

# DC-moottorin pyörimisnopeuden mittaaminen back-EMF-menetelmällä

JK 23.10.2007

## Johdanto

Harrasteroboteissa käytetään useimmiten voimanlähteenä DC-moottoria. Tämä moottorityyppi on monessa suhteessa kätevä ja itsestään selväkin valinta tähän käyttöön. Sen yhtenä huonona puolena on, että moottorin pyörimisnopeus hidastuu kuormituksen mukana. Jos moottoria ei halua reilusti ylimitoittaa, siihen voi tehdä takaisinkytketyn pyörimisnopeuden säädön, joka kompensoi kuormituksen vaihtelua. Takaisinkytketty säätö vaatii aina jonkun tavan, jolla mitataan moottorin pyörimisnopeutta. Tähän voi käyttää erilaisia pulssiantureita, mutta harrastajalle riittävän suuriresoluutioisten antureiden konstruointi on turhan monimutkaista, ja valmiina ostettavat taas ovat varsin kalliita. Molemmissa tapauksissa tulee lisää mekaniikkaa, joka yleensä jo muutenkin on harrasterobottien heikko kohta.

Tässä artikkelissa käsittelen hiukan teoriaa sekä omia käytännön kokemuksiäni back-EMF-menetelmän käytöstä DC-moottorin pyörimisnopeuden mittamiseen. Menetelmän suurin etu on, että mittaamiseen ei tarvita minkäänlaista anturia.

## Back-EMF-menetelmän taustaa

DC-moottori on kaksisuuntainen laite siinä mielessä, että se pystyy toimimaan myös generaattorina: kun moottoria pyöritetään, se tuottaa jännitteen napoihinsa. Jännitteen suuruus on suoraan verrannollinen pyörimisnopeuteen. Tätä jännitettä kutsutaan englanninkielisissä artikkeleissa back-EMF-jännitteeksi. Mikä olisi vastaava suomenkielinen termi, en tiedä, joten käytän tässä artikkelissa back-EMF-termiä.

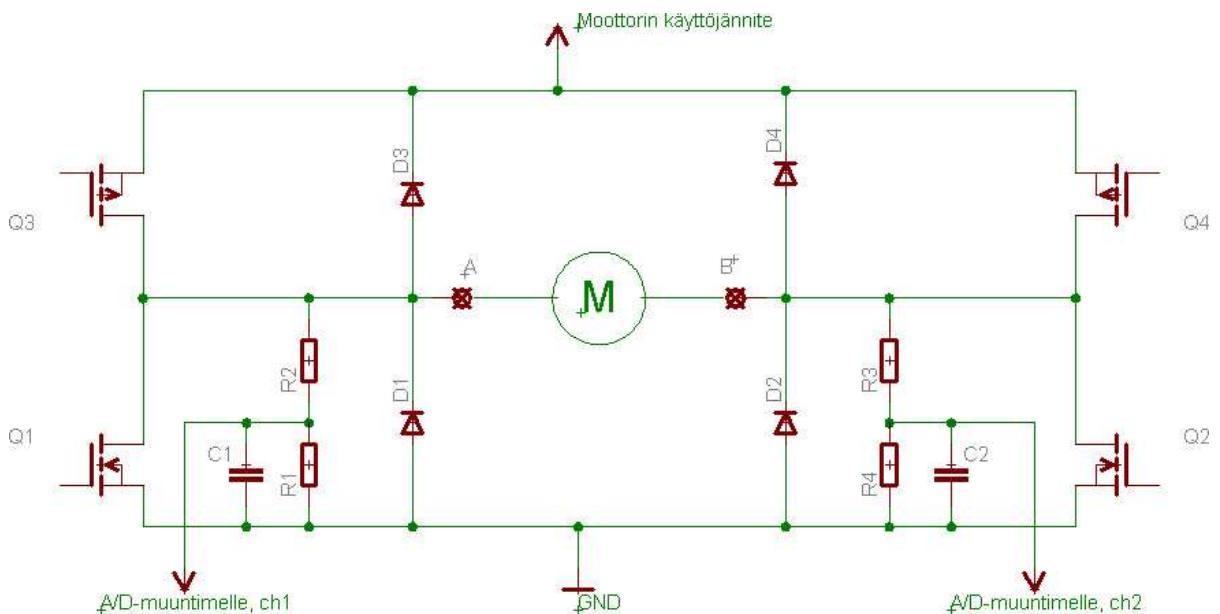
Mittaamalla siis moottorin tuottamaa jännitettä saadaan selville moottorin pyörimisnopeus. Koska robottikäytössä on kuitenkin tarkoitus käyttää moottoria moottorina eikä generaattorina, mittaus tehdään siten, että moottorin jännite katkaistaan määrävälein pieneksi hetkeksi (luokkaa 1 ms) jona aikana moottorin back-EMF-jännite mitataan. Moottori siis toimii tuon lyhyen ajan generaattorina ja tuottaa pyörimisnopeuteensa verrannollista jännitettä. Moottorin, vaihteiston ym. hitaudet aiheuttavat sen, että lyhyen jännitekatkon aikana moottori ei käytännössä ehdi hidastua, joten mitattu jännite vastaa moottorin todellista pyörimisnopeutta.

## Mittauskytkentä

Yleensä moottorin pyörimisnopeuden ohjaamiseen käytetään pulssinleveys-moduloitua (PWM) ohjausta. Tässä tapauksessa mittauskatkon aikana katkaistaan siis PWM-signaalin tulo moottorille. Edellytyksenä on, että PWM:n jaksonaika on huomattavasti pienempi kuin katkon kesto.

Kuvassa 1 on esitetty normaali H-siltaan kytketty moottori ja back-EMF-mittauksen edellyttämät lisäykset siihen. Varsinaisen H-sillan muodostavat fetit (tai transistorit) Q1...Q4. Diodit D1...D4 ovat sillan flyback-diodit. Komponentit R1...R4 ja C1, C2 tarvitaan back-EMF-mittausta varten.

Moottorin kummastakin päästä on kytketty vastusjako maahan, joka skaalaa jännitteen A/D-muuntimelle sopivaksi, koska moottorin käyttöjännite on yleensä isompi kuin A/D-muuntimen ottojännite. Vastukset ovat niin suuria, että ne ovat merkityksettömiä H-sillan toiminnan kannalta silloin, kun moottorille ajetaan tehoa fettien kautta. Kondensaattorit C1 ja C2 yhdessä vastusten kanssa suodattavat häiriöitä, koska moottorilta saatava jännite on aina varsin häiriöllistä.



Kuva 1. H-silta varustettuna back-EMF-mittauksen tarvitsemilla lisäyksillä

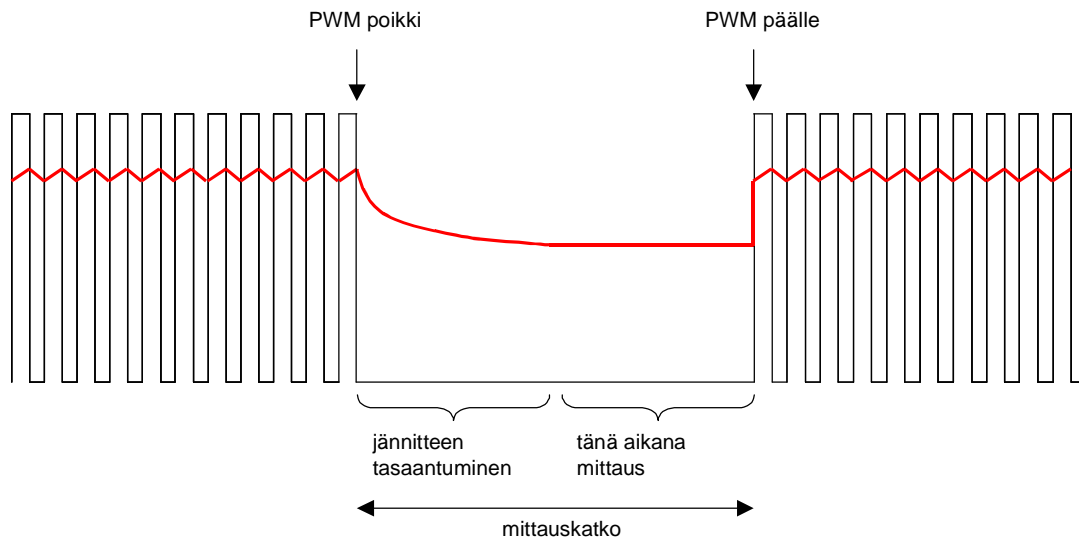
## Mittauksen toiminta

Mittauskatkon ajaksi moottori pitää asettaa kellumaan, eli kaikki sillan fetit Q1...Q4 ohjataan ei-johtavaan tilaan. Back-EMF-jännite luetaan jommasta kummasta päästä moottoria, riippuen siitä kumpaan suuntaan se pyörii. Toisesta päästä tulee aina 0-jännitettä, koska D1 tai D2 on tällöin myötäsuuntainen.

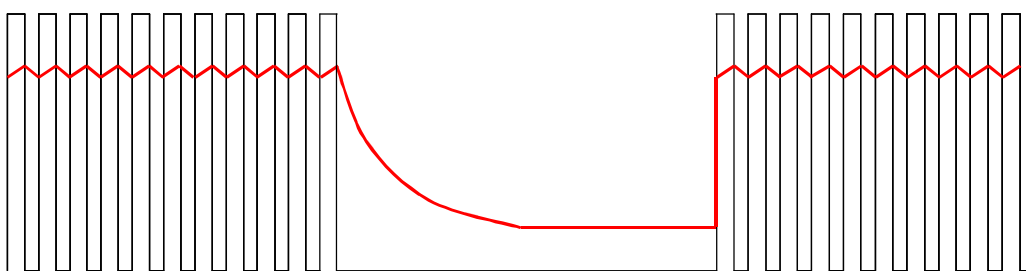
Mittauksen toiminnan voi ajatella vaikkapa näin: Kuvitellaan, että moottori pyörii mittauskatkon aikana niin päin, että moottorin tuottaman jännitteen plusnapa on kohtiossa B ja miinusnapa on kohtiossa A. Tällöin D2 on estosuunnassa, samoin D3 (koska back-EMF-jännite on aina pienempi kuin käyttöjännite) joten moottorin generoima jännite aiheuttaa virran R3:n ja R4:n läpi maahan, ja sieltä myötäsuuntaisen D1:n läpi kohtioon A. Samalla R4:n yli muodostuu jännite, joka voidaan mitata A/D-muuntimen kanavasta 2. Muuntimen kanavassa 1 näkyy likimain 0-jännite. Moottorin pyöriessä toiseen suuntaan tilanne on symmetrinen, ja jännite mitataan A/D-muuntimen kanavasta 1.

Kuvassa 2 näkyy jännitteen periaatteelliset aaltomuodot. Musta kanttiaalto on PWM-jännite. Punainen viiva kuvaa A/D-muuntimen otossa näkyvää jännitettä. PWM-katkon alkaessa jännitettä ei voi heti mitata, koska RC-suodatukselta ja moottorin induktanssista johtuvien hitauksien takia jännitteeltä kestää hetken tasaantua. Siksi mittaus voidaan tehdä vasta katkon loppupuolella.

Kuvan 2 tapauksessa moottori pyöri nopeasti, joten back-EMF-jännitekin on korkea. Kuvassa 3 näkyy hitaasti pyörivä moottori, jolloin jännite on pienempi.



*Kuva 2. Nopeasti pyörivän moottorin aaltomuodot*



*Kuva 3. Hitaasti pyörivän moottorin aaltomuodot*

Vastusjaon ja suodatuskondensaattorin muodostama aikavakio on kriittinen: suodatuksen kannalta aikavakio olisi hyvä olla mahdollisimman pitkä, mutta tällöin jännitteen tasaantuminen kestää kauemman, mikä lisää mittauskatkon pituutta. Mittauskatko taas olisi hyvä olla mahdollisimman lyhyt, jotta se ei verota liikaa moottorin saamaa keskimääräistä tehoa. Käytännössä tähän joutuu hakemaan sopivan kompromissin.

## Käytännön kokeiluja

Jotta edellä kuvattua teoriaa pääsisi kokeilemaan käytännössä, rakensin kuvassa 4 näkyvän testiympäristön. Moottorina on MFA 950D-sarjan moottori 1:148 vaihteistolla. H-silta on toteutettu perinteisellä L298-piirillä, ja A/D-muuntimena on ADC0838. Kokonaisuutta ohjaa NXP:n kontrolleri P89C51RB2BA, joka generoi myös PWM:ää. Moottorin todellisen pyörimisnopeuden tarkkailemiseksi värkkäsin vanhasta hiirestä, parista rattaasta ja taajuuslaskimesta yksinkertaisen pulssilaskentaan perustuvan pyörimisnopeusmittarin.

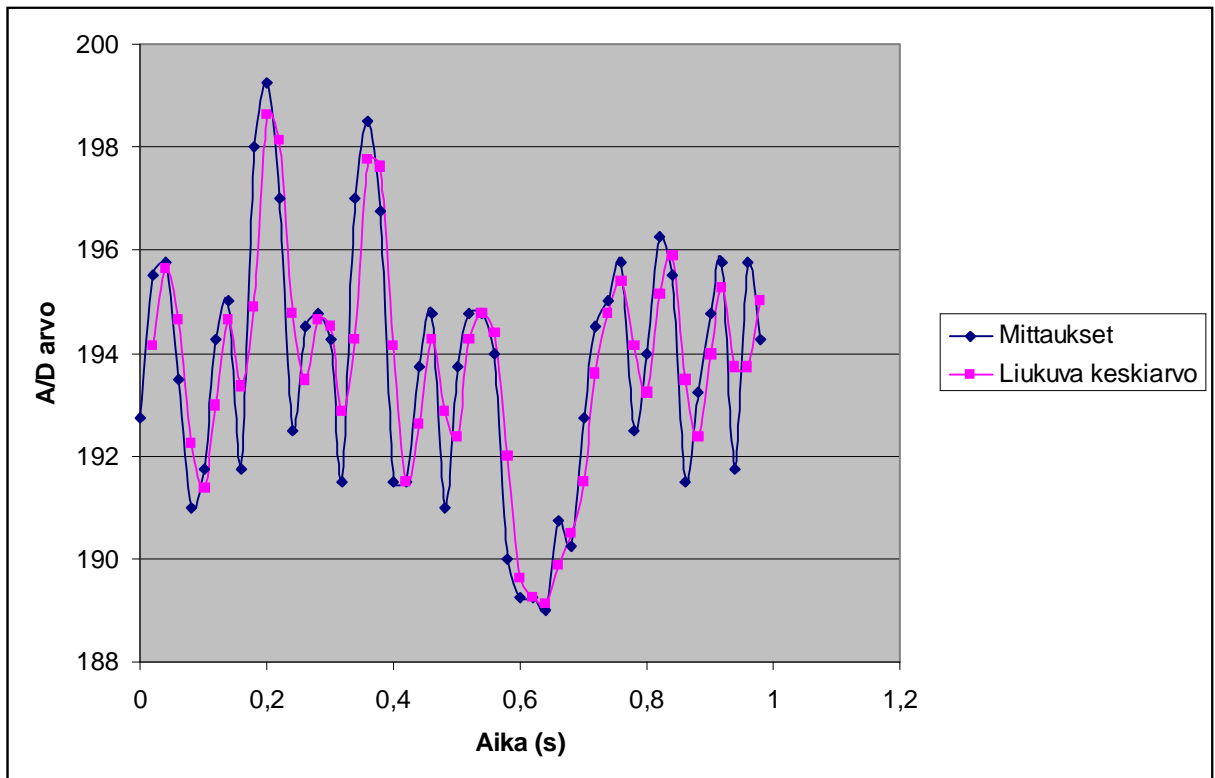


*Kuva 4. Testiympäristö*

Moottorin käyttöjännite on 12 V ja PWM-taajuus n. 23 kHz. Tätä katkotaan 50 kertaa sekunnissa (20 ms välein), katkon pituuden ollessa n.1 ms. Jännitejako-  
vastukset ovat  $R_2=R_3=27\text{ k}\Omega$  ja  $R_1=R_4=22\text{ k}\Omega$ , kondensaattorit  $C_1=C_2=10\text{ nF}$ . Näillä arvoilla jännite tasaantuu n. 500  $\mu\text{s}$  aikana, jonka jälkeen mittaus voidaan tehdä. Mittaus tehdään ottamalla moottorin EMF-jännitteestä 4 näytettä 100  $\mu\text{s}$  välein. Tällöin katkon kokonaispituus on suunnilleen tuo 1 ms. Mittauskatkot vievät siis n. 5% moottorin saamasta tehosta.

Kuvassa 5 on erään mittauksen tulos sekunnin ajalta pyörimisnopeudella 60 rpm. Kukin sinisen käyrän piste edustaa yhden mittauskatkon aikana mitattujen 4 näytteen keskiarvoa, yksikkönä 8-bittisen A/D-muuntimen lähtöarvo.

Keskiarvoistuksesta huolimatta signaali on varsin häiriöllistä. Punainen käyrä on kahden peräkkäisen katkon mittaustulosten liukuva keskiarvo, joka tasaa jonkin verran nopeita vaihteluja. Keskiarvolaskentaa tehokkaammat menetelmät (esim. Kalman-suodatin) olisivat tässä hyödyllisiä, mutta edellyttäisi toisenlaista kontrolleria.



Kuva 5. Mittaustuloksia nopeudella 60 rpm

Kokeilin kahden katkon liukuvaa keskiarvoa myös moottorin PID-pohjaisen nopeussäädön mittauksena, ja tulos vaikuttaa ihan lupaavalta. PID-säätimen virityksellä on tietysti suuri merkitys säädön toimivuudelle, kuten aina, mutta kaikesta päättäen back-EMF-menetelmä on käyttökelpoinen tähän tarkoitukseen. Käytännön kokemukset jatkossa kertonevat asiasta enemmän.

Back-EMF-menetelmä ei korvaa kaikissa tilanteissa pulssianturia, esim. silloin, jos pulssianturilla on tarkoitus mitata myös robotin kulkemaa matkaa. Mutta täysin anturittomana menetelmänä se puolustaa paikkaansa harrastekäytössä.

## Lähteitä

<http://www.acroname.com/robotics/info/articles/back-emf/back-emf.html>

<http://frontrangerobotics.org/PIDbackEMF/DavesBEMFmotorArticle.htm>

[http://www.mfacomodrills.com/gearboxes/950d\\_series.html](http://www.mfacomodrills.com/gearboxes/950d_series.html)