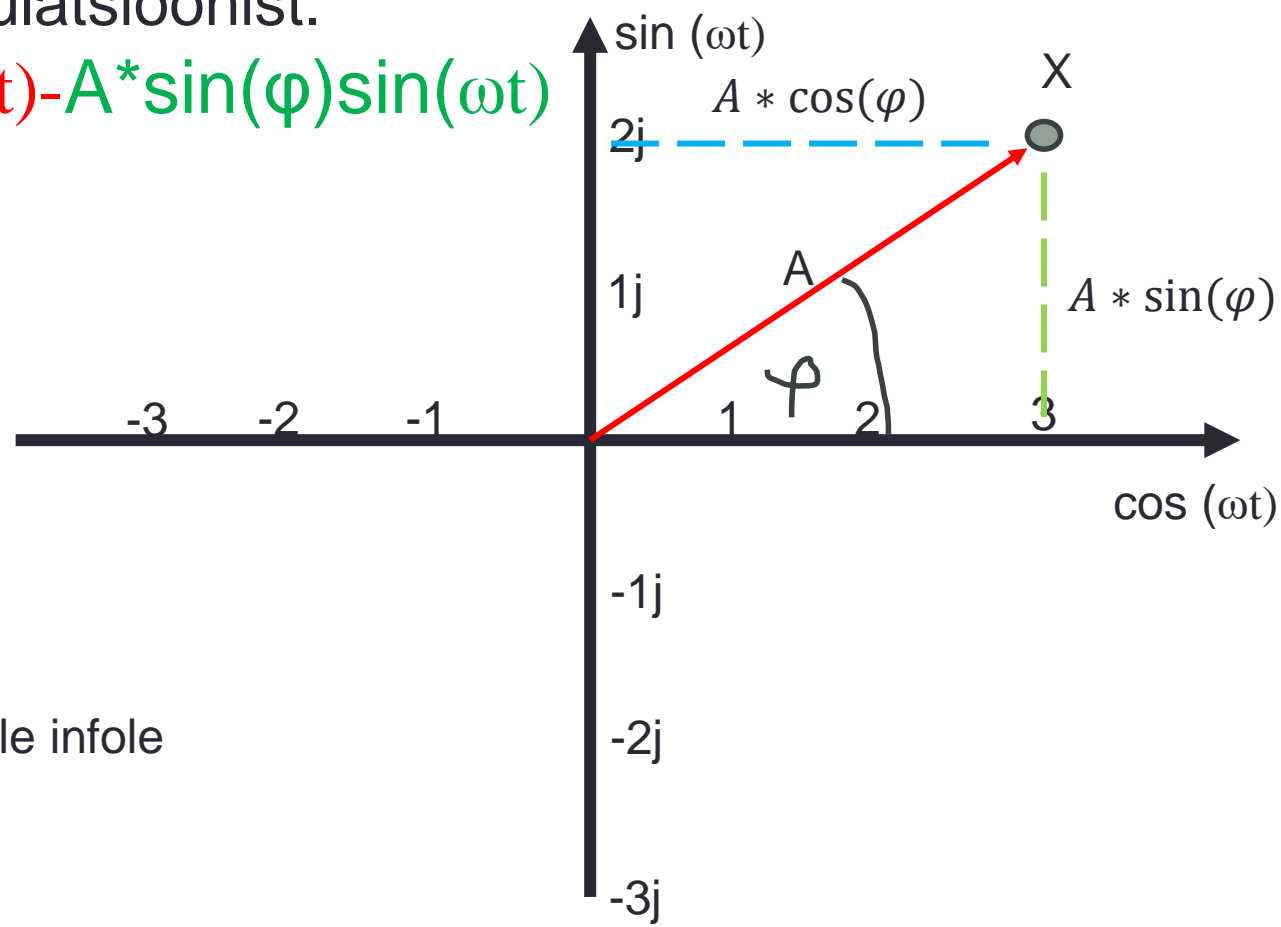
- Tänapäeval valdavalt digisignaalide edastus (moobiilside, wifi)
- Analooq TV PAL ja NTSC värvuskodeering
- Kombinatsioon amplituud ja faasimodulatsioonist.

$$u(t) = A * \sin(\omega t + \varphi) = A * \cos(\varphi) \cos(\omega t) - A * \sin(\varphi) \sin(\omega t)$$

Kandevsagedus  
(ei muutu)

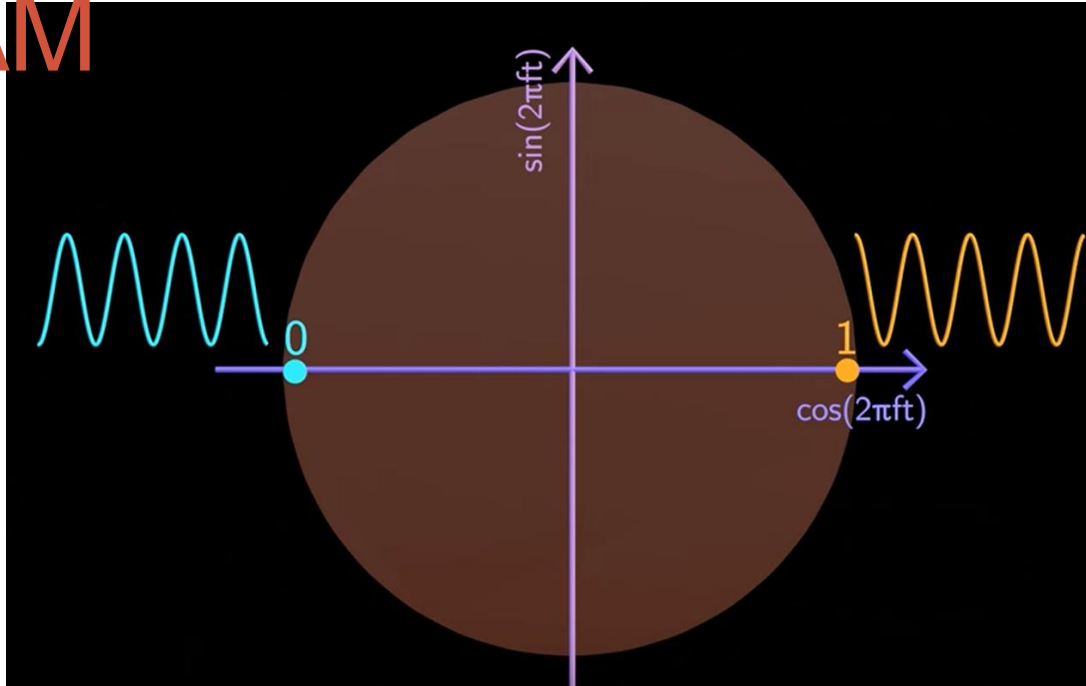
faasikomponent

amplituudikomponent

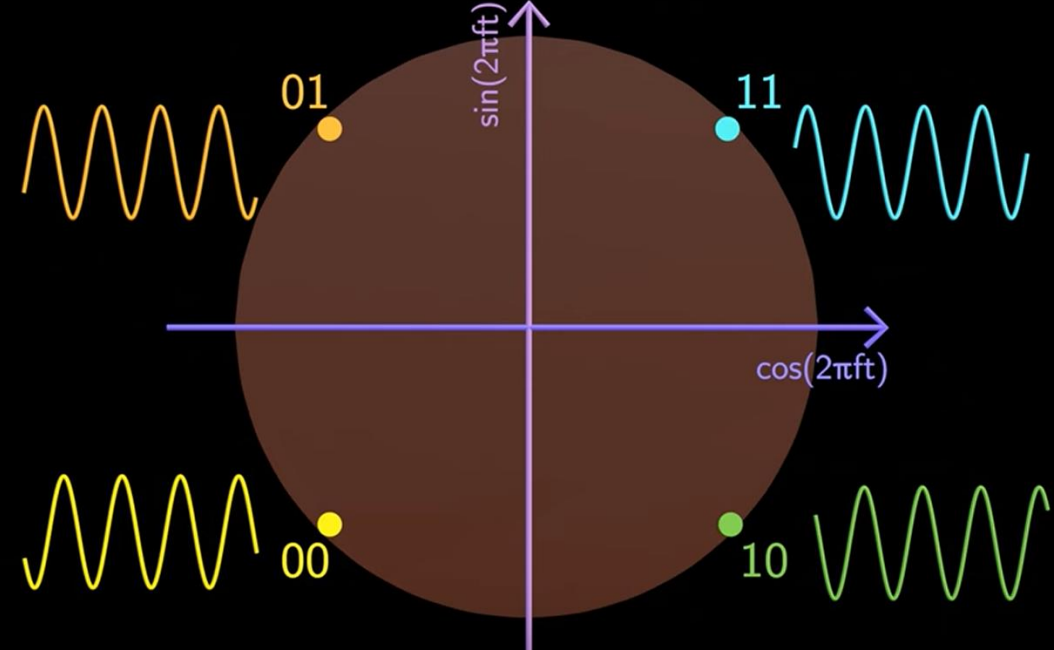


Kuna võimsus on piiratud, pannakse punktid ringi sisse  
Iga punkti A ja  $\varphi$  väärtused valitakse vastavalt edastatavale infole  
 $X = A * \cos(\omega t) A * \cos(\varphi) - A * \sin(\omega t) \sin(\varphi)$

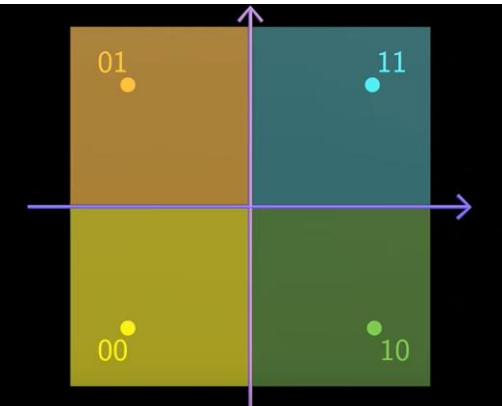
# QAM



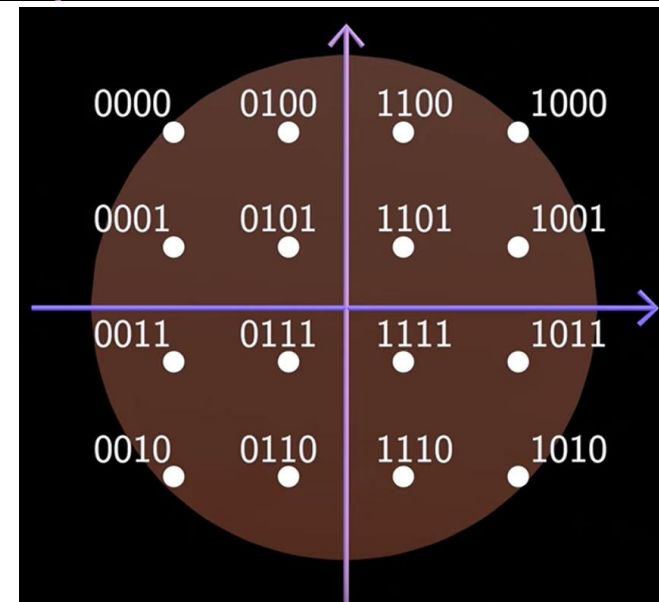
BPSK



QPSK



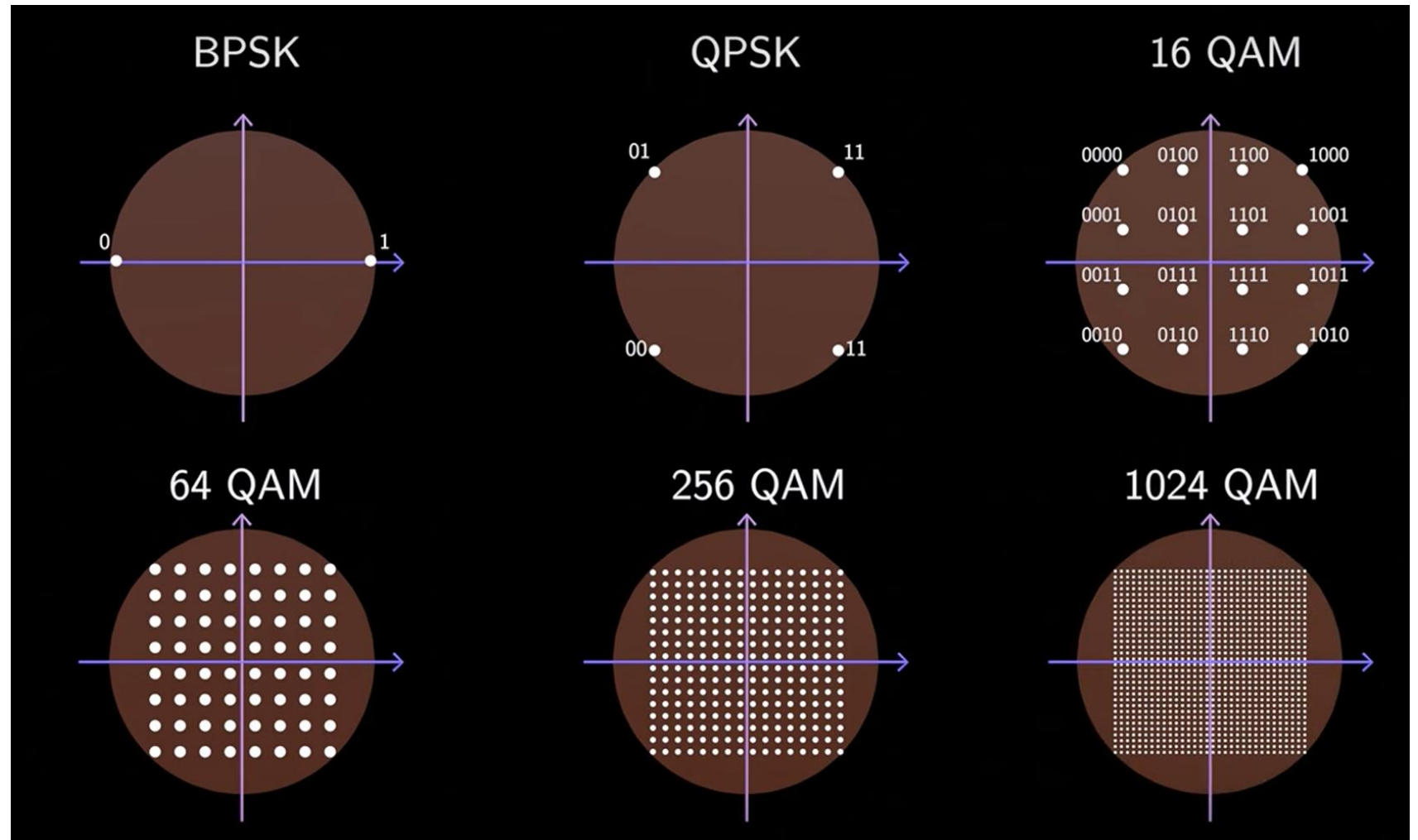
Kuna hāirete mōjul punktid on ebastabiilsed, arvestatakse vastuvōtjas punkti, mis satub regiooni.



16 QAM

# QAM

- 5 G võrk 1024 QAM, digi TV 64 QAM



# GENERAATORID

---

Raadiotehnikas kui kandevsageduse tekitajad

Ka ostsillaatorid ( kasutatakse väljendina elektroonilise generaatori kohta)

Generator – tekitaja (ladina k.)



# Positiivne tagasiside (päriside)

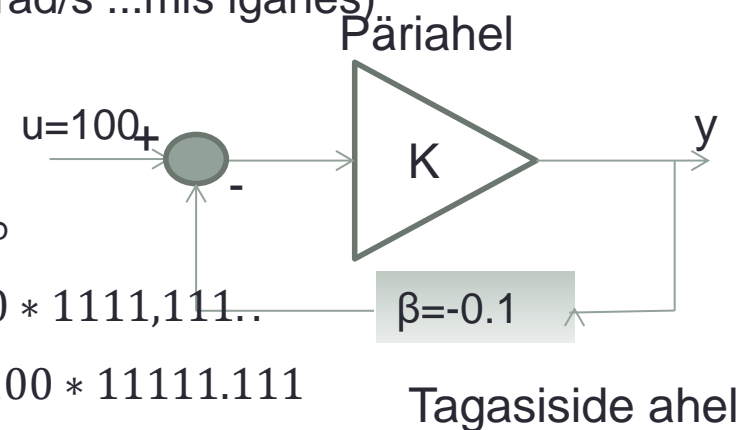
- Väljundi suurenemine mõjub sisendit suurendavalt.
- $K\beta < 0$  ! , eriti hull kui  $1 + K\beta = 0$

Olgu meil

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

$K$  – võimekus, võimendustegur:

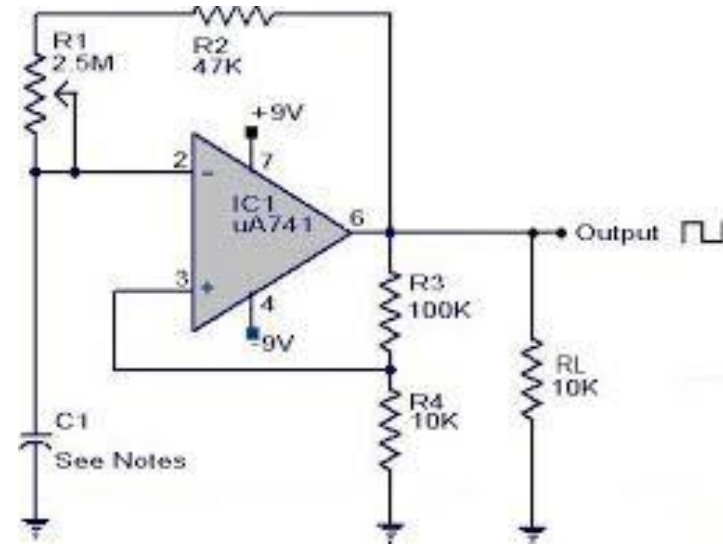
- $K=10$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{10}{1-10*0.1} = \frac{100}{0} = \infty$
- $K=100$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{100}{1-100*0.1} = -100 * 1111,111..$
- $K=1000$  (korda)  $\rightarrow y = 100 * \frac{1000}{1-1000*0.1} = -100 * 11111.111$
- $K=10000$  (korda)  $\rightarrow y =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



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

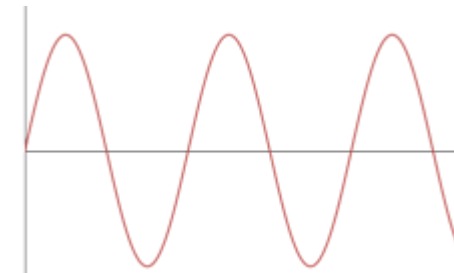
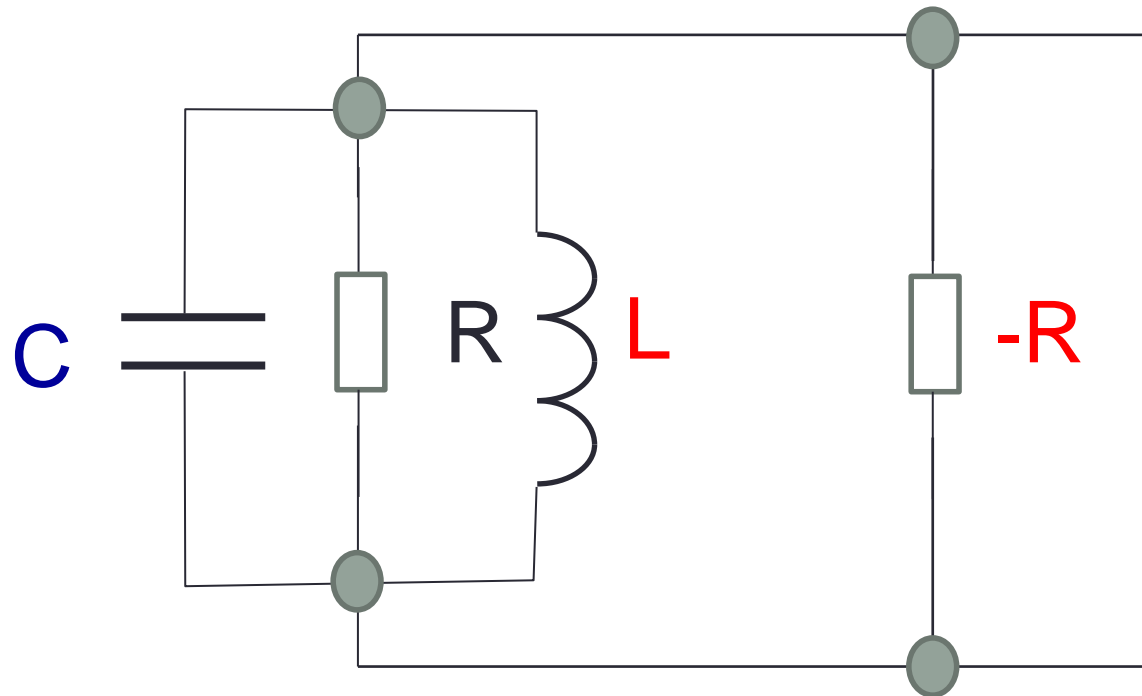
# Positiivne tagasiside (päriside)

- Generaatorid
- Trigerid
- Kogu digitaalloogika (elektrilised suurused on analoog)
- Lõhkeained
- (sotsiaal)meedia ?



# Siinusgeneraator (LC)

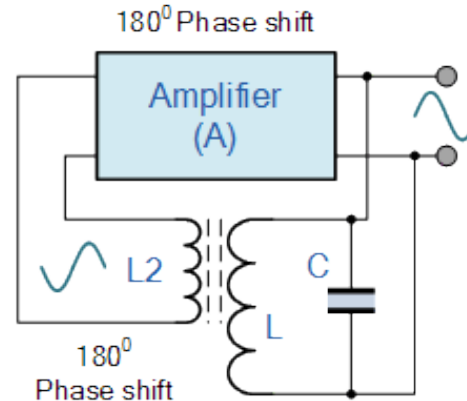
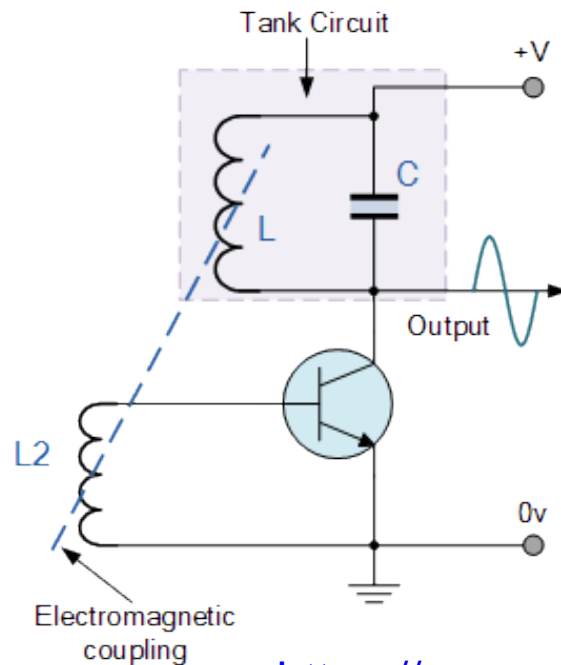
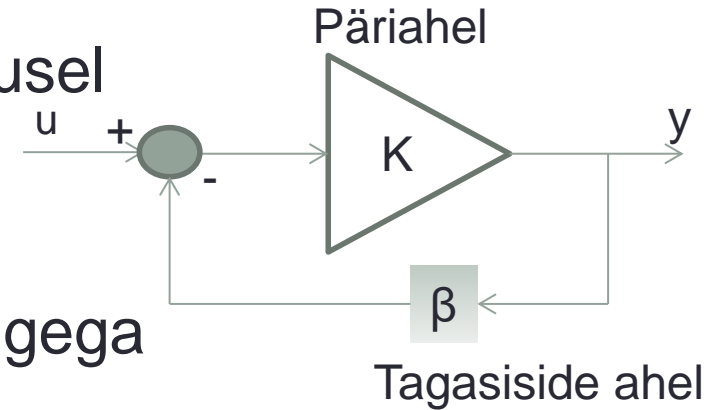
- Idee sumbuvate võnkumiste vältimiseks – ühendame võnkeringiga negatiivse takistuse
- Probleem – negatiivne takistus peab üsna täpselt kompenseerima kaod võnkeringis ja välisahelas
- Sellega stabiliseeritakse amplituudi .



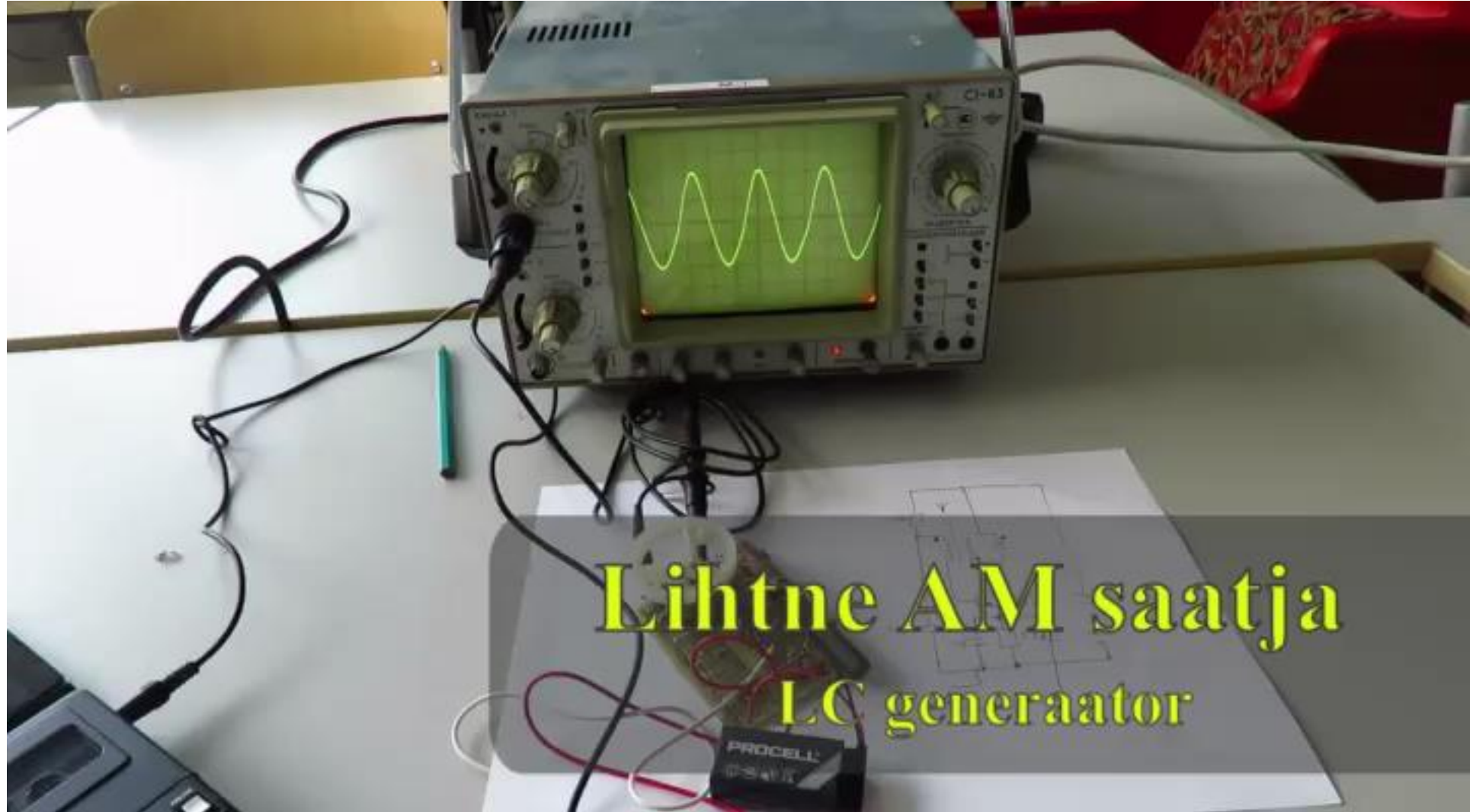
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

# Siinusgeneraator (LC)

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



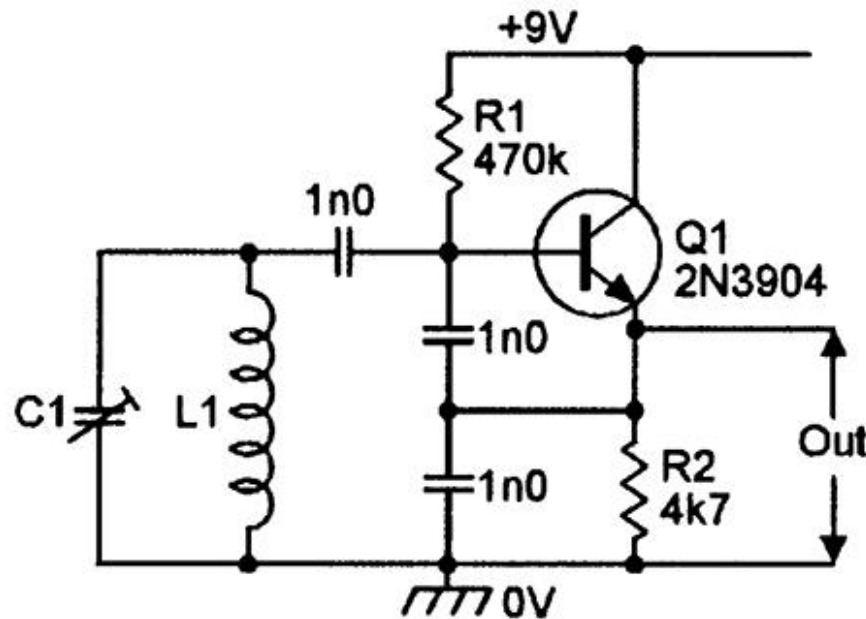
# DEMO



Lihtne AM saatja  
LC generaator

# Siinusgeneraator (LC)

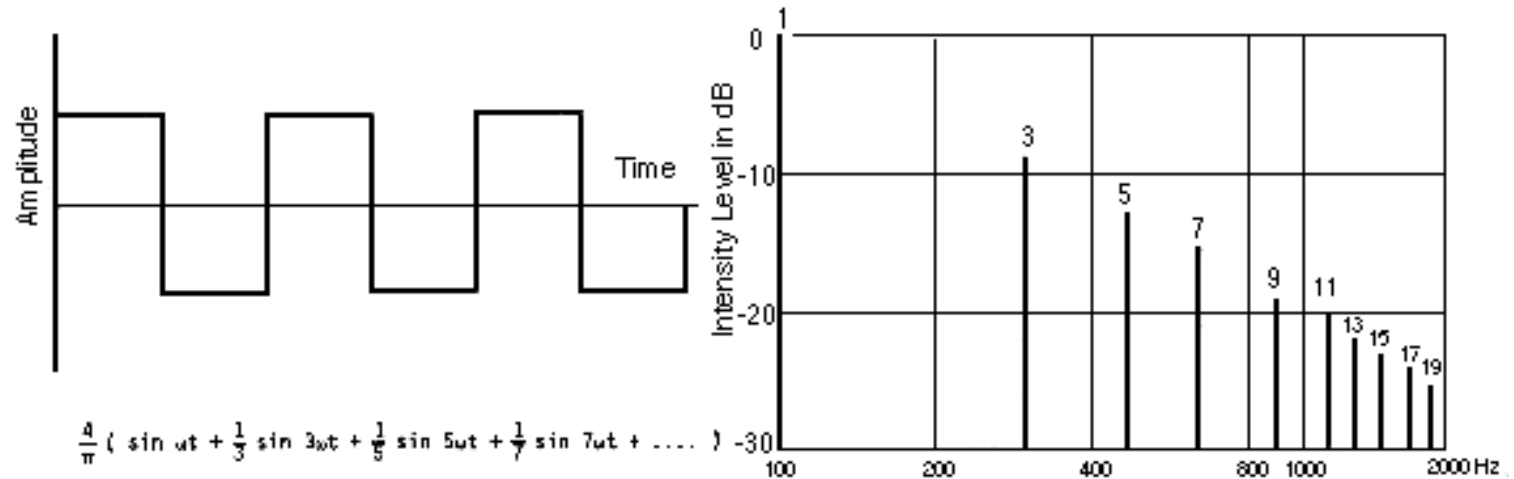
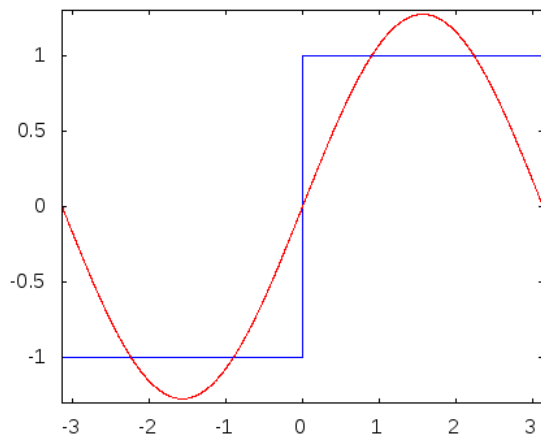
- Transistoritega siinusgeneraatorid on kasutusel u mõnikümmend kHz...GHz .  
Valdavalt sidetehnikas
- Näide (Colpitts ostsillaator)



# Ülikõrged sagedused (100 MHz.....)

- Idee – teeme madalamal sagedusel nelinurksignaali generaatori
- Selle Fourier' spekter on lõpmata lai (kuigi intensiivsus kahaneb)

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



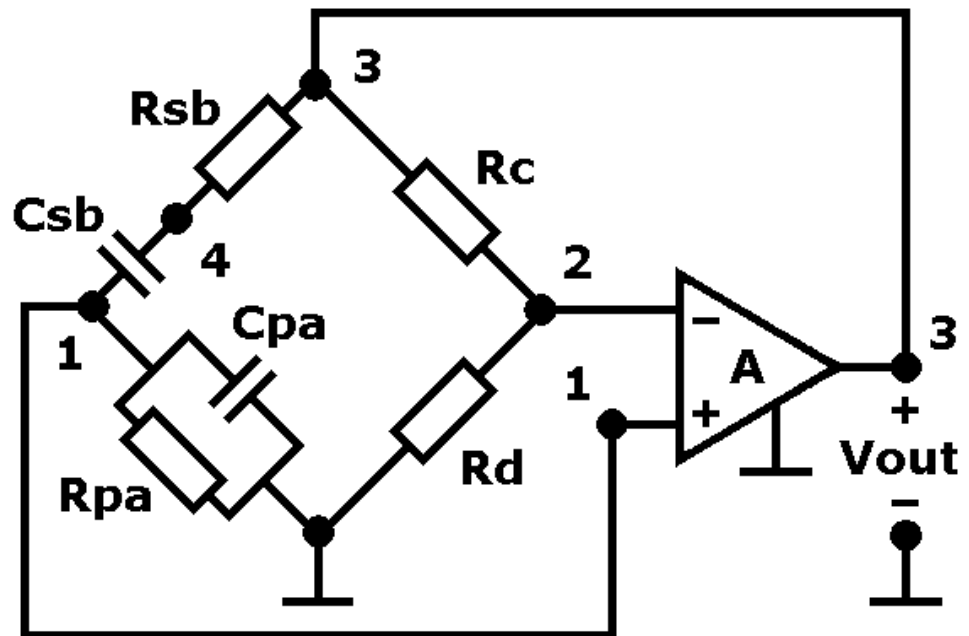
Ja ühendame väljundisse näiteks 5 harmoonilisele häälestatud filtri. Saab sagedust 5 korda suurendada.  
Hädavajalik sagedustel > 1 GHz

# 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  $1/3$

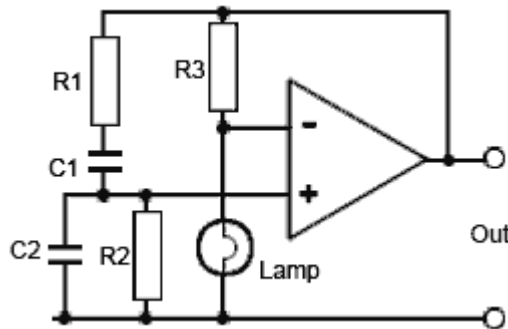
Ehk  $R_c=2R_d$



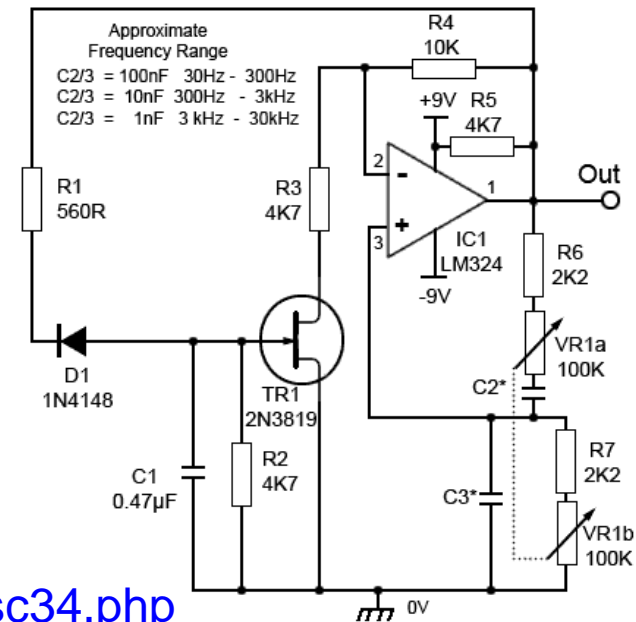


# Siinusgeneraator (RC)

- 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

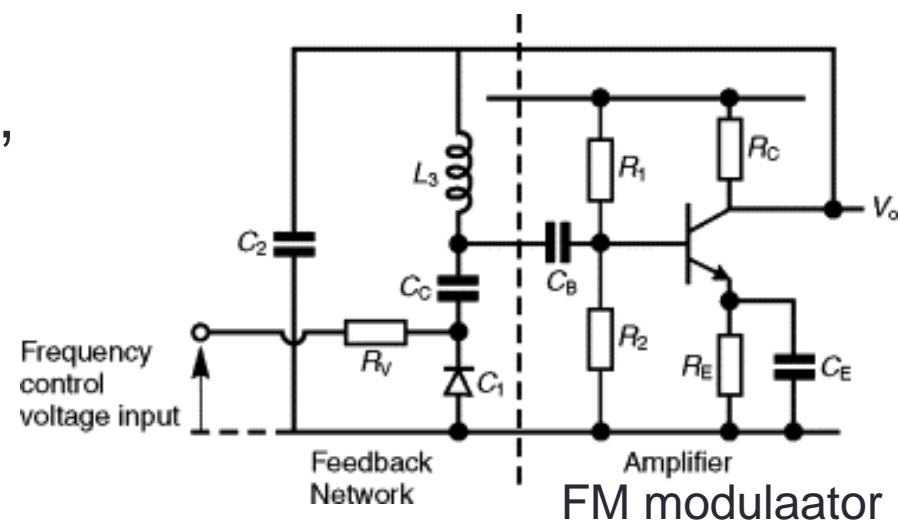


<http://www.learnabout-electronics.org/Oscillators/osc34.php>



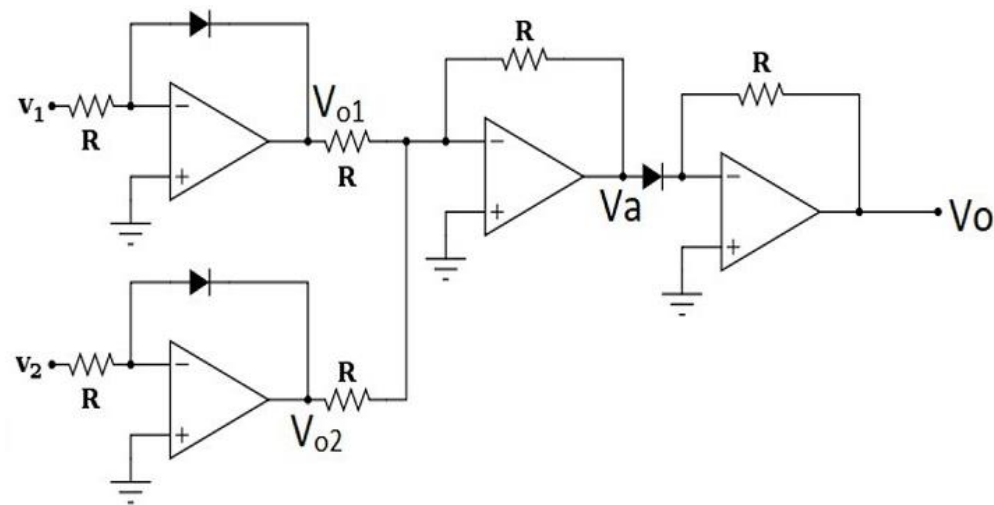
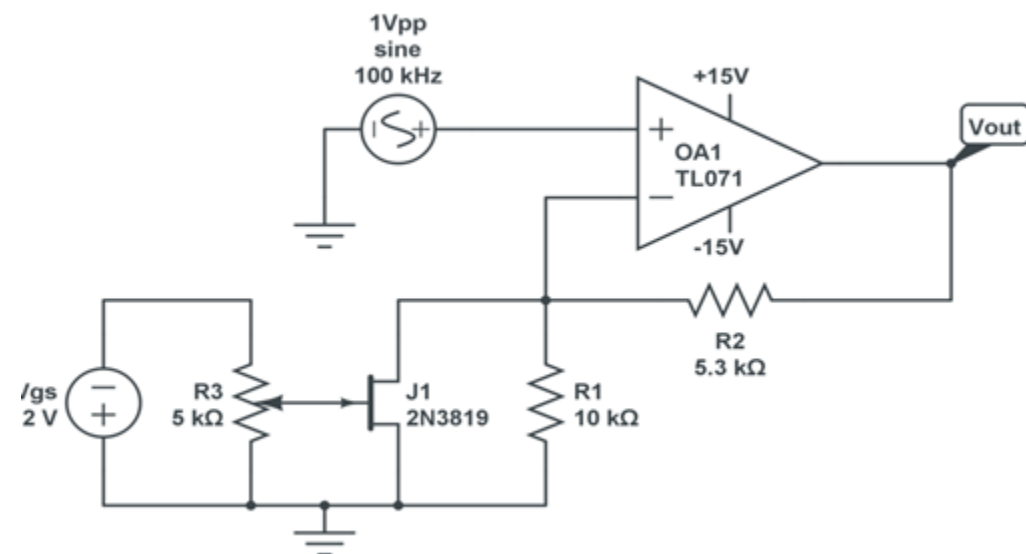
# Pingega tüüritav generaator

- VCO (voltage controlled oscillator)
- Sagadusmodulaatori hädavajalik koostisosa
- Sagedussüntesaatori koostisosa
- Elektrooniline muusika
- Idee – lisame sagedust määrava elemendile pingega juhitava parameetriga elemendi.
- Näiteks LC võnkeringi lisame mahtuvusdioodi.  
(P-N siirde keelutsooni laius sõltub vastupingest , järelkult ka mahtuvus)



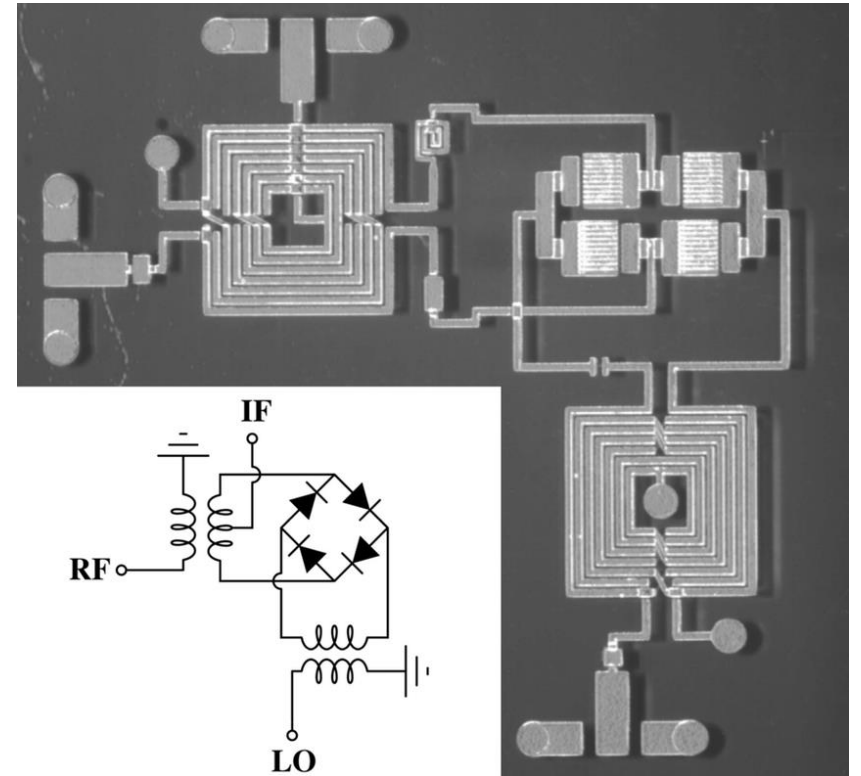
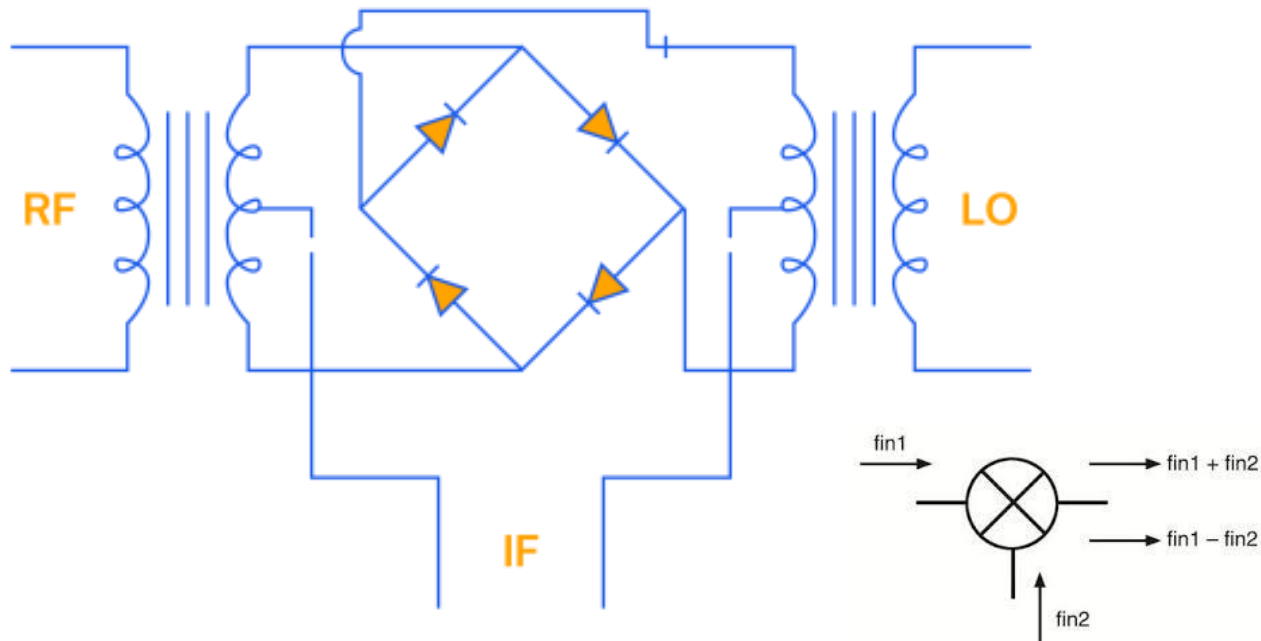
# Pingega tüüritav võimendi

- VCA (voltage controlled amplifier)
- Signaalide analoogkorruti
- Amplituudmodulaatori koostisosa
- Eleektroniline muusika
- Automaatne võimenduse reguleerimine
- Idee – elektrooniline pingejaguri ülekande muutmine (transistor – transformer of resistor)
- Idee 2 – logaritmime signaalid , liidame (lahutame – jagamine), võtame eksponendi. Sedasi saab korrutada rohkem kui 2 signaali korruga



# Kõrgsagedus - balansssegusti

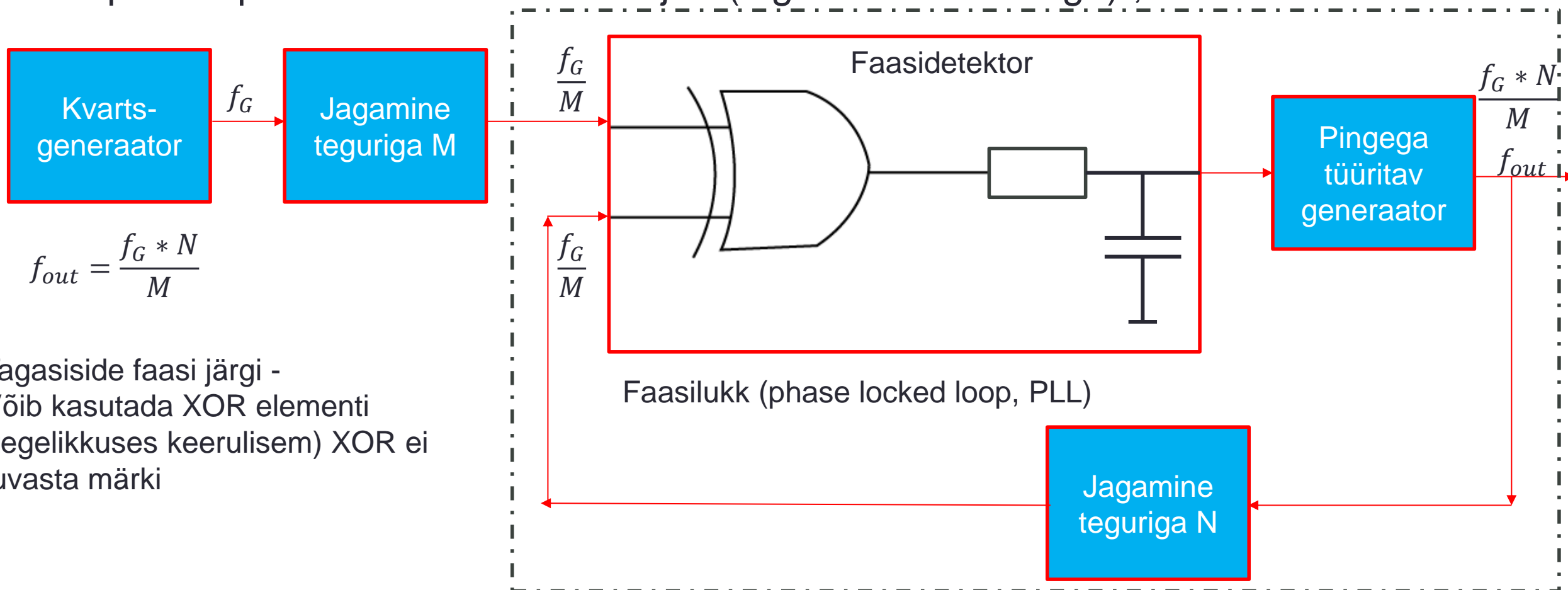
- Passiivne sagedusmuundi 100kHz....GHz
- Passiivne korruti
- Saatjad, vastuvõtjad



10 GHz  $\rightarrow$  1 GHz muundur (SAT TV)

# Sagedussüntesaator

- Vajadus – fikseeritud sagedusest (eelkõige kvartsgeneraator) saada suvalist sagedust
- Tänapäeval pea kõik raadiovastuvõtjad (digitaalhäällestusega) , sideseadmed

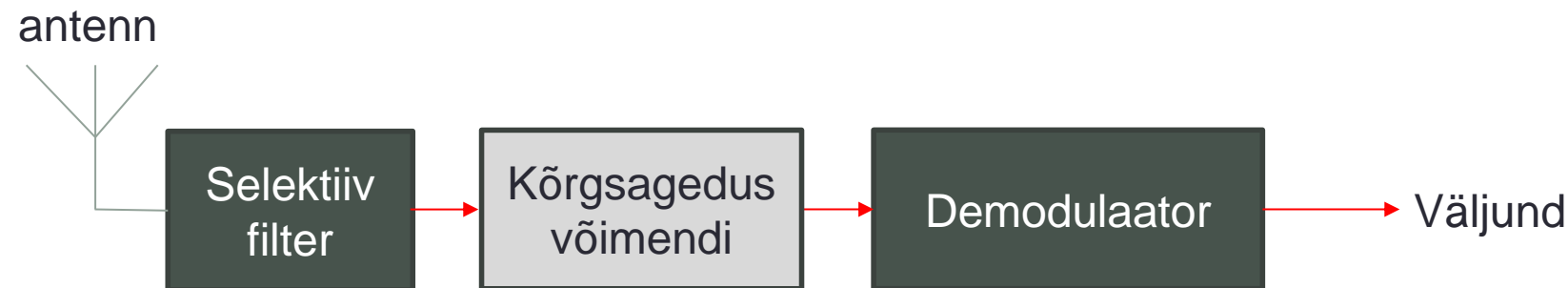


# DEMODULEERIMINE

---

Signaalide vastuvõtt

# Otsevastuvõtja



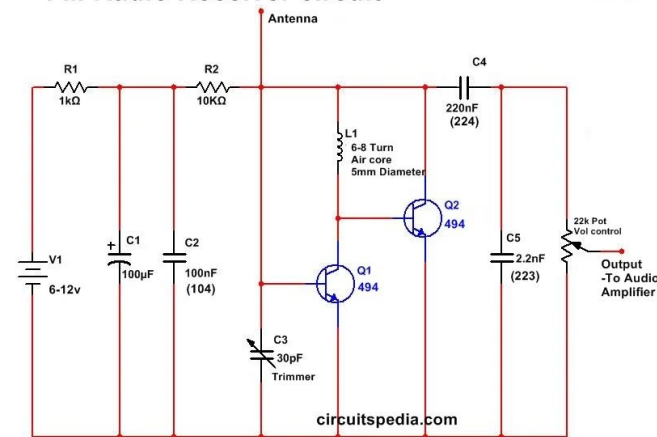
- Ei toimu sagedusmuundamist
- Skeemid lihtsad, ei pea olema isegi kõrgsagedusvõimendit
- Töökindlus madal, selektiivsus halb
- Kasutus : Lihtsad hobiringhäälinguvastuvõtjad (nii AM kui FM)
- Andmeside : Madalad sagedused , lühike vahemaa, madal bitikiirus ( raadio teel juhitud mänguasjad)

Üllatav , et mingisuguse heli saab isegi kätte

Detektorvastuvõtja 1920....

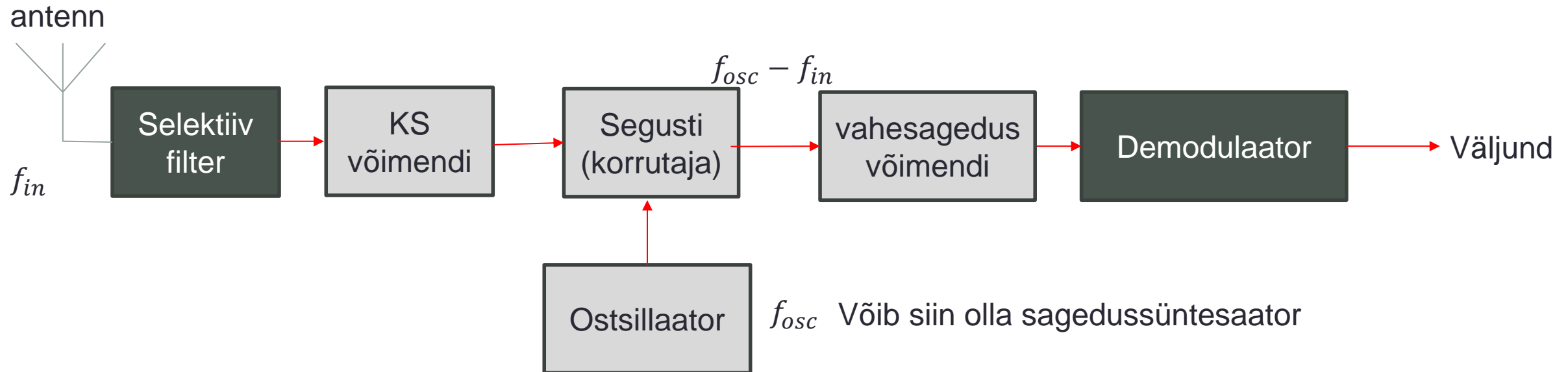


FM Radio Receiver circuit



Komponentide parasiitomadusi ära kasutav FM otsemuundusvastuvõtja

# Superheterodüünvastuvõtja

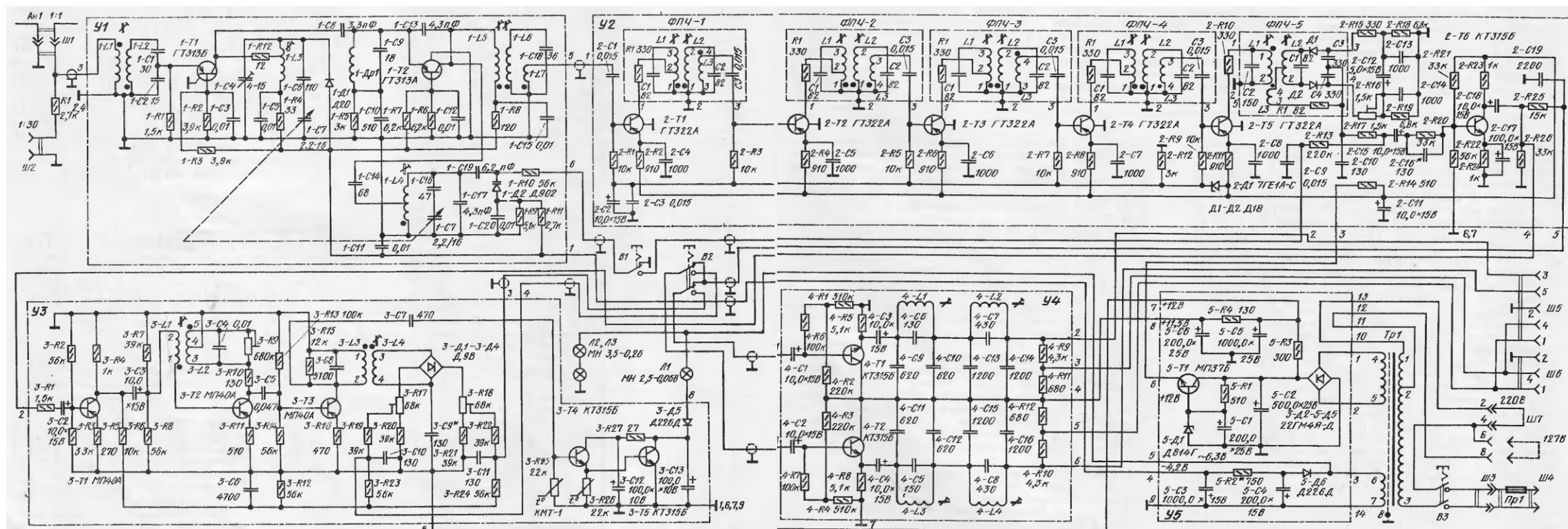


- Enamkasutatav (nii analoog kui digitaal)
- Toimub sageduse muundamine. Eesmärk tuua vastuvõetava signaali spekter madalamale sagedusele
- Kõrgetel sagedustel  $>100$  MHz võimendamine tülikas.
- Põhiline võimendamine toimub kindlas sagedusvahemikus, saab kasutada väga häid filtreid, vahesagedusvõimendisse juhitakse signaal  $f_{osc} - f_{in}$ , mis on kindlas sagedusvahemikus, ära tuleb lõigata peegelsagedus  $f_{osc} + f_{in}$ , mis eemaldatakse vastuvõtja sisendis



# Vanakooli FM transistorvastuvõtja

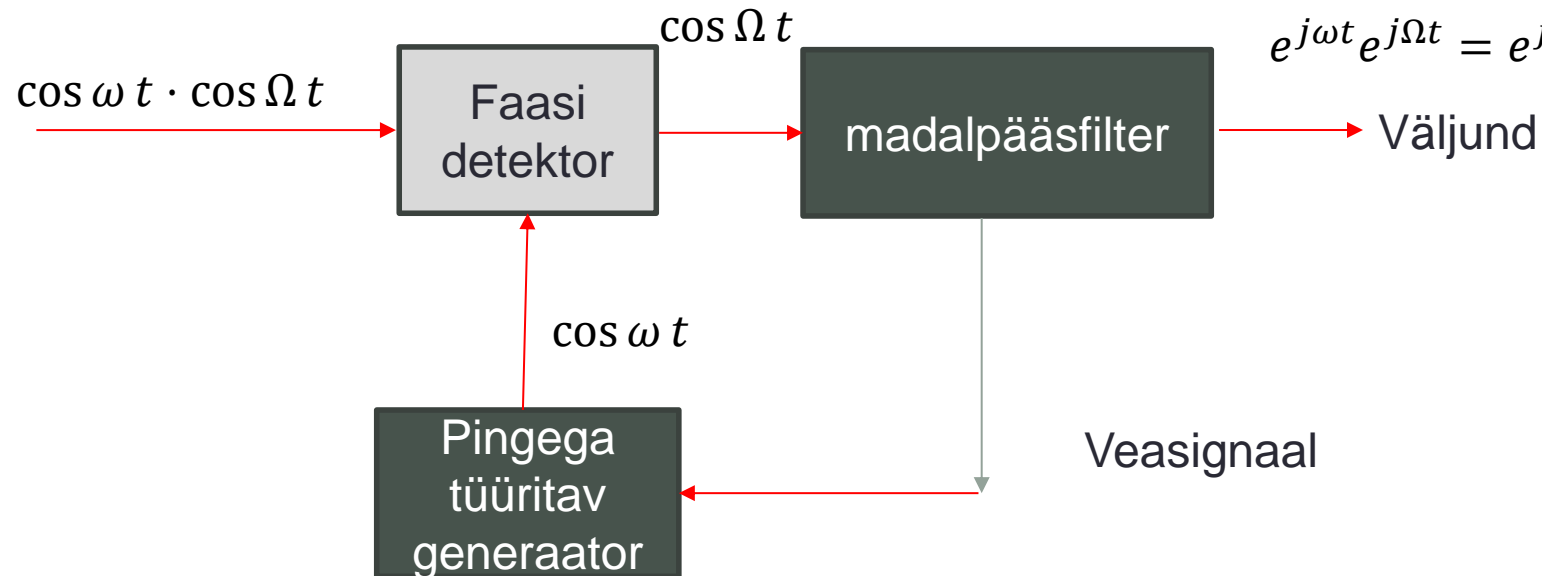
- Rondo 101 stereo ,1976
- Entusiastid naudidavad sellist skeemitehnikat ka tänapäeval
- Tänapäeval tehtav sama funktsionaalsus 1-2 mikroskeemiga



# Signaalide demoduleerimine

- Saab kasutada sama ideed, mis moduleerimisel

$$\cos \omega t \cdot \cos \Omega t = \frac{1}{2} (\cos(\omega + \Omega) t + \cos(\omega - \Omega) t)$$
$$e^{j\omega t} e^{j\Omega t} = e^{j(\omega + \Omega)t}$$

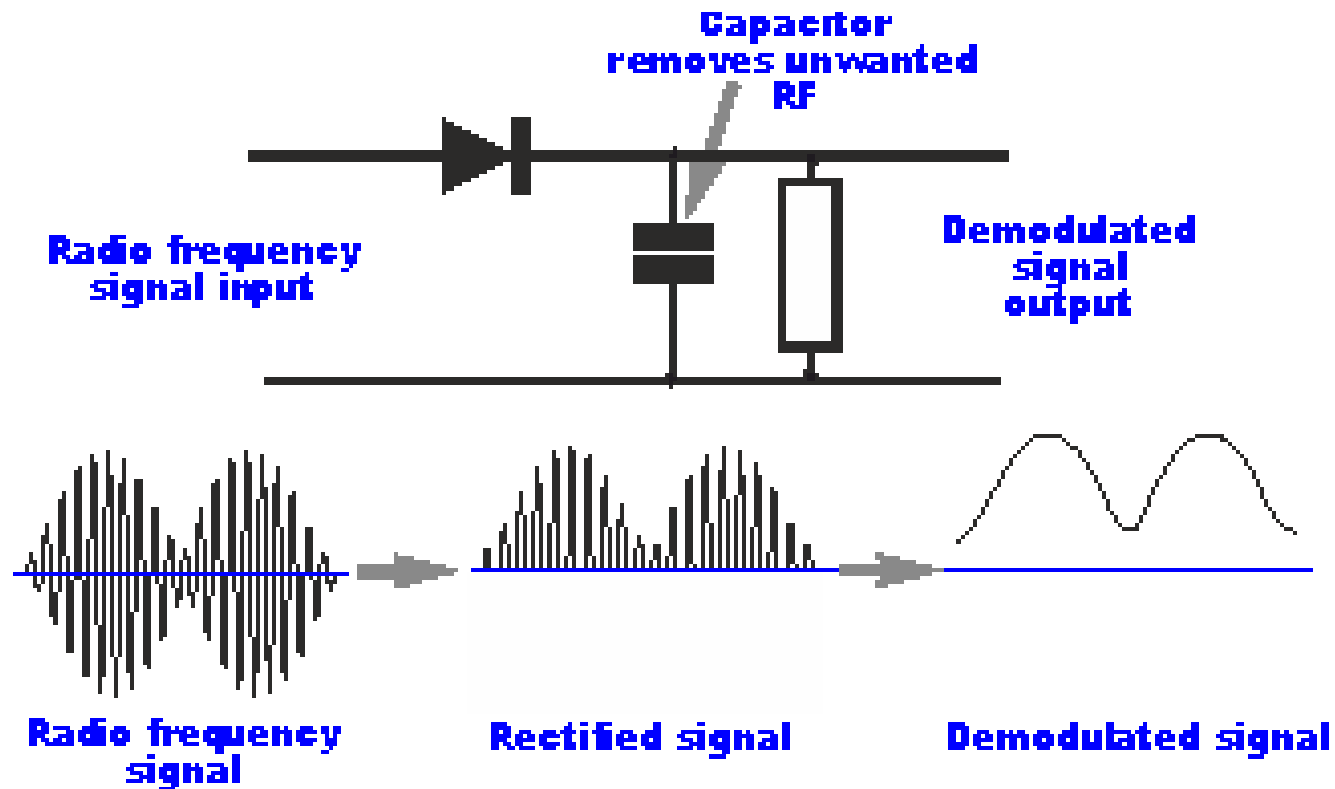


Peab olema rangelt sünkroonis sisendsignaaliga

Tänapäeval enimkasutusel olev meetod (nii analoog-, kui digiifo)

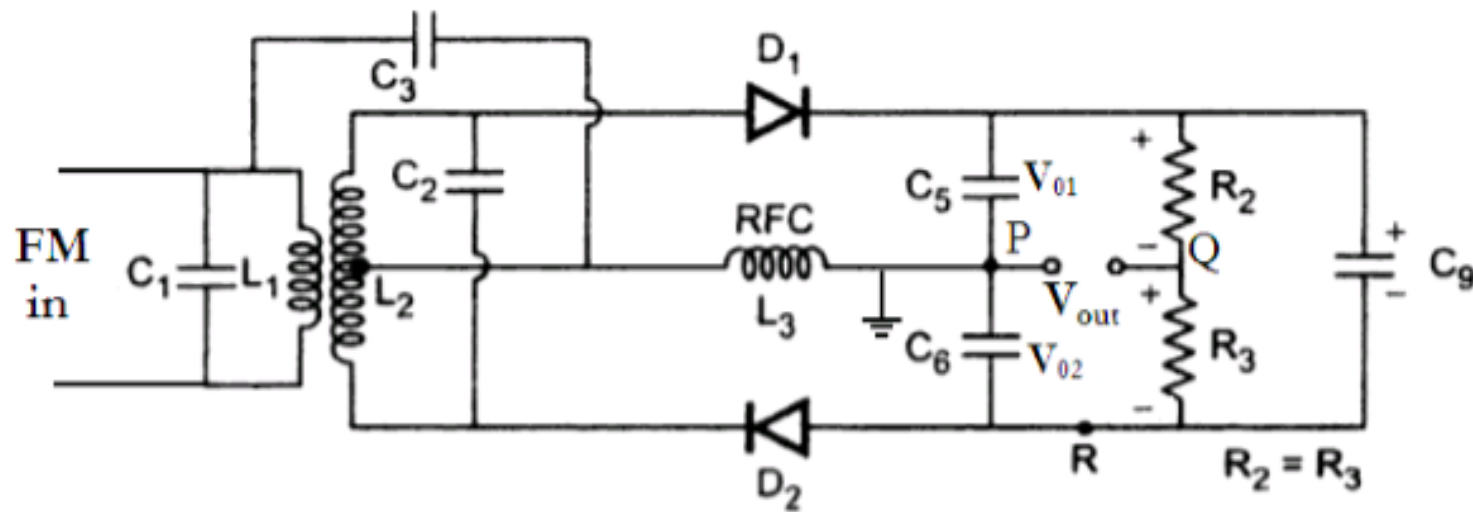
# Klassikaline AM detektor

- Piisab vaid dioodist
- Omaaegsed AM vastuvõtjad



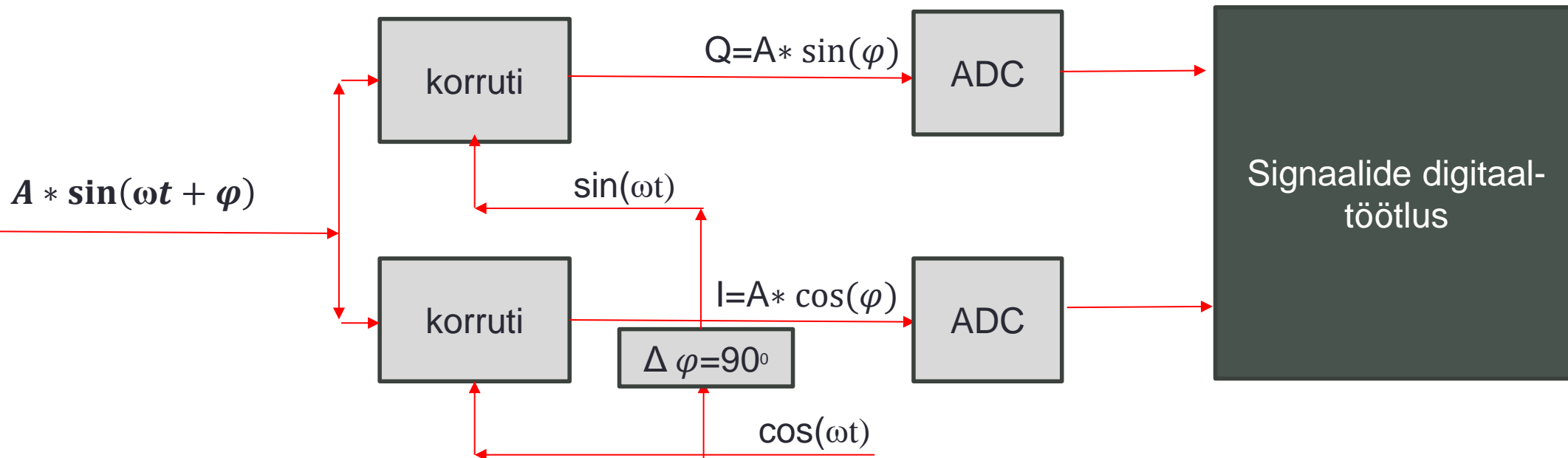
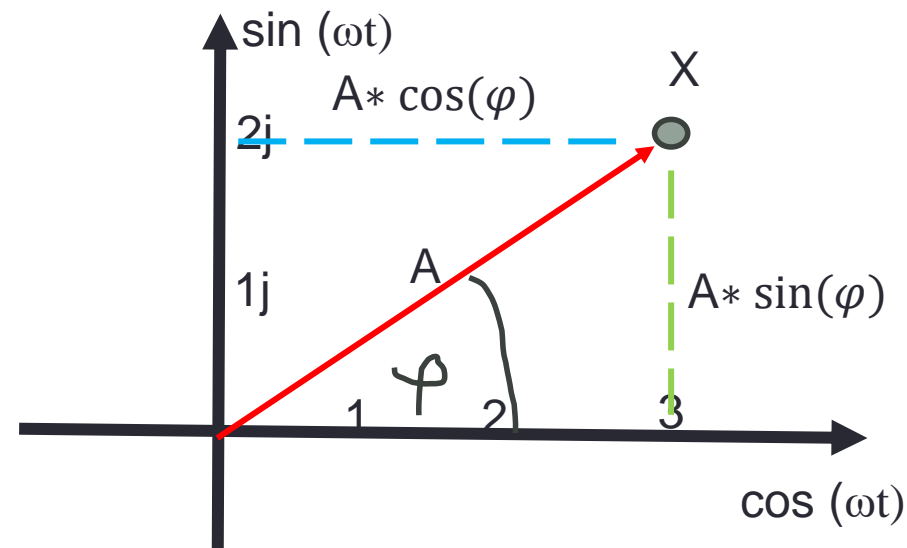
# Klassikaline FM detektor

- Sageduse muutus muudetakse amplituudi muutuseks
- Suhtedetektor
- Tänapäeval kasutatakse harva



# QAM

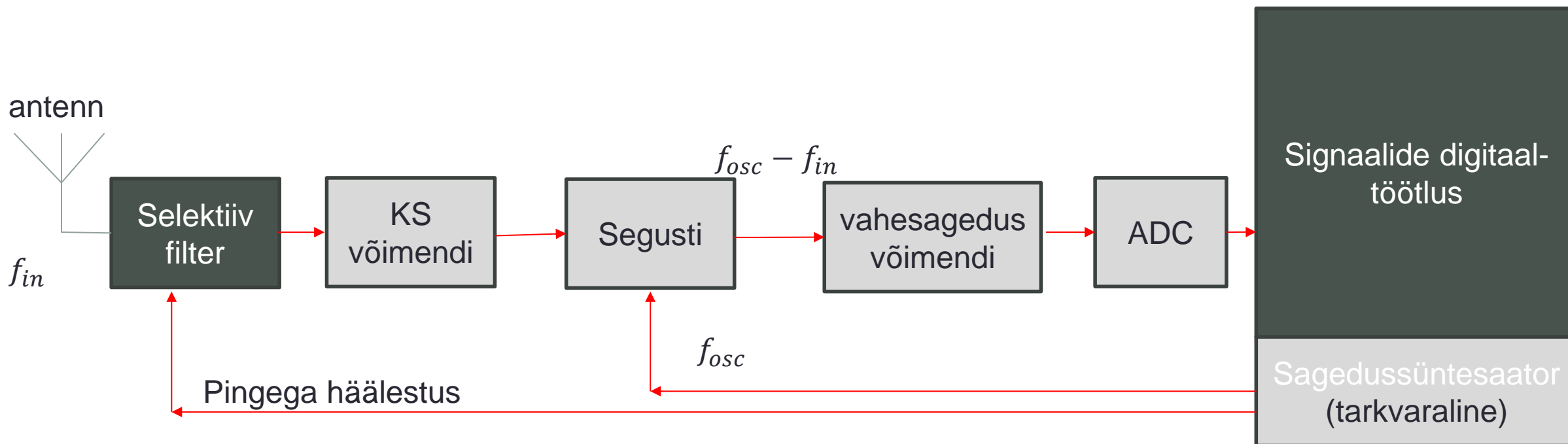
- Vaja leida Punkt X
- Projektsioonide leidmiseks korrutame signaali läbi
- $Q = \sin(\omega t) * X$ ,  $I = \cos(\omega t) * X$  ja võtame keskväärtuse



$$X = A * \sin(\omega t + \varphi) = A * \cos(\omega t) A * \cos(\varphi) - A * \sin(\omega t) \sin(\varphi)$$

# Tarkvaraline raadio

- SDR (software defined radio) .
- Kõik alates demoduleerimisest tehakse tarkvaras
- Praktiliselt kõik raadioseadmed, mida hetkel poest saab osta.



# Tarkvaraline raadio

- Kahesuunalised seadmed (nt mobiiltelefon)

