

# Synkronisen ilmaisimen käyttö langanseurannassa

JK 24.8.2008

## Johdanto

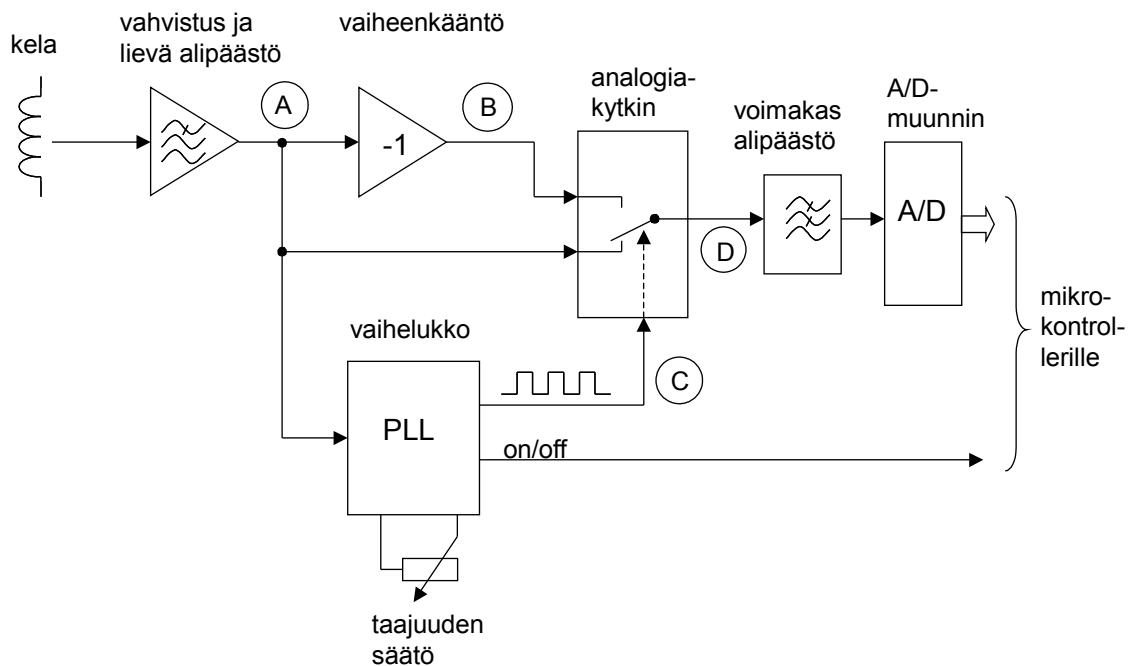
Langanseurannassa on tarve tunnistaa ja ilmaista langan taajuus muiden häiriötaajuuksien joukosta. Tyypillisiä häiriötaajuuksia robotissa ovat esim. moottorien PWM-taajuus. Useimmiten ilmaisuun käytetään kapeakaistaista kaistanpäästösuodatinta, joka vaimentaa muita taajuuksia riittävästi.

Tässä artikkelissa kuvataan hiukan toisenlaista lähestymistapaa: vaihelukittuun silmukkaan perustuvaa synkronista ilmaisinta, jolla saadaan ilmaisusta erittäin kapeakaistainen ja kokemusten mukaan myös varsin stabiili.

## Ilmaisimen toiminta

Synkroninen ilmaisim ei ole mikään uusi keksintö: sellaista on käytetty radiotekniikassa jo vuosikymmeniä. Sielläkin on yleensä saman tyyppinen tarve kuin tässä: pitää erotella tietyn taajuinen signaali muista, hyvinkin lähellä olevista taajuuksista.

Robottikäyttöön soveltuvan ilmaisimen lohkokaavio on kuvassa 1.



Kuva 1. Lohkokaavio

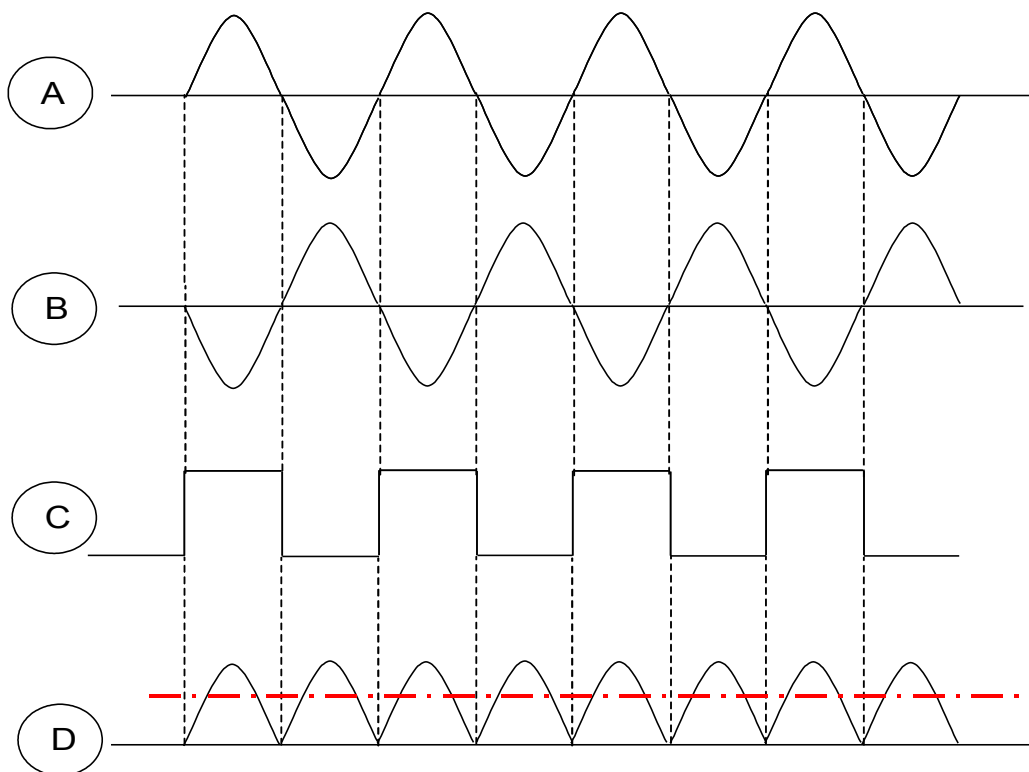
Ensin anturikelalta saatava signaali vahvistetaan. Samalla sille voidaan tehdä lievä alipäästösuodatus. Tämä ei ole välttämätöntä, mutta se vaimentaa korkeimpia häiriötaajuuksia.

Vahvistettu signaali viedään vaihelukitulle silmukalle, joka lukkiutuu signaalin sisältämään ilmaistavaan taajuuteen. Vaihelukon perustaajuutta säätämällä voi säätää ilmaisukaistan keskitaajuutta.

Vaihelukolta saadaan ulos kaksi signaalia: kanttiaalto, joka on saman taajuinen ja vaiheinen kuin ilmaistava taajuus, sekä on/off-tyyppinen signaali, joka kertoo, onko vaihelukko lukkiutunut, eli sisältääkö tulosignaali ilmaistavaa taajuutta yleensäkin. Vaihelukolta saatava kanttiaalto on aina täsmälleen saman taajuinen kuin sisääntulosignaalin sisältämä ilmaistava taajuus, vaikka tämä poikkeaisikin nimellistaajuudesta, kunhan poikkeama ei ole niin iso, että vaihelukko ei pysty lukkiutumaan ollenkaan.

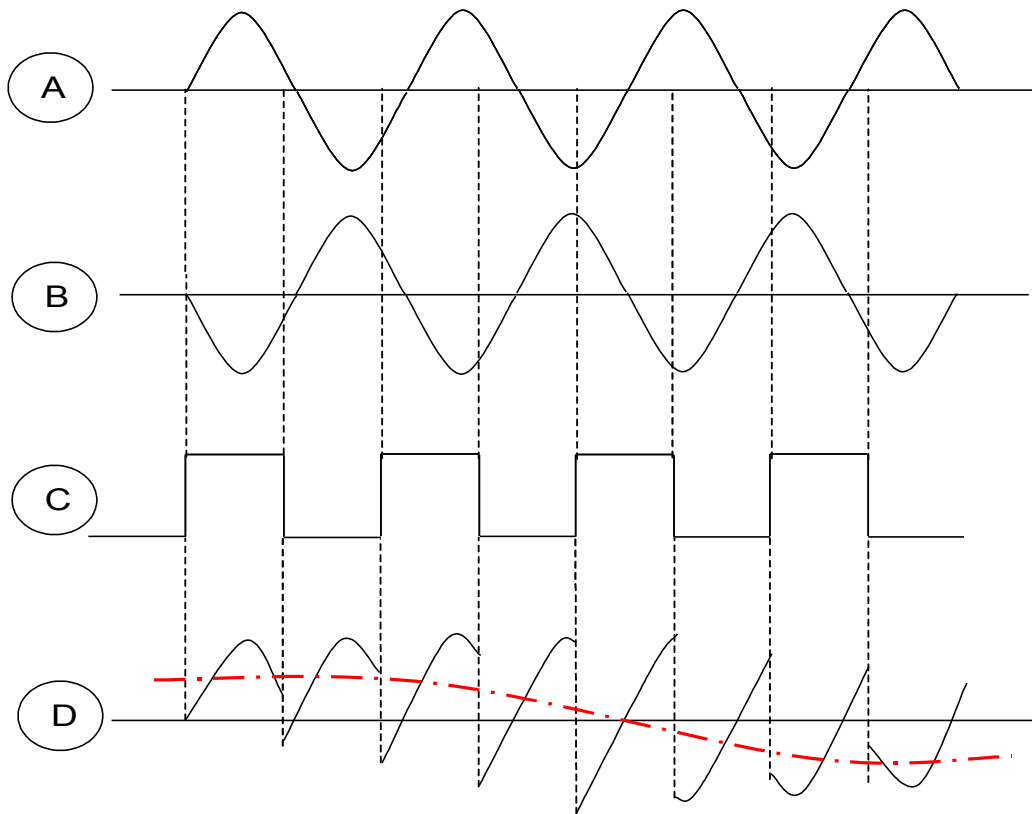
Vahvistettu sisääntulosignaali viedään myös vaiheenkäntävälle yksikkö-vahvistimelle ja näin saadut alkuperäinen ja vastakkaisvaiheinen signaali viedään molemmat analogiakytkimelle. Kytkintä ohjataan vaihelukolta saatavalla kanttiaallolla. Tässä on koko menetelmän ydin: kytkin kytkee lähtönsä vuorotellen suoraan ja vastakkaisvaiheista signaalia. Vaihto tapahtuu puolen jakson välein.

Kuvassa 2 näkyy aaltomuodot kuvaan 1 merkityissä pisteissä A...D silloin, kun sisääntulosignaali on sama, johon vaihelukko on lukkiutunut. Tällöin kytkintä ohjaava kanttiaalto on saman taajuinen ja vaiheinen, jolloin kytkin kääntyy tarkalleen tulosignaalin 0-kohdissa, ja signaalille tapahtuu kokoaaltotasasuuntaus.



Kuva 2. Aaltomuodot, ilmaistava taajuus

Kuva 3 näyttää, miten käy silloin, kun tulosignaalin taajuus poikkeaa vaihelukon taajuudesta, eli vaihelukko ei ole joko lukkiutunut ollenkaan (ja värähtelee siis vapaasti nimellistaajuudellaan) tai kyseessä on tulosignaalin sisältämä muu taajuuskomponentti. Tällöin analogiakytkimen kääntymiset eivät satu signaalin 0-kohtiin, ja kytkimeltä ulos tuleva signaali on pätkitty satunnaisista kohdista. Tällaisen aaltomuodon keskiarvo on pidemmällä ajalla 0.



Kuva 3. Aaltomuodot, muu taajuus

Molempiin kuviin on piiretty D-signaalin päälle punaisella katkoviivalla analogiakytkimeltä saatavan signaalin keskiarvo. Kuvassa 2 tuloksena on tulosignaalin amplitudiin verrannollinen tasajännite. Kuvan 3 tapauksessa syntyy matalampitaajuinen aaltomuoto, jonka DC-komponentti on 0. Tämä suodatetaan pois seuraavassa asteessa.

Analogiakytkimen jälkeen on voimakas alipäästö. Tämän ei tarvitse olla jyrkkä, passiivinen RC-suodatus riittää, mutta sen rajataajuus voi olla hyvin alhainen. Riittää, että ilmaistavan signaalin ylin muutostaajuus menee suodatuksesta läpi. Langanseurannan tapauksessa langan taso muuttuu hitaasti, enintään muutamia kertoja sekunnissa, joten tätä isompia taajuuksia ei tarvitse päästää läpi.

Lopuksi suodatuksen tasoittama signaali luetaan A/D-muuntimella kontrollerin käsiteltäväksi.

## Toteutus

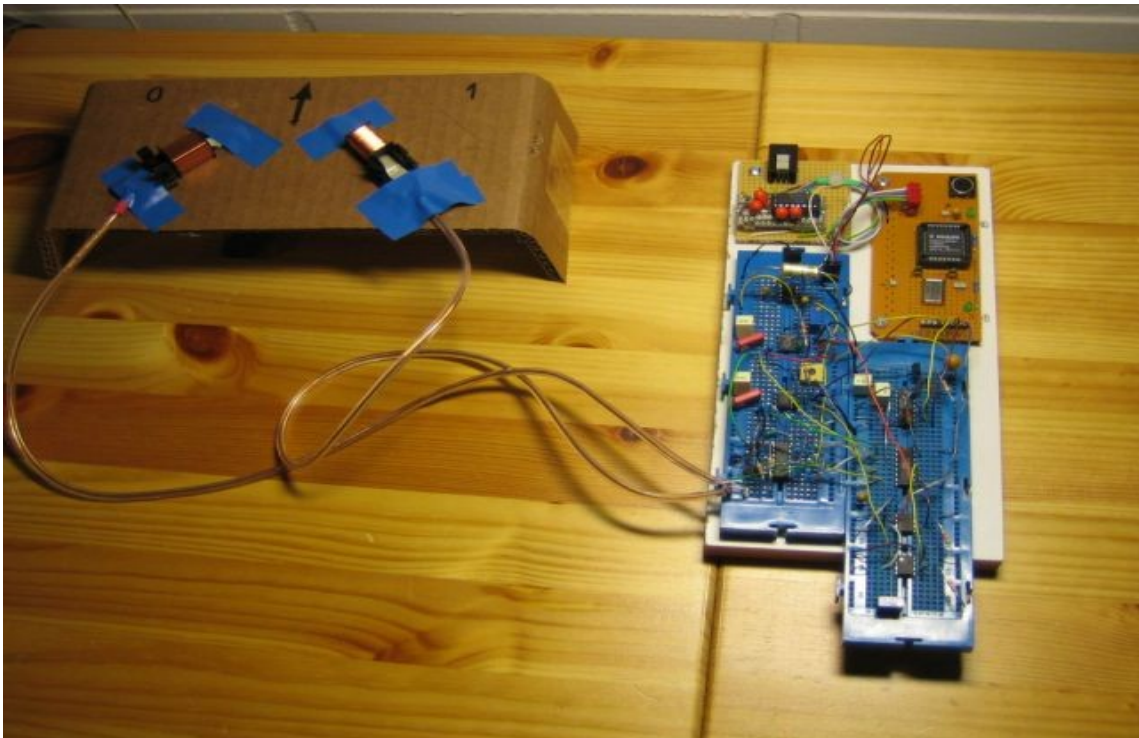
Edellä kuvattua teoriaa sovelsin käytäntöön seuraavasti:

- Anturikelana toimii Partcon tarjoushyllystä löytynyt ilmasydäminen kela, jonka kierrosmäärästä ei ole tietoa (Partcon speksit olivat ”lanka ohutta, kierroksia perhanasti”).
- Ensimmäisen asteen vahvistin on toteutettu operaatiovahvistimella (TL074) ja vahvistuskerroin on n. 6. Vahvistimeen on tehty loiva alipäästö kytkemällä pieni kondensaattori takaisinkytkentävastuksen yli.
- Vaiheenkääntäjä on tehty samaisella TL074:llä, vahvistus on 1.
- Vaihelukkona toimii NE567. Se on viritetty 32768 Hz taajuudelle, kaistanleveys n. 5%, eli toimii suunnilleen alueella 31900...33600 Hz.
- analogiakytkin on 4053
- RC-suodatus on  $56\text{ k}\Omega + 1\ \mu\text{F}$ , eli aikavakio n. 50 ms
- A/D-muunnin on I2C-liitäntäinen PCF8591

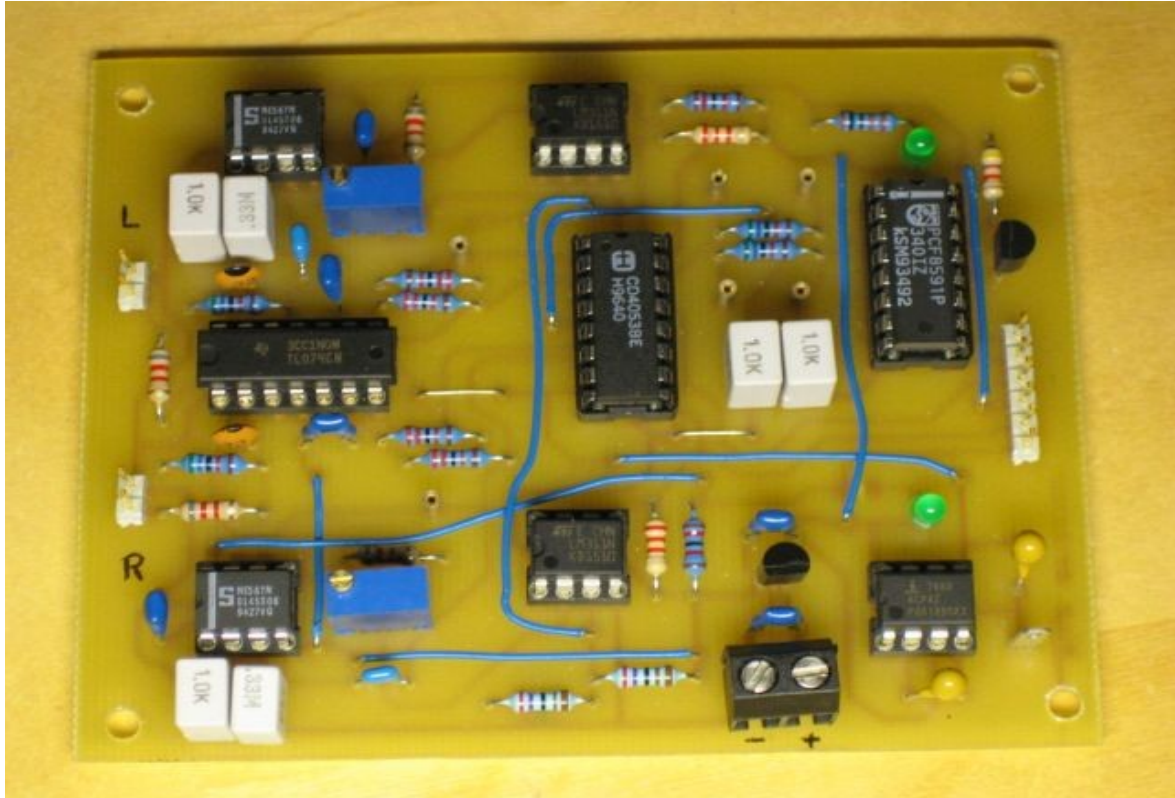
Näitä koneistoja on 2 kpl, kumpaakin kela varten. Analogiakytkin ja A/D-muunnin ovat yhteiset kummallakin kanavalle.

NE567:ssa on se hankaluus, että sieltä ei ole suoraan saatavissa kanttiaaltoa, joka olisi saman vaiheinen kuin sisään tuleva taajuus. Ainut tarjolla oleva kantti on hankalasti  $90^\circ$  vaihesiirrossa. Sieltä on kuitenkin saatavissa samanvaiheista kolmioaaltoa, josta pääsee tekemään kanttia syöttämällä sen komparaattoriin. Tässä käytin LM311:tä.

Kuvassa 4 näkyy protoversio, jolla testailin kytkentää. Valmis kortti on kuvassa 5.



Kuva 4. Protoversio



Kuva 5. Valmis ilmaisim

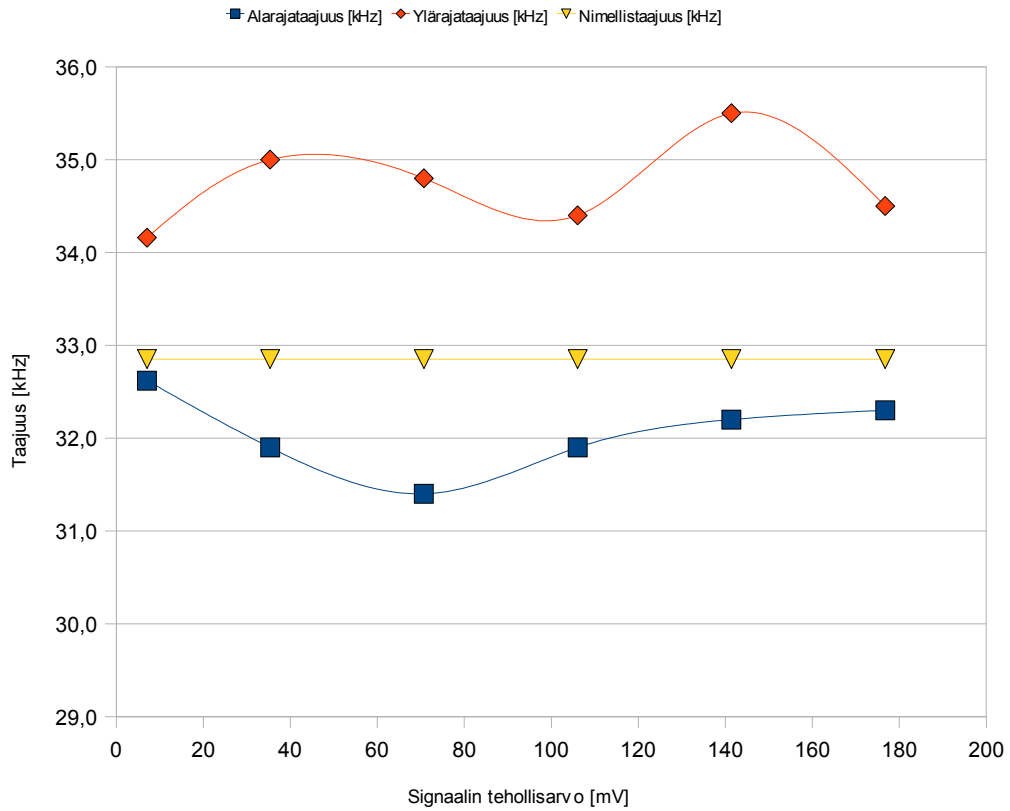
## Mittaustuloksia

Mittailin ilmaisinta kytkennällä, jossa sisäänmenoon syötettiin mikserin kautta 32768 Hz siniä tai kanttia ja vaihtelevantaajuisia sinimuotoista häiriösignaalia. Kummankin signaalin tasoa pystyi säätämään erikseen. Syöttö tapahtui suoraan kelan liittimistä, eli tässä näkyvät sisääntulosignaalin arvot vastaavat siis kelalta saatua signaalia.

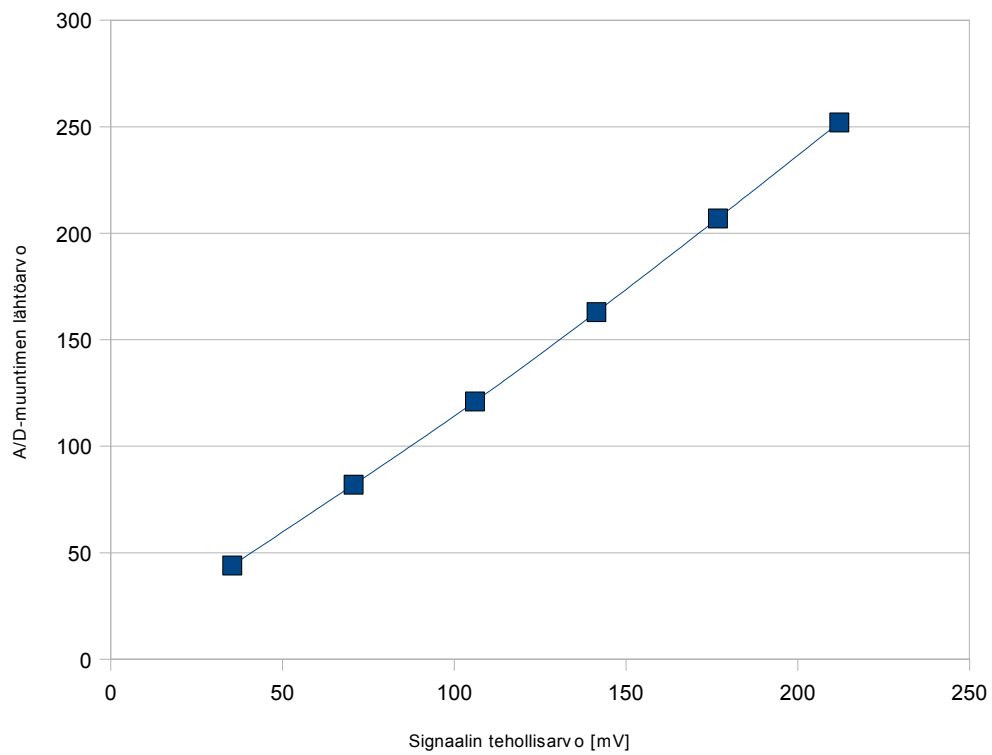
Kuvassa 6 näkyy, miten ilmaistava taajuusalue riippuu tulosignaalin tasosta. Signaalina on nimellistaajuinen siniaalto n. 100 mV tasolla. Alue ei ole ihan symmetrinen, ylöspäin se on leveämpi kuin alaspäin, ja riippuu hiukan tasosta. Keskimäärin noin -2,5 ... +5 %.

Kuvassa 7 näkyy 8-bittiseltä A/D-muuntimelta saatava lähtöarvo suhteessa tulosignaalin tasoon. Signaalina on nimellistaajuinen siniaalto. A/D-muunnin saavuttaa maksimiarvon jossain runsaan 200 mV kohdalla.

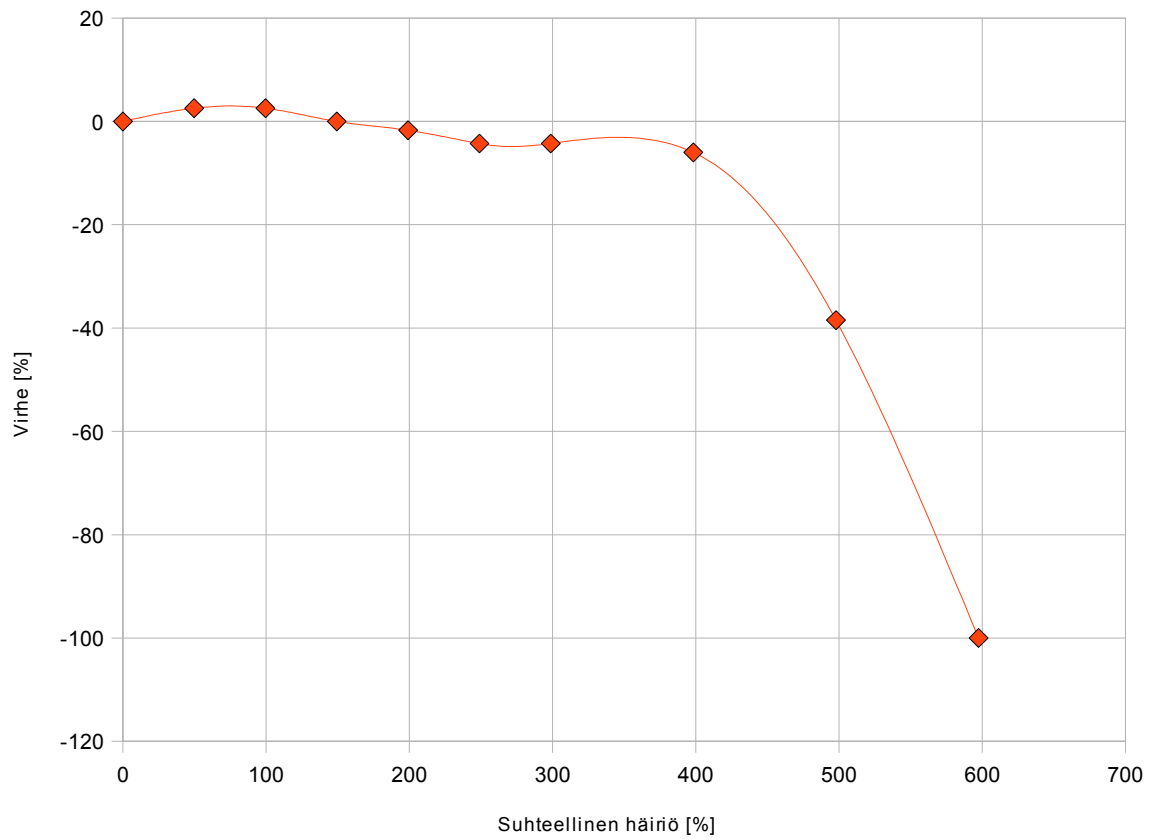
Kuvassa 8 on ilmaisimeen syötetty nimellistaajuisia kanttiaaltoja ja samanaikaisesti -10% taajuisia (29,5 kHz) sinimuotoista häiriötä eri tasoilla. Käyrästä näkyy, että vielä 400% häiriöllä (häiriötaajuus on 4 kertaa voimakkaampi kuin mittattava signaali) häiriön aiheuttama mittausvirhe on alle 5%. Siitä isommilla häiriötasoilla mittausvirhe kasvaa nopeasti ja 600% kohdalla vaihelukko ei enää lukkiudu mitattavaan signaaliin.



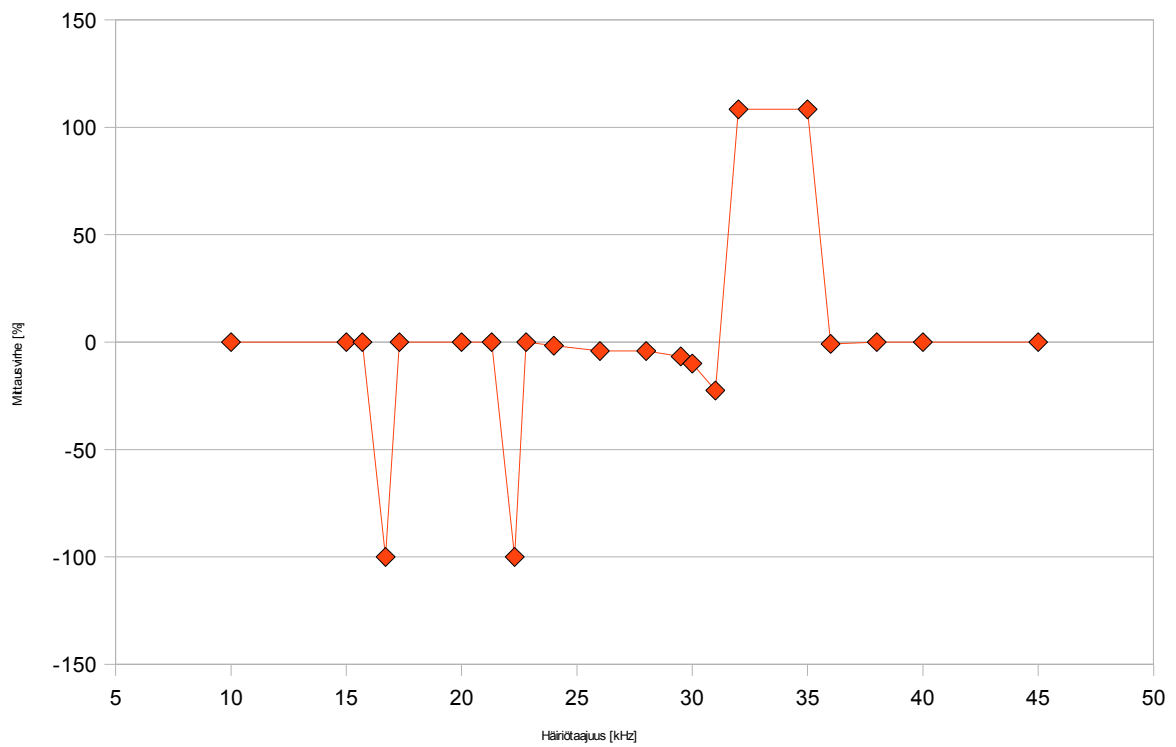
Kuva 6. Ilmaisun taajuusrajat eri tulosignaalin tasoilla



Kuva 7. A/D-muuntimen lähtöarvo vs. tulosignaali



Kuva 8. Mittausvirheen riippuvuus häiriösignaalin tasosta



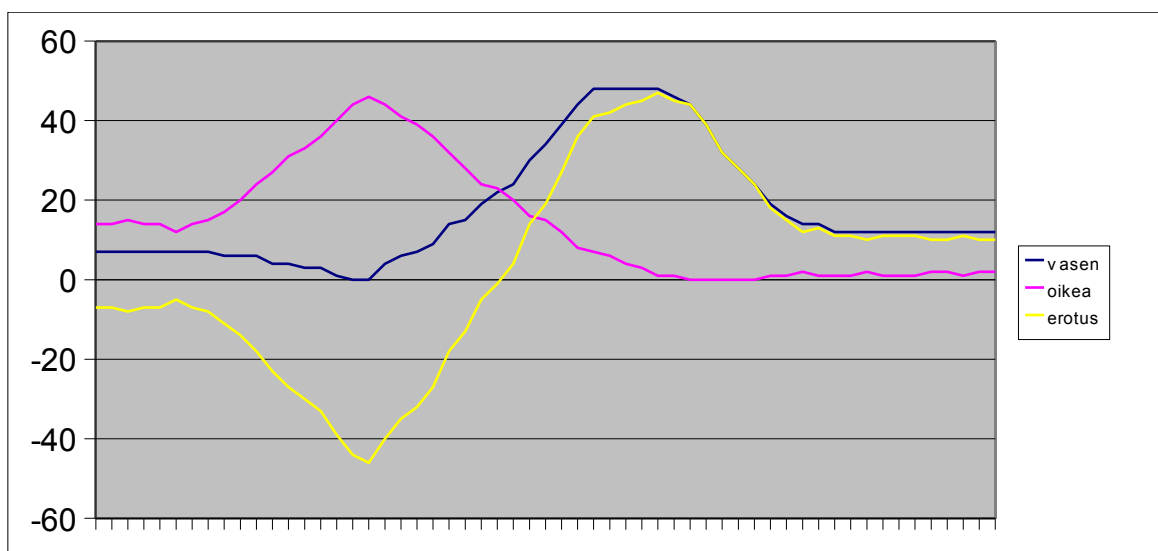
Kuva 9. Mittausvirheen riippuvuus häiriösignaalin taajuudesta

Kuvassa 9 on ilmaisimeen syötetty nimellistaajuista kanttiaaltoa ja samanaikaisesti vaihtelevan taajuista sinimuotoista häiriötä, jonka taso on 300% signaalin tasosta. Käyrästä näkyy, että vaihelukko hukkaa signaalin n. 16 kHz ( $\frac{1}{2}$  nimellistaajuudesta) ja n. 22 kHz ( $\frac{2}{3}$  nimellistaajuudesta) taajuuksilla, johtuen ilmeisesti häiriösignaalin harmonisista. Välillä 32...35 kHz häiriötaajuus on ilmaisukaistalla ja vaihelukko on lukkiutunut tähän, jolloin myös mittaustulos kuvastaa häiriön voimakkuutta, ei hyötysignaalin. Taajuuksilla alle 15 kHz ja yli 35 kHz oleville häiriöille ilmaisimella on lähes tunteeeton.

Johtopäätöksenä mittauksista voi todeta, että ilmaisimella sietää häiriötä varsin hyvin. Signaali löytyy hyvin tasoltaan moninkertaisen häiriön joukosta. Pahimpia ovat sellaiset häiriötaajuudet, joiden harmoniset sattuvat ilmaisukaistalle. Näissäkin tapauksissa kyseessä on vain hyvin kapea taajuuskaista, jossa oleva häiriö sotkee ilmaisimen toiminnan.

Tein myös hiukan käytännönläheisemmän mittauksen siirtämällä kelaparia (näkyvä kuvassa 4) sivusuunnassa langan yli vasemmalta oikealle suunnilleen tasaisella nopeudella. Kuvan 10 pystyakselin yksikkö on A/D-muuntimelta luettu arvo, vaakakselilla juoksee aika. Kelojen keskipisteiden etäisyys on n. 9 cm ja korkeus "maasta" (langan tasosta) 5 cm, mikä vastaa robotissa käyttämiäni mittoja.

Kuvassa näkyy selvästi, miten oikean puoleinen kela lähestyy ensin lankaa, saavuttaa huipun langan kohdalla, ja alkaa vaimentua. Samalla vasemman puoleinen kela alkaa voimistua, saavuttaa huipun ja alkaa lopulta vaimentua. Langan ollessa kelojen puolivälissä signaalit ovat yhtä suuret. Keltainen viiva on signaalien erotus, jota robotissa käytetään PID-säädön input-signaalina. PID pyrkii ohjaamaan moottoreita siten, että erotus pysyy nollassa.



Kuva 10. Mittausarvot kelaparin siirron aikana



Nämä arvot ovat ”raakoja” A/D-muuntimen arvoja ilman minkäänlaista ohjelmallista suodatusta. Voimakas RC-suodatus juuri ennen A/D-muuntimen sisäänmenoa poistaa arvoista nopean satunnaisvaihtelun tehokkaasti.

## Käytännön kokemuksia

Robotissa ilmaisimien on osoittautunut varsin toimivaksi. Se tuottaa stabiileja mittaustuloksia, jotka eivät vaadi juurikaan ohjelmallista suodatusta. Omassa robotissani moottorien PWM-taajuus on n. 23 kHz, joka on sopivasti sellaisella taajuudella, johon ilmaisimien ei juurikaan reagoi. Mittausten mukaan moottoreista indusoituu PWM-taajuutta keloihin luokkaa 70 mV. Edellä esitettyjen mittaustulosten perusteella ilmaisimien sietää 400% häiriön ilman, että mittaustulos vääristyy merkittävästi, joten voi laskea, että vielä luokkaa 17 mV oleva hyötysignaali saadaan kelalta ilmaistua luotettavasti moottoreiden ollessa käynnissä. Tällöin aletaan jo olla lähellä ilmaisimen ilmaisurajaa, joka on n. 10 mV silloin, kun signaalissa ei ole häiriötä mukana.