



Timo Matalalampi

# KUNTOILULAITTEEN OHJAUSELEKTRONIIKAN SUUNNITTELU

# KUNTOILULAITTEEN OHJAUSELEKTRONIIKAN SUUNNITTELU

Timo Matalalampi  
Opinnäytetyö  
7.4.2011  
Hyvinvointiteknologian koulutusohjelma  
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

# OULUN SEUDUN AMMATTIKORKEAKOULU

## TIIVISTELMÄ

Koulutusohjelma	Opinnäytetyö	Sivuja	+	Liitteitä
Hyvinvointiteknologia	Insinöörityö	51	+	0
Suuntautumisvaihtoehto	Aika			
Sairaalateknologia	2011			
Työn tilaaja	Työn tekijä			
Spinech Oy	Timo Matalalampi			
Työn nimi				
Kuntoilulaitteen ohjauselektronikan suunnittelu				
Avainsanat				
PWM, mikrokontrolleri, tasasähkömoottori, PID-säätö				

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli toteuttaa kuntoilulaitteelle ohjauselektronikka, joka huolehtii käyttäjän ennalta asettaman vastuksen ylläpidosta. Keskeisin ongelma opinnäytetyön kannalta oli, millä tavalla vastus sekä vastuksen säätö toteutetaan käytännössä.

Työssä sovellettiin aiempien vuosien kursseilta saatuja pohjatietoja, kuten tasasähköteoriaa, vaihtosähköteoriaa, anturitekniikkaa, C-kieltä mikrokontrollerin ohjelmoinnissa, fysiikan perusteita ja elektronikkaa. Säätöteorian ja sähkömoottorien toiminnan kannalta jouduttiin tekemään ehkä suurin selvitystyö, koska näitä ei ollut aiemmin käsitelty millään kursseilla. Lisäksi kaikki piirilevyt ja tarvittava mekaniikka suunniteltiin itse.

Lopputuloksena saatiin toimiva säätölaitteisto, joka ohjaa sähkömoottorin avulla tuotettua keinotekoista vastusta. Sovelluseriaate mahdollistaa elektronisen vastussäädön käyttämisen myös muissa erityyppisissä kuntoilulaitteissa sekä erilaisten vastusprofiilien ohjelmoimisen, jolloin vastus voi muuttua esimerkiksi liikeradan funktiona halutulla tavalla.

# SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ.....	3
SISÄLTÖ.....	4
1 JOHDANTO.....	5
2 TEORIA.....	7
2.1 Magnetismi ja sähkömagnetismi.....	7
2.2 Virrallinen johdin magneettikentässä.....	8
2.3 Hiiliharjallinen tasasähkömoottori.....	10
2.4 Tasasähkömoottorin mekaaninen malli.....	12
2.5 Tasasähkömoottorin sähköinen malli.....	14
2.6 Vastus ja kela tasavirtapiirissä.....	15
2.7 Pulssinleveysmodulaatio.....	17
2.8 Tasasähkömoottorin ohjausmenetelmät.....	18
2.9 H-silta.....	20
2.10 Sääto teoria.....	21
2.10.1 Takaisinkytketty suljettu säätöjärjestelmä.....	21
2.10.2 P-säätö.....	22
2.10.3 Integroiva säätö.....	23
2.10.4 Tietokonesäätö.....	25
2.10.5 Esimerkki digitaalisesta PI-säätimestä.....	28
3 TOTEUTUS.....	30
3.1 Mekaaninen rakenne ja toimintaperiaate.....	30
3.2 Testauskytkentä.....	33
3.3 Lopullinen kytkentä.....	38
4 TULOKSET.....	44
5 POHDINTAA.....	47
LÄHTEET.....	50

# 1 JOHDANTO

Tässä työssä kehitettiin prototyyppi uudentyyppisestä sähkötoimisesta kuntoilulaitteesta. Kuntoilulaitteen idea liittyi työn toimeksiantajan, Spinech Oy:n tekemään aiempaan selvitystyöhön. Yhdyshenkilönä toimi Mauno Kurunlahti.

Toimeksiantajalla oli erityinen idea uudentyyppisestä sähkötoimisesta kuntoilulaitteesta. Työssä rakennettiin prototyyppi idean pohjalta ja tutkittiin erilaisia toteutusvaihtoehtoja sekä testattiin lopulliseksi toteutukseksi valitun ratkaisun toimivuus. Oleellisin osa työtä oli ohjauselektronikan suunnittelu.

Erilaisia kotona tai kuntosaleilla käytettäviä kuntoilulaitteita on markkinoilla hyvin monenlaisia. Perinteinen käsipaino on näistä yksinkertaisin. Painon etuina on mm. yksinkertaisuus ja toimintavarmuus. Ongelmana taas on liikuteltavuus eri paikkoihin sekä vastuksen säädön puuttuminen liikeradan funktiona. Ehkä seuraavaksi yksinkertaisin on jousivastus, jossa vastus muodostuu jousen aiheuttamasta voimasta. Jousella toimivan laitteen etuina on muun muassa sen keveys ja yksinkertaisuus, ongelmana taas harjoitusvastuksen keveys liikeradan alkupäässä verrattuna liikeradan loppuun sekä jousen väsyminen ajan myötä. Toimeksiantajan ideaan kuului näihin kuntoiluvälineisiin liittyvien ongelmien ratkaiseminen soveltamalla erityistä sähkötoimista ratkaisua kuntoilulaitteen toteutuksessa.

Työn tarkoituksena oli kehittää toimeksiantajan idean pohjalta sähkötoiminen kuntoilulaite, joka simuloi mahdollisimman luonnollisesti tavallisilla irtopainoilla tehtäviä kuntoiluliikkeitä. Idean ydin oli kehittää automaattinen vastussäädön ohjaussysteemi, jossa käyttäjä voi valita haluamansa harjoitusvastuksen ja säätösysteemi pyrkii pitämään vastuksen ennalta asetettuna siten, että harjoittelu vastaa tavallisilla käsipainoilla tehtäviä suorituksia.

Työn alkuvaiheessa ilmeni, että sähkömoottoria itsessään voidaan käyttää sopivan vastuksen muodostamiseen. Tähän selvitystyöhön sisältyi tasasäh-

kömoottorien teoriaa sekä käytännön kokeiluja. Tämän jälkeen työn painopiste siirtyi sähkömoottoria ohjaavaan toteutukseen. Tässä vaiheessa selvitettiin ensin säätöteoriaa sekä sen jälkeen ratkaistiin säädön toteuttaminen käytännössä. Koska työssä kehitetyn prototyypin toimivuuden kannalta sekä sähkömoottorien toiminnan erityispiirteet että säätöteoriaan liittyvien seikkojen ymmärtäminen oli erityisen tärkeää, nämä ilmiöt on kuvattu työn teoriaosassa seikkaperäisesti.

Työn lopputuloksena syntyi toimiva prototyyppi kuntoilulaitteesta. Prototyypin toimivuus testattiin mittauksin sekä käytännön kokeiluin hyvin tuloksin. Työn ytimeksi muodostui kuntoilulaitteen ohjauselektronikka. Sähkömoottoreihin liittyvät magneettiset ilmiöt osoittautuivat oleellisiksi seikoiksi ohjauselektronikkaa suunniteltaessa.

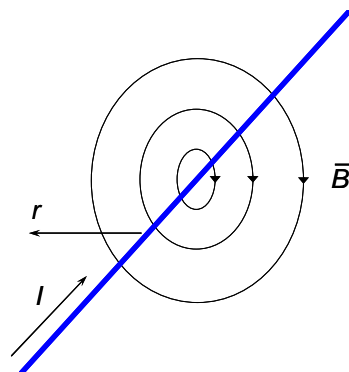
## 2 TEORIA

### 2.1 Magnetismi ja sähkömagnetismi

Magneetit vetävät rautakappaleita puoleensa. Magneetin voidaan ajatella koostuvan kahdesta erinimisestä navasta, joita kutsutaan ilmansuuntien mukaan N-navaksi ja S-navaksi (North ja South). Kahden magneetin erinimiset navat vetävät toisiaan puoleensa ja samannimiset hylkivät toisiaan. (Peltonen – Perkkiö – Vierinen 2000, 23.)

Nykyinen tieto aineen perusrakenteesta on johtanut käsitykseen, että magneettisten ilmiöiden aiheuttajana ovat liikkuvat sähkövaraukset. Elektronien kiertoliike atomin ympärillä tai etenevä liike sähkövirtana johtimessa saa aikaan ympärilleen magneettikentän, jossa liikkuvaan sähkövaraukseen vaikuttaa voima. (Inkinen – Manninen – Tuohi 2006, 119.)

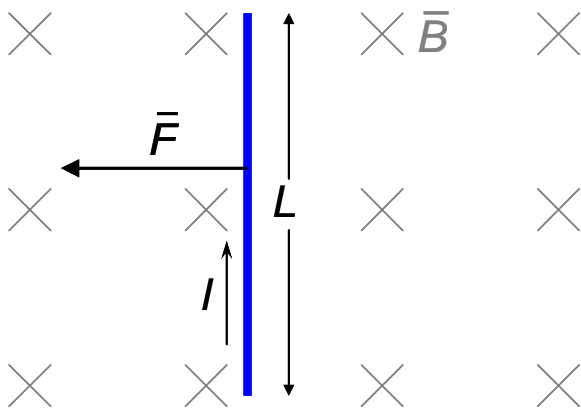
Virrallinen johdin muodostaa ympärilleen magneettikentän (kuva 1). Magneettivuon tiheys  $B$  on suoraan verrannollinen johtimen läpi kulkevaan virtaan  $I$  ja kääntäen verrannollinen etäisyyteen  $r$  johtimesta. Lisäksi magneettivuon tiheys riippuu johdinta ympäröivästä väliaineesta. (Peltonen ym. 2000, 23.)



KUVA 1. Virrallisen johtimen magneettikenttä (mukaillen Peltonen ym. 2000, 23)

## 2.2 Virrallinen johdin magneettikentässä

Kun virrallinen johdin asetetaan kohtisuorasti ulkoiseen magneettikenttään, kohdistuu siihen kuvan 2 mukainen voimavaikutus. Koska yksittäiseen varaukseen vaikuttaa magneettikentässä voima, vaikuttaa myös virtajohtimeen magneettikentässä voima, sillä virta on varauksellisten hiukkasten liikettä. (Peltonen ym. 2000, 18–19.)



KUVA 2. Virrallinen johdin magneettikentässä (mukaillen Peltonen ym. 2000, 18)

Johtimeen vaikuttavan voiman itseisarvo saadaan kaavasta 1 (Peltonen ym. 2000, 19).

$$F = I \cdot B \cdot L \cdot \sin \alpha$$

KAAVA 1

$I$  = johtimessa kulkeva virta

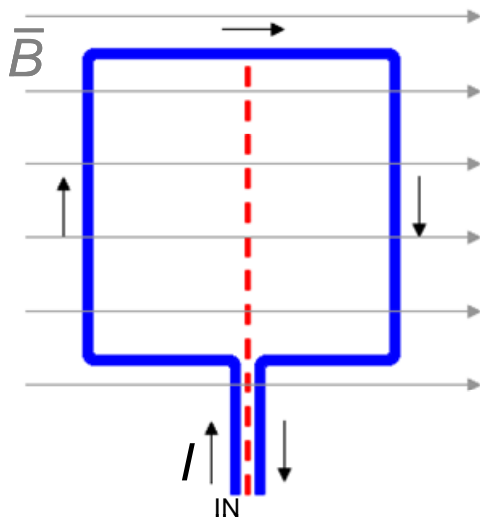
$L$  = johtimen pituus

$B$  = magneettivuon tiheys

$\alpha$  = virran ja magneettikentän välinen kulma

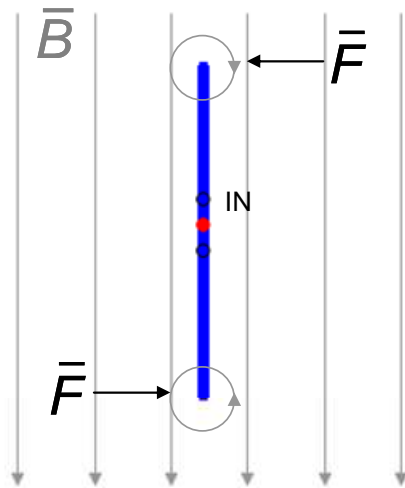
Koska suoraan virtajohtimeen vaikuttaa magneettikentässä voima, vaikuttaa voima myös magneettikentässä olevaan virtasilmukkaan (kuva 3). Kun virtasilmukka on akseloitu sopivasti, aiheutuu silmukkaan vääntömomentti  $M$  akselin suhteen. (Peltonen ym. 2000, 20.)





KUVA 3. Virtasilmukka magneettikentässä. Punainen katkoviiva kuvaa akselointia. (Mukaillen Peltonen ym. 2000, 20.)

Kuvassa 4 virtasilmukka on esitetty akselinsuuntaisesti. Silmukkaan kohdistuva voima aiheuttaa silmukkaan momentin (Peltonen ym. 2000, 20).

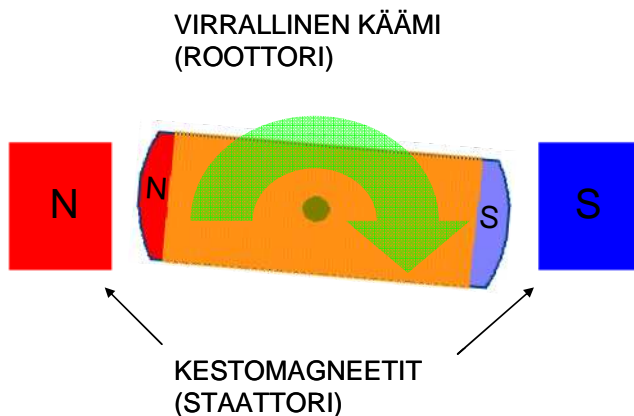


KUVA 4. Virtasilmukka magneettikentässä alhaalta päin katsottuna. Silmukkaan kohdistuva voima aiheuttaa momentin, joka pyrkii kääntämään silmukkaa vastapäivään. (Mukaillen Peltonen ym. 2000, 20.)

## 2.3 Hiiliharjallinen tasasähkömoottori

Tasasähkömoottorit voidaan jakaa kahteen ryhmään: hiiliharjallisiin ja -harjattomiin (Sähkökäytöt 2007, 3). Tässä työssä käsitellään hiiliharjallista tasasähkömoottoria, ellei erikseen toisin mainita.

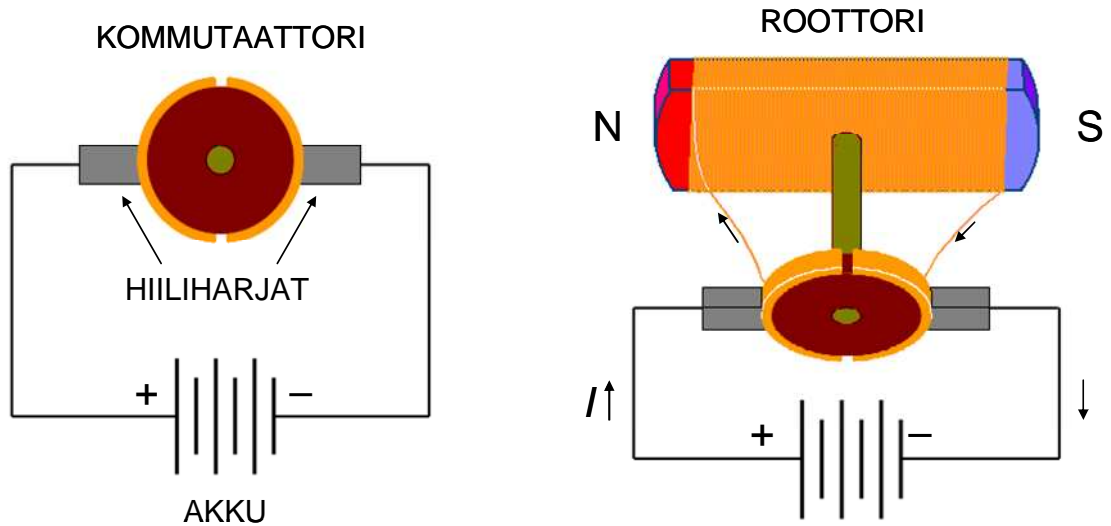
Magneeteista tiedetään, että samanmerkkiset navat hylkivät toisiaan ja erimerkkiset vetävät toisiaan puoleensa. Jos tällainen magneetti, olkoon se sitten sähkö- tai kestopagneetti, asetetaan sopivasti ulkoiseen kenttään, pyrkii magneetti kääntymään siten, että eri merkkiset navat ovat vastakkain (kuva 5). (Sähkökäytöt 2007, 2.)



*KUVA 5. Kuvan roottori pyrkii kääntymään myötäpäivään, koska samanmerkkiset navat hylkivät toisiaan ja erimerkkiset vetävät puoleensa (mukailen Sähkökäytöt 2007, 2)*

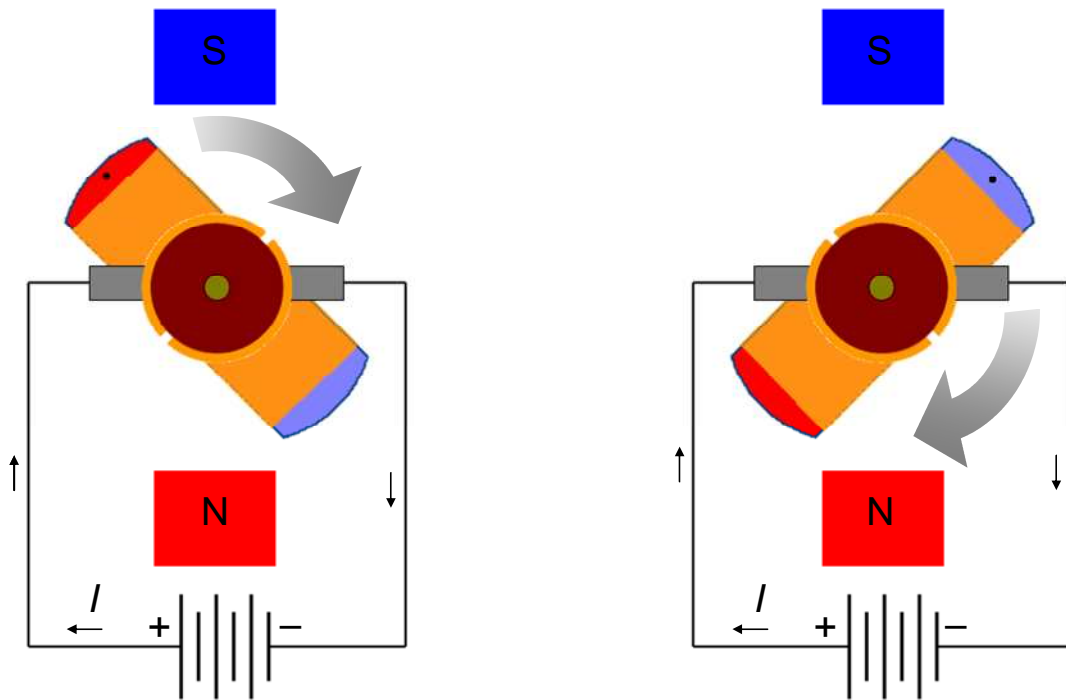
Jotta roottori pyörisi jatkuvasti, täytyy se varustaa kommutaattorilla. Kommutaattorin periaate on esitetty kuvassa 6. Yksinkertaistettuna kommutaattori on halkaistu rengas, joka on sijoitettu samalle akselille roottorin kanssa. Roottorikäämityksen toinen pää on kytketty renkaan toiseen puolikkaaseen ja toinen pää vastaavasti toiseen puolikkaaseen. Jousikuormitteiset hiiliharjat nojaavat kommutaattoriin. Kommutaattori kääntää hiiliharjojen kautta roottorille tulevan virran suunnan aina, kun magneettisesti vastakkaismerkkiset navat tulevat

kohdakkain. Tästä on seurauksena roottorin jatkuva pyörimisliike. (Sähkökäytöt 2007, 3.)



KUVA 6. Kommutaattori ja siihen nojaavat hiiliharjat (mukailen Sähkökäytöt 2007, 3)

Kuvasarjassa 7 havainnollistetaan, kuinka virran suunta roottorissa kääntyy aina siten, että jatkuva pyöriminen on mahdollista. Vasemmanpuoleisessa kuvassa roottori pyrkii kääntymään pystyasentoon staattorin napojen kohdalle, koska erimerkkiset navat vetävät toisiaan puoleensa. Roottorilla on kuitenkin tietty hitausmomentti, joten se pyrkii kääntymään ohi staattorin napojen. Tällöin kommutaattori on kääntänyt roottorin läpi kulkevan virran suunnan vastakkaiseksi (oikeanpuoleinen kuva 7), jolloin roottorin ja staattorin napojen välillä vaikuttaakin poistovoima. Tästä seuraa roottorin jatkuva pyöriminen. (Peltonen ym. 2000, 22.)



KUVA 7. Vasemmanpuoleisessa kuvassa roottori on tulossa napojen väliin. Oikeanpuoleisessa kuvassa roottori on jo ohittanut navat ja kommutaattori kääntänyt roottorin virran suunnan vastakkaiseksi. (Mukaillen Peltonen ym. 2000, 22.)

## 2.4 Tasasähkömoottorin mekaaninen malli

Tasasähkömoottorin antama vääntömomentti  $T$  on kaavan 2 mukaisesti suoraan verrannollinen roottorivirtaan  $I$  (Sähkökäytöt 2007, 6).

$$T = K_T I$$

KAAVA 2

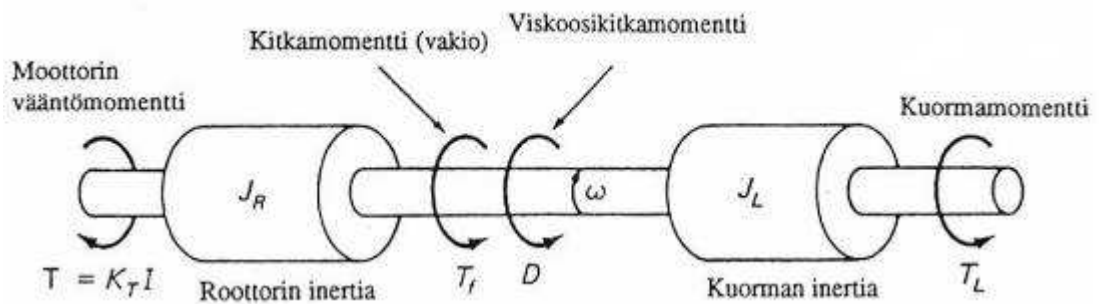
$K_T$  = moottorikohtainen vakio

Moottorin nimellismomentti ja maksimimomentti ilmoitetaan valmistajan katalogeissa. Kuormitettaessa moottoria nimellismomentilla ympäristön nimellislämpötilassa, lämpenee moottori jatkuvassa käytössä maksimilämpötilaansa, jolloin moottorin lämpeneminen rajoittaa jatkuvan käytön suorituskyvyn. Maksimimomenttia voidaan käyttää lyhytaikaisesti esimerkiksi kiihdytyksissä.

Jos roottorivirta nostetaan liian suureksi kiihdytyksessä tai jarrutuksessa, on vaarana kestmagneettien demagnetoituminen eli heikkeneminen josta seuraa moottorin momenttivakion pieneneminen. (Sähkökäytöt 2007, 7.)

Yleensä moottoreiden kestmagneetit kestävät demagnetoitumatta n. seitsemän–kahdeksankertaisen nimellisvirran. Moottorin, joka on mitoitettu 9 A:n nimellisvirralle, voidaan olettaa kestävän demagnetoitumatta n. 63 A:n hetkellinen virtapulssi. (DC motors, speed controls, servo systems 1980, 2-53.)

Sähkömoottorin mekaaninen malli esitetään yleensä kuvan 8 mukaisesti. Moottorista saatava vääntömomentti kuluu varsinaisen kuorman lisäksi kitkoihin, vaimennukseen ja hitausmassojen kiihdytyksiin. (Airila 1999, 5-11.)



KUVA 8. Sähkömoottorin mekaaninen malli (Airila 1999, 5-11)

Moottorin vääntömomentti lasketaan kaavalla 3 (Airila 1999, 5-11–5-12).

$$T = K_T I = (J_R + J_L) \frac{d\omega}{dt} + D\omega + T_f + T_L \quad \text{KAAVA 3}$$

$J_R$  = roottorin hitausmomentti

$J_L$  = kuorman hitausmomentti

$\omega$  = roottorin kulmanopeus

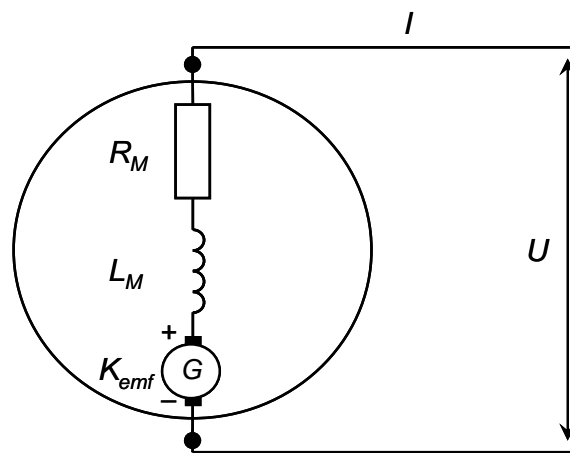
$D$  = vaimennus

$T_f$  = moottorin kitkamomentti

$T_L$  = kuormamomentti

## 2.5 Tasasähkömoottorin sähköinen malli

Sähkömoottorin sähköinen malli voidaan pelkistää sarjaan kytketyn vastuksen, kelan ja generaattorin yhdistelmäksi (kuva 9). Vastus edustaa kommutaattorin, hiiliharjojen ja roottorikäämityksen resistanssia, kela roottorikäämityksen induktanssia ja generaattori moottorin kehittämää vastasähkömoottorista voimaa. (Airila 1999, 5-13.)



KUVA 9. Sähkömoottorin yksinkertaistettu sähköinen malli (mukaillen Airila 1999, 5-13)

Moottorin roottorijännite saadaan kaavasta 4 (Airila 1999, 5-13).

$$U = L_r \cdot \frac{dI}{dt} + R_r \cdot I + K_{emf} \cdot \omega$$

KAAVA 4

$L_r$  = roottorikäämityksen induktanssi

$I$  = roottorin virta

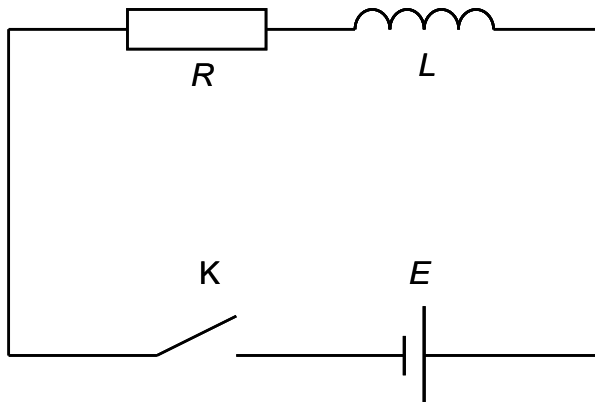
$R_r$  = käämityksen, kommutaattorin ja hiiliharjojen resistanssi

$K_{emf}$  = jännitevakio

$\omega$  = roottorin kulmanopeus

## 2.6 Vastus ja kela tasavirtapiirissä

Kun kuvassa 10 esitetty kytkin K suljetaan, piirissä alkaa kulkea virta. Kela  $L$  vastustaa virran muutosta. Mitä suurempi on kelan induktanssi, sitä voimakkaampi on piirin virran muutosta vastustava ominaisuus. Vastus  $R$  määrää virran maksimiarvon. Lisäksi vastuksen resistanssi vaikuttaa suoraan verrannollisesti siihen, kuinka nopeasti maksimivirta saavutetaan. (Peltonen ym. 2000, 48.)



KUVA 10. Kela ja vastus tasavirtapiirissä (mukaillen Peltonen ym. 2000, 48.)

Piirin aikavakio saadaan kaavasta 5 (Peltonen ym. 2000, 48).

$$\tau = \frac{L}{R}$$

KAAVA 5

$\tau$  = aikavakio, jonka aikana piirin virta on saavuttanut 63 % arvostaan

$L$  = kelan induktanssi

$R$  = piirin resistanssi

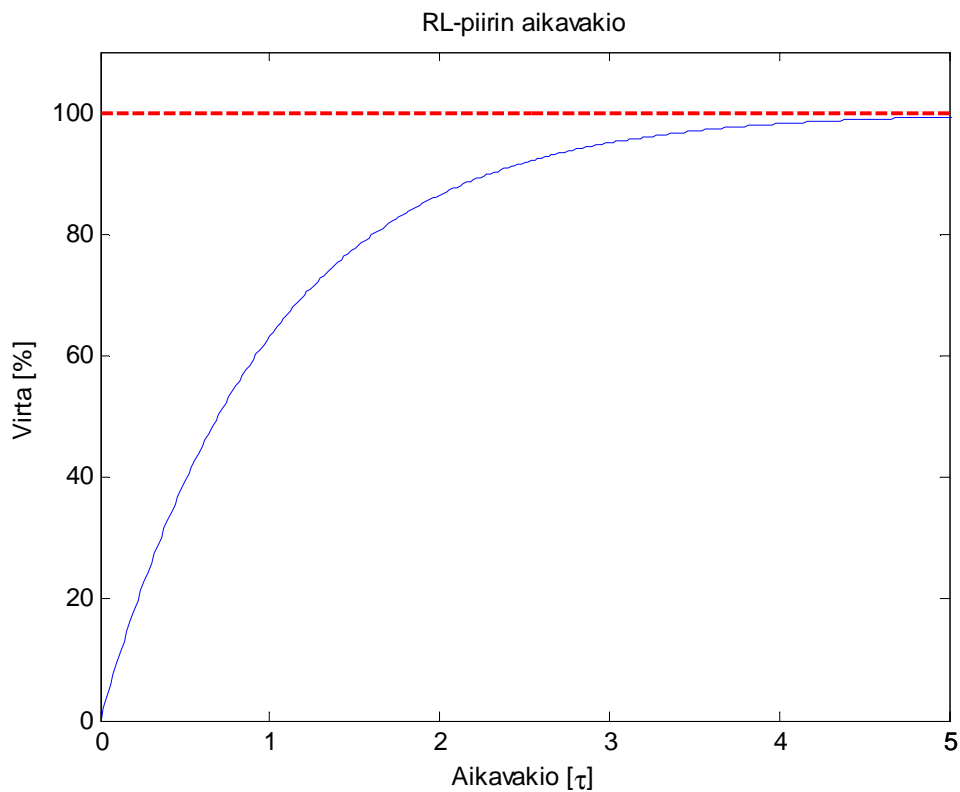
Piirin virta ajan funktiona noudattaa kaavaa 6 (Peltonen ym. 2000, 48).

$$i(t) = \frac{E}{R} (1 - e^{-t/\tau})$$

KAAVA 6

missä  $\tau = L/R$  on piirin aikavakio. Yhtälön mukaan virta lähestyy arvoa  $E/R$ . Virta saavuttaa n. 63 % maksimistaan  $1 \tau$ :n kuluessa ja maksimiarvo  $E/R$  on saavutettu käytännössä  $5 \tau$ :n kuluttua.

Kuvasta 11 nähdään, kuinka virta alkaa kasvamaan hetkellä  $t = 0$ , kun kytkin K suljetaan. Havainnollisuuden vuoksi aika-akseli on jaettu aikavakion  $\tau$  mittaisiin jaksoihin. Kuvasta nähdään, että virta on saavuttanut käytännössä maksimiarvonsa n.  $5 \tau$ :n kuluttua. (Peltonen ym. 2000, 48.)

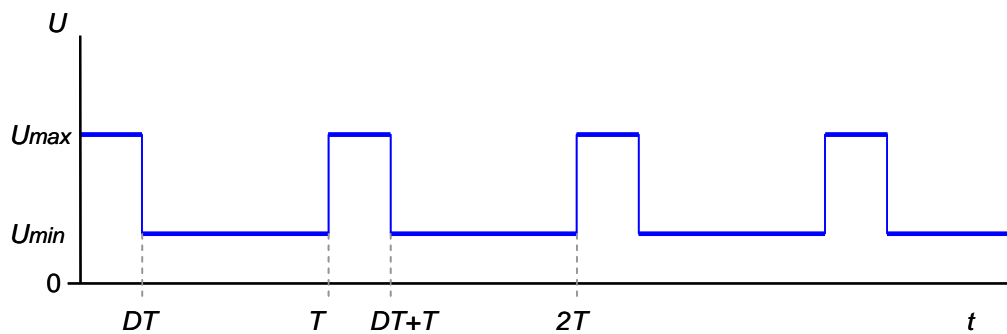


KUVA 11. LR-piirin virta kytkimen sulkemisen jälkeen (mukaillen Peltonen ym. 2000, 48)



## 2.7 Pulssinleveysmodulaatio

Pulssinleveysmodulaatiossa (PWM = Pulse-Width Modulation) elektronisella kytkimellä ohjataan signaalin päälläoloaikaa, jolloin signaalin keskiarvo muuttuu. Yleensä jaksonaika  $T$  on vakio, ja pulssisuhdetta  $D$  säädetään. Kuva 12 esittää pulssinleveysmodulaation periaatetta. (PWM. 2009.)



KUVA 12. Pulssinleveysmodulaatio (PWM. 2009)

Pulssinleveysmodulaatiossa keskimääräinen jännite lasketaan kaavalla 7 (PWM. 2009).

$$U_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad \text{KAAVA 7}$$

$$\text{jossa } f(t) = \begin{cases} U_{max} & 0 \leq t < DT \\ U_{min} & DT \leq t < T \end{cases}$$

Siten kuvassa 13 esitettyjen vakioiden perusteella keskimääräinen jännite voidaan laskea kaavalla 8 seuraavasti:

$$U_{avg} = \frac{1}{T} \left( \int_0^{DT} U_{max} dt + \int_{DT}^T U_{min} dt \right), \quad \text{KAAVA 8}$$

joka voidaan sieventää seuraavasti:

$$= \frac{DTU_{\max} + T(1-D)U_{\min}}{T}$$

$$= DU_{\max} + (1-D)U_{\min} .$$

Siten, jos  $U_{\min}$  on nolla, yksinkertaistuu kaava muotoon

$$U_{\text{avg}} = D U_{\max} ,$$

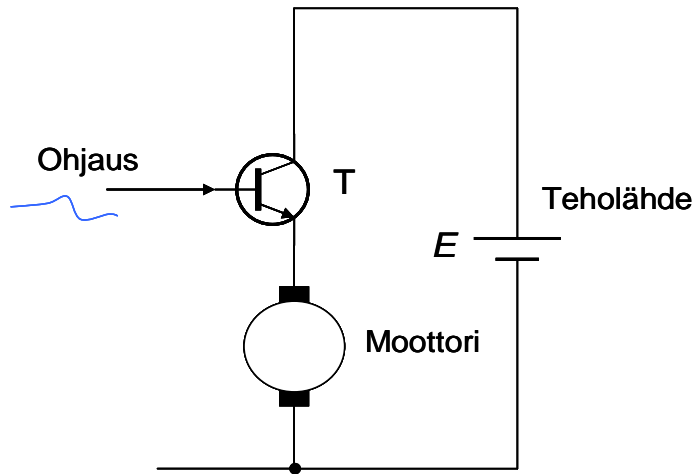
KAAVA 9

joten keskimääräinen arvo  $U_{\text{avg}}$  saadaan kertomalla  $U_{\max}$  pulssisuhteella  $D$ . (PWM. 2009.)

## 2.8 Tasasähkömoottorin ohjausmenetelmät

Servovahvistimeksi kutsutaan tasajännitelähdettä, joka säätää moottorin roottorivirtaa ja pyörimisnopeutta ohjearvon mukaan. Servovahvistimet voidaan jakaa toimintaperiaatteensa mukaan lineaarisiksi vahvistimiksi ja hakkurivahvistimiksi. Varsinkin suuria moottoreita ohjataan hakkurivahvistimilla niiden paremman hyötysuhteen vuoksi. (Airila 1999, 5-16.)

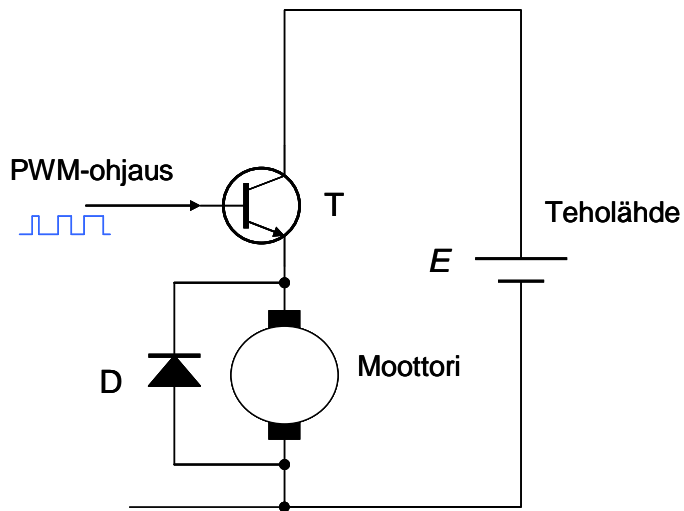
Linearisessa servovahvistimessa käytetään ohjaukseen bipolaaritransistorin lineaarista aluetta. Ohjausjännite syötetään transistorin kannalle (kuva 13). (Airila 1999, 5-16.)



*KUVA 13. Lineaarisen jänniteohjatun servovahvistimen periaate (Airila 1999, 5-16)*

Lineaarinen vahvistin on rakenteeltaan yksinkertainen ja hiljainen. Haittana on huomattava tehohäviö transistorissa, jolloin hyötysuhde pienenee. Lisäksi transistori vaatii tehokkaan jäähdytyksen. (Airila 1999, 5-16.)

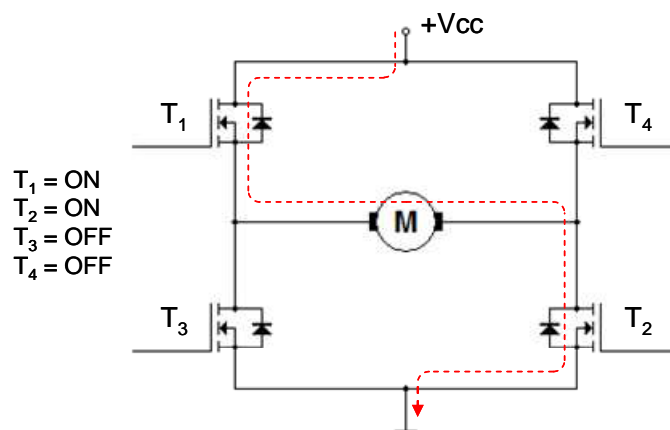
Hakurivahvistin perustuu pulssinleveysmodulaatioon (PWM). Ohjaustransistoria käytetään kytkintyyppisesti eli transistori on joko täysin johtavana tai täysin sulkeutuneena (kuva 14). Transistorin ollessa täysin avautuneena, sen yli vaikuttaa alle yhden Voltin jännite, jolloin tehohäviö jää pieneksi. Transistorin ollessa täysin sulkeutuneena virtaa ei kulje, joten tehoakaan ei häviä. (Airila 1999, 5-17.)



KUVA 14. Jänniteohjatun hakkurivahvistimen periaate (mukaillen Airila 1999, 5-18)

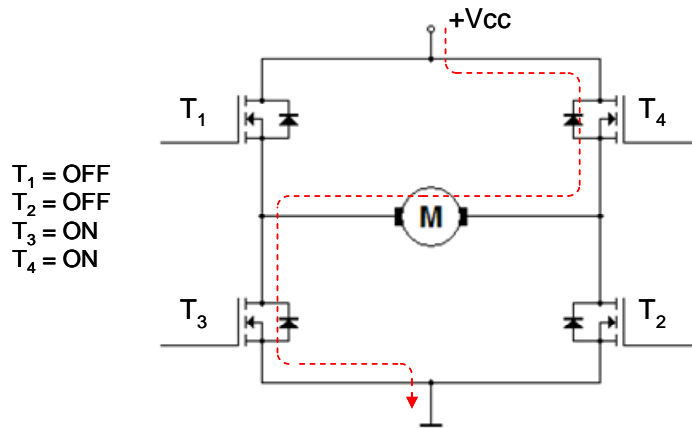
## 2.9 H-silta

Kuvassa 15 on esitetty H-siltakytkennän periaate. Diagonaalitransistorit  $T_1$  ja  $T_2$  ovat johtavina, jolloin moottorin läpi kulkee virta. Ohjaamalla transistoreita sopivasti saadaan moottori pyörimään haluttuun suuntaan. (Maiocchi 2003, 1.)



KUVA 15. H-sillan periaate. Piirin virta on merkitty katkoviivalla transistorien  $T_1$  ja  $T_2$  johtaessa. (Mukaillen Maiocchi 2003, 3.)

Kuvassa 16 diagonaalitransistorit  $T_3$  ja  $T_4$  ovat johtavina, jolloin moottorin virta ja pyörimissuunta on vastakkainen kuvaan 15 verrattuna (Maiocchi 2003, 3).

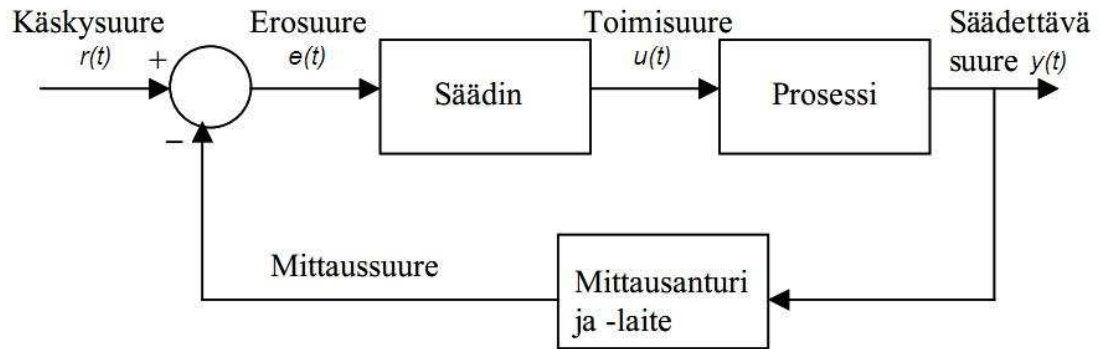


KUVA 16. Virran suunta transistorien  $T_3$  ja  $T_4$  johtaessa (mukaillen Maiocchi 2003, 3)

## 2.10 Säätöteoria

### 2.10.1 Takaisinkytketty suljettu säätöjärjestelmä

Kuvassa 17 nähdään takaisinkytketyn säätöjärjestelmän periaatteellinen rakenne. Takaisinkytketyssä säädössä säädettävän suureen halutaan seuravaan käskysuuretta. Mittausanturi mittaa säädettävää suuretta, esimerkiksi moottorin virtaa, mittalähetin muuttaa mittaussignaalin sopivaan muotoon ja lähettää sen eroelimelle. Eroelin muodostaa käskysuureesta ja mittaussuureesta erosuureen, joka on säätimen tulosuure. Säätimen lähtösuure ohjaa toimilaitteen välityksellä säädettävää prosessia. (Eriksson – Nihtilä – Oksanen 2002, 2.)



KUVA 17. Takaisinkytketyn säädön periaatekuva (mukaillen Eriksson ym. 2002, 2)

Takaisinkytketty säätö toimii siten, että jos säädettävä suure pienenee esimerkiksi häiriön vuoksi, myös mittaussuure pienenee, jolloin erosuure kasvaa. Tästä seuraa, että säätimen lähtösuure (toimisuure) kasvaa kasvattaen prosessin säädettävää suuretta kohti käskysuuretta. (Eriksson ym. 2002, 2.)

### 2.10.2 P-säätö

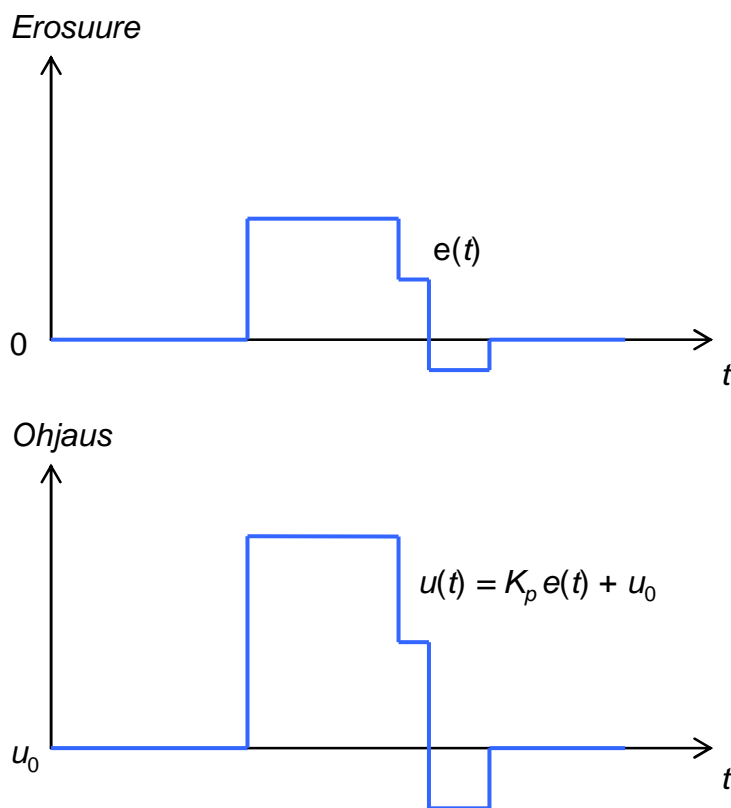
P-säädössä jatkuva-aikainen ohjaussignaalin arvo  $u(t)$  riippuu erosuureesta  $e(t)$  kaavan 10 mukaisesti (Harju – Marttinen 2000, 45).

$$u(t) = K_p e(t) + u_0,$$

KAAVA 10

jossa  $K_p$  on säätimen vahvistus ja  $u_0$  on ohjaussignaalin vakiotaso kun  $e(t) = 0$ . Ohjaussignaalin vakiotaso asetetaan sellaiseksi, että halutussa toimintapisteessä ei esiinny säätövirhettä. Jos erosuure on nolla, on säätimen lähtö sama kuin  $u_0$  (usein nolla). P-säädin jättää säädettävään systeemiin asentovirhettä eli asetusarvo – mittaus  $\neq 0$ . Kun vakiotaso  $u_0$  asetetaan toimipistettä vastaavaksi, jää asentovirhe tällöin melko pieneksi. (Harju – Marttinen 2000, 45.)

Kuvassa 18 nähdään P-säätimen askelvaste, kun säätimelle syötetään eri-kokoisia askeljännitteitä ja takaisinkytkentä ei ole käytössä. Vaikka käytän-  
nössä erosuure ei olekaan vakio, voidaan säätimen toiminta ymmärtää hel-  
posti tämän esimerkin avulla. Säätimen lähtö eli ohjaus on askel, jonka koko  
on erosuureen askel kerrottuna vahvistuksella  $K_p$ , johon summataan vielä  
vakiotaso  $u_0$ . Koska P-säätimessä ohjaussuure pysyy vakiona kun, erosuure  
ei muutu, seuraa tästä P-säädön taipumus pysyvään virheeseen: Toimilait-  
teen asento riippuu erosuureesta, joka on nolla vain tietyllä toimilaitteen  
asennolla. (Harju – Marttinen 2000, 46.)



KUVA 18. P-osan vaste (mukaillen Harju – Marttinen 2000, 46)

### 2.10.3 Integroiva säätö

Integroivaa säätöä käytetään usein yhdessä P-säädön kanssa. I-osan ansi-  
osta P-säädölle tyypillinen asentovirhe jää pois. PI-säätimen ohjaussignaali  
lasketaan kaavalla 11. (Harju – Marttinen 2000, 47.)

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right)$$

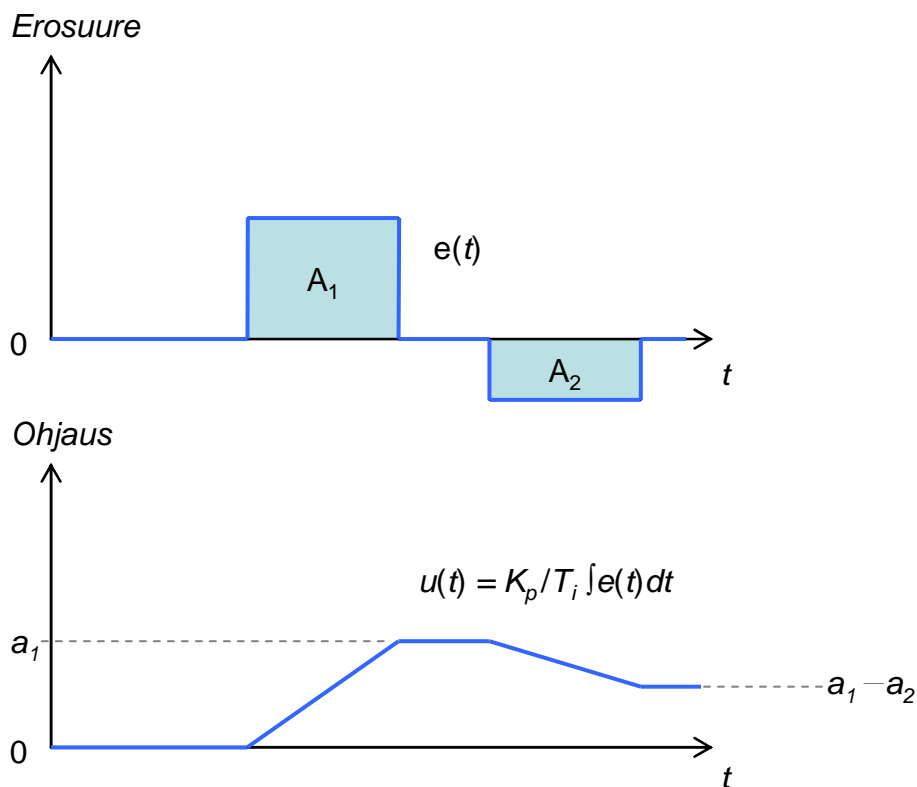
KAAVA 11

$T_i$  = integrointiaika sekunteina

P-säätöön verrattuna säätimen signaalin vakiotaso  $u_0$  (kaava 10) on korvattu ajan funktiona muuttuvalla erosuureen integraalilausekkeella. Säätimen lähtö muuttuu niin kauan, kunnes säätöpoikkeama on nolla. Säätimen lähtöön vaikuttaa siis säätöpoikkeaman suuruus ja säätöpoikkeaman vaikutusaika. Matemaattisesti integrointi tarkoittaa pinta-alan laskemista, eli ohjaustaso  $a_1$  on riippuvainen pinta-alasta  $A_1$  (kuva 19). Kun erosuure menee takaisin nolleen, jää säätimen ohjaus vakioksi. Säätimen lähtö voi pienentyä vain kun erosuure on negatiivinen. (Harju – Marttinen 2000, 46–47.)

Kuvassa 19 erosuure on suuruudeltaan pienempi negatiiviseen suuntaan (kuitenkin ajalliselta kestoaltaan yhtä suuri), joten säätimen ohjaus pienenee hitaammin kuin kasvaa. Kun lopuksi erosuure jää nolleen, jää säätimen ohjaukseen perustaso  $a_1 - a_2$  (ns. bias). Näin integrointitermi hakee automaattisesti ohjaukseen perustason, jolla pysyvää virhettä erosuureeseen ei jää. Tämä vastaa P-säädön vakiotasoa  $u_0$ . Niin kauan kuin erosuuretta esiintyy, integroiva osa kasvattaa tai pienentää ohjausta, jotta säätöpoikkeamasta päästään eroon. (Harju – Marttinen 2000, 46–47.)





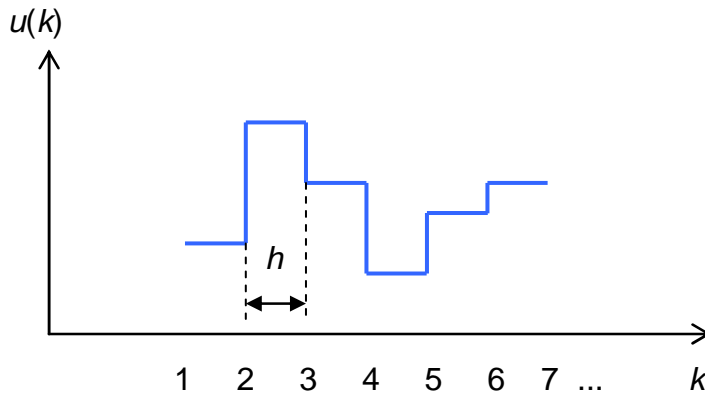
KUVA 19. I-osan vaste (mukaillen Harju – Marttinen 2000, 47–48)

#### 2.10.4 Tietokonesäätö

Nykyaikaiset säätimet toteutetaan mikroprosessoripohjaisilla ratkaisuilla. Säätöalgoritmin muokkaaminen on suhteellisen helppoa ja kustannuksiltaan kohtuullista. (Harju – Marttinen 2000, 52.)

Koska mikroprosessorissa tietojenkäsittely perustuu peräkkäisiin toimintoihin, laskentaan kuluu aikaa. Uusia signaaleja voidaan ottaa vastaan vain tietyin aikaväleillä. Digitaalinen (diskreettiaikainen) PI-säädin vastaa ominaisuuksiltaan analogista, aikajatkuvaa PI-säädintä. Olennaisena lisäpiirteenä digitaalisessa säätimessä on säädön viritykseen vaikuttava uusi parametri, säätöväli. Säätövälin  $h$  ajan digitaalinen säädin pitää lähtöarvonsa vakiona (Kuva 20). Koko laskenta perustuu näytteisiin, joten säätimet toimivat digitaalisina. Säätimen ohjaus on porrasmainen, eli  $u(t) = u(kh)$ ,  $kh \leq t < kh+h$  missä  $h$  on säätöväli ja  $k = 0, 1, 2, \dots$ , eli ohjaus pidetään vakiona koko säätövälin ajan.

Tätä kutsutaan nollannen kertaluvun pitopiiriksi (ZOH, Zero Order Hold).  
(Harju – Marttinen 2000, 52–53.)



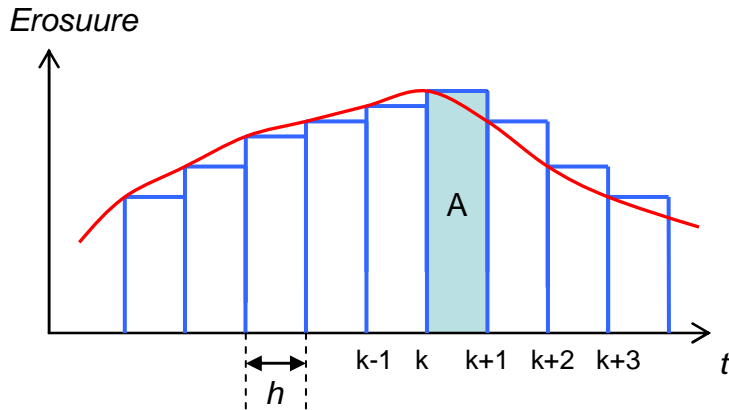
*KUVA 20. Säätimen lähtö on digitaalinen lukujono, josta nollannen kertaluvun pitopiiri muodostaa paloittain vakion signaalin (Harju – Marttinen 2000, 53)*

Aikaisemmin käsitellyt aikajatkuvat säätimet voidaan muuttaa digitaaliseen muotoon. Aiemmin edellä esitettyä jatkuva-aikaista integrointitermiä kuvataan diskreettiaikaisena suorakaiteiden summana, jossa jokaisen yksittäisen suorakaiteen kanta on säätöväli ja korkeus on suureen loppupiste kyseisen näytteen hetkellä (kuva 21). Mitä pienempi säätöväli on, sitä tarkemmin suorakaiteiden pinta-alojen summa vastaa todellista pinta-alaa. Pinta-alaa kuvaa nyt kaavan 12 termi. (Harju – Marttinen 2000, 43.)

$$\sum_{n=1}^k h e(n)$$

KAAVA 12

missä merkintä  $\Sigma$  tarkoittaa summaa suorakaiteiden pinta-alasta (kanta  $h$  kertaa korkeus  $e(n)$ ).



KUVA 21. Esimerkki pinta-alan laskemisesta näytteenottoon perustuen (mu-  
kailen Harju – Marttinen 2000, 54)

Ottamalla käyttöön edellä esitetyt laskentakaavat digitaalisen PI-säätimen  
ohjaus voidaan laskea kaavalla 13 (Harju – Marttinen 2000, 55).

$$u(k) = K_p \left( e(k) + \frac{h}{T_i} \sum_{n=1}^k e(n) \right) \quad \text{KAAVA 13}$$

Näin saatua algoritmia kutsutaan asentoalgoritmiksi (absoluuttitila) koska se  
kertoo jokaisella ajanhetkellä  $k$  ohjauksen  $u(k)$  sen hetkisen absoluuttisen  
(toimilaitteelle menevän todellisen) arvon. (Harju – Marttinen 2000, 56.)

Toinen tapa laskea ohjaus on ns. nopeusalgoritmi eli säätimen inkrementtitila  
(kaava 14) (Harju – Marttinen 2000, 56).

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad \text{KAAVA 14}$$

missä  $\Delta u(k)$  on ohjaussignaalin muutos eli inkrementti hetkellä  $k$  eli nykyisen  
ja edellisen arvon erotus. Todellinen säätimen lähdön arvo saadaan siis kaa-  
vasta 15 (Harju – Marttinen 2000, 56).

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad \text{KAAVA 15}$$

Tilanteessa, jossa ohjaussignaali saavuttaa toimilaitteen rajoitukset, säätöpiiristä tulee avoin järjestelmä, sillä toimilaite pysyy rajoituksessaan riippumatta prosessin tilasta. Säätimessä oleva I-osa jatkaa kuitenkin kasvamistaan koko ajan, koska säätöpiirissä on edelleen erosuuretta. Säätimen I-osa yrittää siis kasvattaa koko ajan ohjausta, mutta toimilaite on saavuttanut ääriasentonsa. Jotta nyt I-osa voisi palata normaaliin tilaan, tulisi erosuureen merkin olla vastakkainen hyvin pitkän ajan. Tämä ns. WindUp-ilmiö aiheuttaa ongelmia jos sitä ei ole huomioitu toteutuksessa. Ongelma on lähinnä digitaalisissa säätimissä. (Harju – Marttinen 2000, 58-59.)

### 2.10.5 Esimerkki digitaalisesta PI-säätimestä

Seuraavassa on esimerkki PI-säädön toteutuksesta (Harju – Marttinen 2000, 57). Alkuperäisen esimerkin koodi on muutettu C-kieliseksi.

```
...
#define N 100

int main(int argc, char *argv[])
{
    float h = 1; //säätöväli
    float Kp= 1; //vahvistus
    float r = 2; //asetusarvo
    int Ti = 4; //integrointiaika
    float X = Kp*h/Ti; //apumuuttuja
    int k;
    float y[N]={0}; //ulostulo vektori
    float I[N]={0}; //I-termi vektori
    float u[N]={0}; // ohjaus vektori
    float e[N]={0}; //erosuure vektori

    printf("k\t y(k)\t\t e(k)\t\t I(k)\t\t u(k)");

    for(k=1;k<N;k++)
    {
        y[k] = 0.15*u[k-1] + 0.9*y[k-1]; // prosessimalli
        e[k] = r - y[k];
        I[k] = I[k-1] + e[k];
        u[k] = Kp*e[k] +X*I[k];
    }

    //*****TULOSTUS*****//
}
```

```
    for(k=1;k<N;k++)
    {
printf("\n%d \t%f \t%f \t%f \t%f",k,y[k],e[k],I[k],u[k]);

    }
printf("\n");
return(0);
}
```

## 3 TOTEUTUS

Edellä on esitelty sähkömoottorien toimintaperiaate sekä näissä esiintyvät sähkömagneettiset ilmiöt. Lisäksi on esitelty säätöteorian peruseriaatteet. Tämän teoriapohjan perusteella ei ilmene seikkoja, jotka tekisivät mahdottomaksi kuntoilulaitteen idean mukaisen toteutuksen.

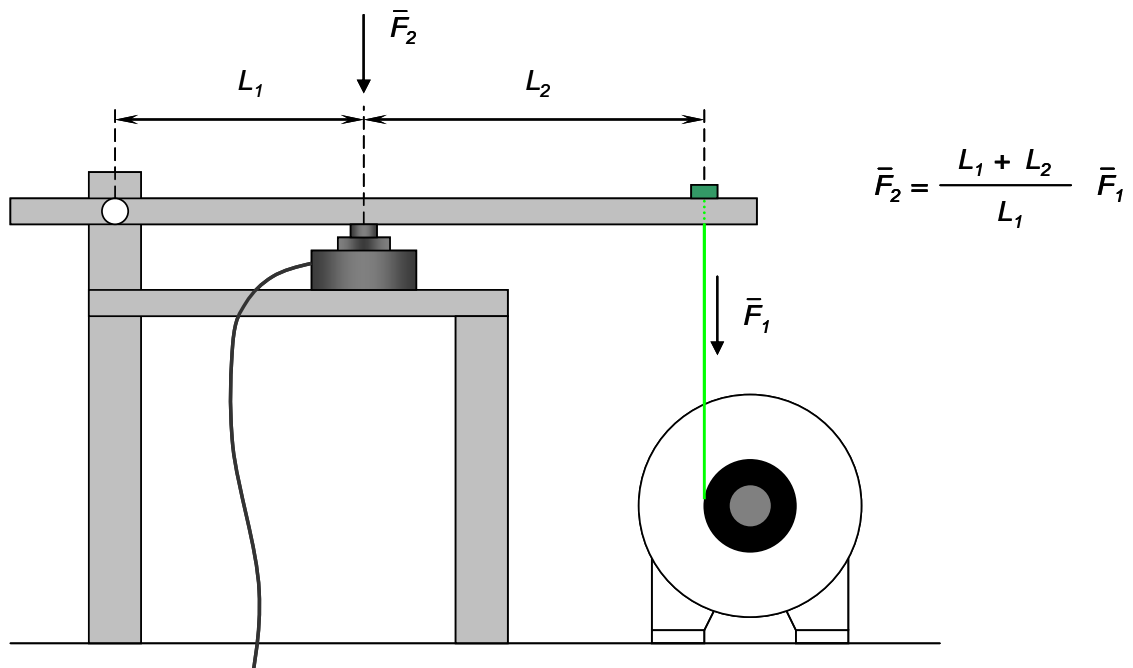
Toteutuksessa huomioitiin prototyypin rakentamisessa vaadittava taustateoria ja pohdittiin ja kokeiltiin eri tavoin eri tyyppisiä ratkaisuvaihtoehtoja prototyypin erilaisten osien toteutuksessa. Näitä kokeiluja ja pienimuotoisia testejä tehtiin lukuisia, ja niitä ei ole tässä tarkemmin kuvattu; vain lopulliset ratkaisut on esitetty.

### 3.1 Mekaaninen rakenne ja toimintaperiaate

Aluksi pureuduttiin prototyypin mekaanisen rakenteen toteuttamiseen. Työn tilaajalla oli mekaaninen prototyyppi laitteen jousivastuksesta, johon suunniteltava ohjauselektronikka ja lisämekaniikka tulisi sovittaa. Alkuperäisenä ajatuksena oli säätää aktiivisesti tämän prototyypin jousivastusta prototyypin rakenteeseen erikseen lisättävän sähkömoottorin avulla, jota soveltuva automatiikka ohjaisi. Kuitenkin, kun ongelmaan perehdyttiin tarkemmin, syntyi ajatus yksinkertaistaa alkuperäistä prototyyppiä siten, että säätötoiminnan sijasta sähkömoottoria käytettäisiinkin säädettävänä kuormana. Ratkaisun toimivuutta selvitettiin sekä käytännön kokein että sähkömoottoreihin ja magnetismiin liittyviin laskelmiin tukeutuen, ja tätä yksinkertaistettua mallia päädyttiin yhdessä toimeksiantajan kanssa soveltamaan lopullisen prototyypin toteuttamisessa. Uuden toteutuksen erityisenä etuna oli se, että sen mekaaninen rakenne oli yksinkertaisempi kuin toimeksiantajan alkuperäisen idean mukainen säädettävään jousivastukseen pohjautuva ratkaisu.

Prototyypin mekaaninen periaate ilmenee kuvasta 22. Moottorin vääntömomentti on suoraan verrannollinen moottorin virtaan  $I$  ja moottorikohtaiseen

vakioon  $K_t$  (kaava 3). Tästä seuraa, että säätämällä moottorin läpi kulkevaa virtaa, voidaan vaikuttaa moottorin tuottamaan vääntömomenttiin. Vääntömomentti saadaan muutettua haluttuun suuntaan vaikuttavaksi voimaksi moottorin akselille kiinnitetyn rullan ja narun avulla.



*KUVA 22. Moottorin kehittämä voima siirrettynä vipuvarren avulla voima-anturille*

Prototyypissä käytettäväksi sähkömoottoriksi valittiin halpa akkuporakone, koska sen sisältämän kestmagnetoidun sähkömoottorin arveltiin riittävän prototestaukseen. Porakone purettiin ja siitä poistettiin alkuperäinen tehonsäätökytkin sekä siihen liittyvä ohjauselektronikka (kuva 23).



*KUVA 23. Porakoneesta on poistettu ohjauselektronikka sekä käyttökytkin*

Tämän jälkeen porakone kiinnitettiin testauspöytään 8 mm:n kierretangolla (kuva 24).



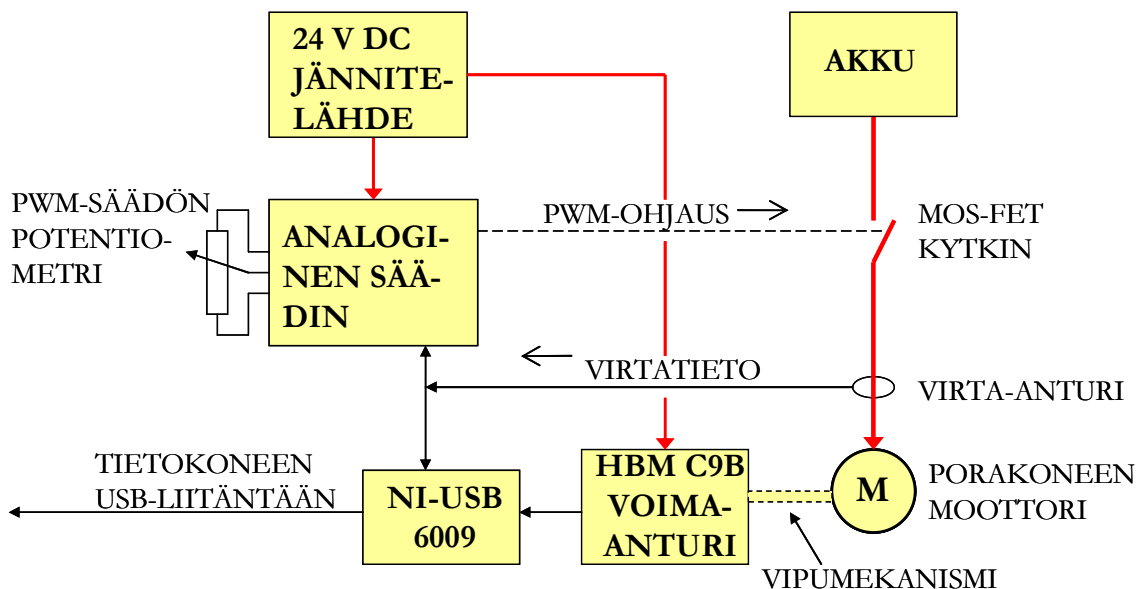
*KUVA 24. Porakone kiinnitettynä testauspöytään*



### 3.2 Testauskytkentä

Seuraavaksi suunniteltiin ja rakennettiin koekytkentäalustalle analoginen PWM-säädin ja virranmittauskytkentä, joiden avulla tutkittiin sähkömoottorin käyttäytymistä. Lisäksi testimoottorista mitattiin DC-resistanssi sekä induktanssi. Moottorin sähköinen ja mekaaninen aikavakio olisi ollut mahdollista suorittaa myös kokeellisesti (DC motors, speed controls, servo systems 1980, 2-79-2-80).

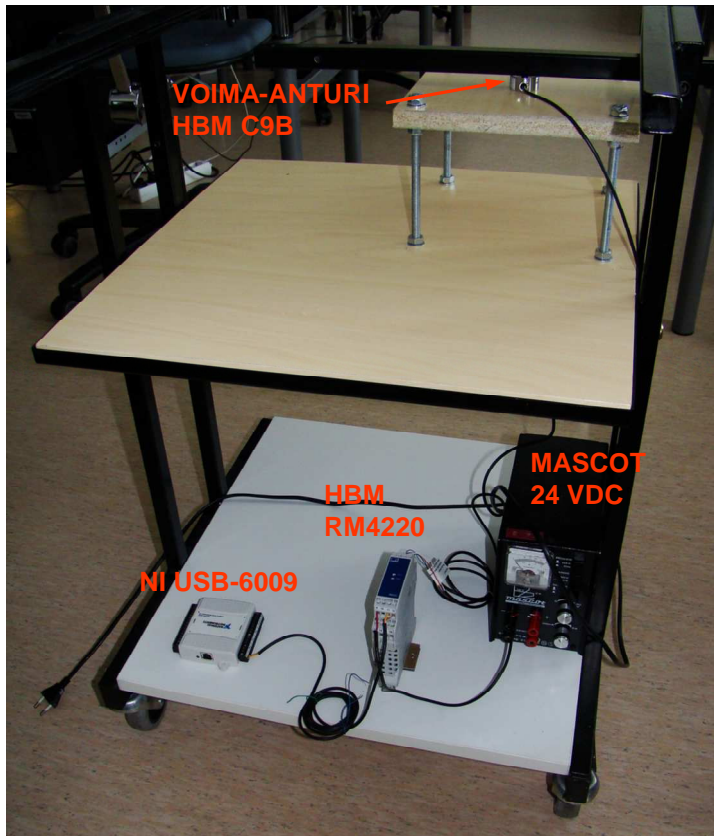
Kuvassa 25 nähdään testauslaitteiston lohkokaavio. Moottorille menevä virta mitattiin sitä varten rakennetulla virranmittauskytkennällä ja vietiin NI USB-6009 -mittauskortille, joka muunsi analogisen signaalin digitaaliseen muotoon. Moottorin aiheuttama voima välitettiin vipuvarren välityksellä voimaanturiin josta edelleen vahvistimelle ja vahvistimelta NI USB-6009 -kortille.



KUVA 25. Moottorin testauslaitteiston sähköinen lohkokaavio

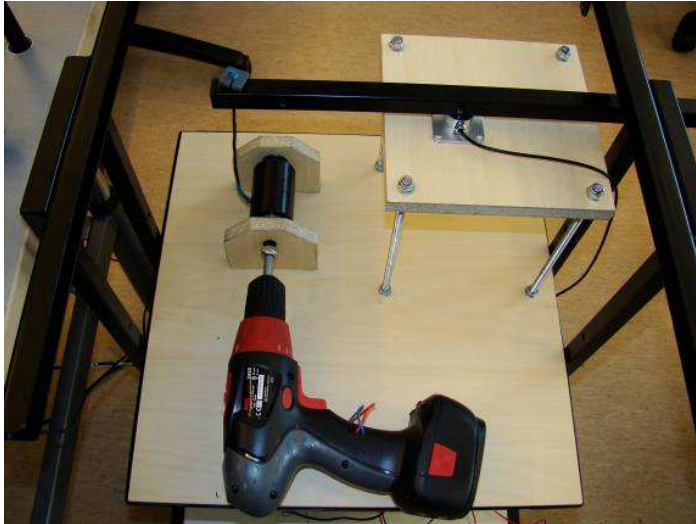
Testauslaitteiston osien sijoittelu nähdään kuvassa 26. Testauslaitteistosta puuttuvat vielä moottori sekä rulla laakeripidikkeineen. Kuvan yläosassa on

vipumekanismi, joka nojaa voima-anturiin HBM C9B. Alatasolla sijaitsevat voima-anturin signaalinvahvistinyksikkö HBM RM4220 sekä vahvistinyksikön jännitelähde Mascot. Lisäksi alatasolla sijaitsee NI USB-6009 -mittakortti, jolla tehdään AD-muunnos LabVIEW'ille.



*KUVA 26. Testauspöytä*

Kuvassa 27 moottori sekä rulla laakeripidikkeineen on kiinnitetty testauslaitteistoon. Kuvassa 28 ovat akkuporakone ja rulla laakeripidikkeineen. Kuvassa 28 näkyvät myös PWM-säätimen koeyhtenäalusta ja virranmittausyksikkö

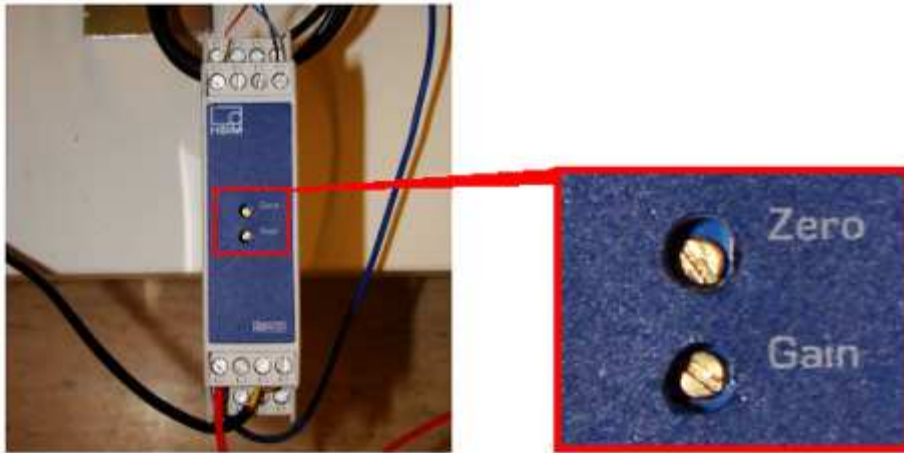


*KUVA 27. Moottori sekä rulla laakeripidikkeen kiinnitettynä testauslaitteistoon*



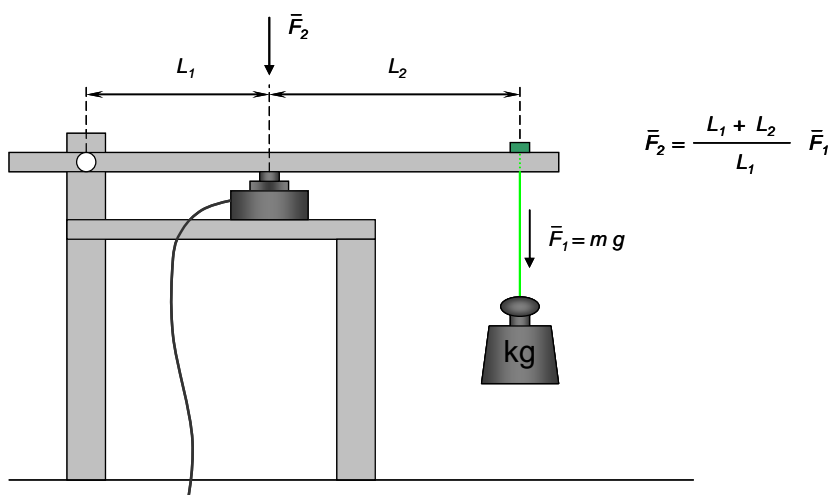
*KUVA 28. Moottori kiinnitettynä testauspöytään. Pieni vihreä kortti sisältää virranmittauskytkennän.*

LabVIEW-ohjelman massanmittaus kalibroitiin siten, että ensiksi kalibroinnissa käytettävien käsipainokiekkojen massa määritettiin tarkkuusvaa'alla ja tämän jälkeen käsipainokiekkoja lisättiin asteittain vipuvarren päähän. Tulokset kirjattiin ylös. HBM RM4220 -vahvistimessa on kaksi kalibroitiruuvia, joista toisella voidaan säätää vahvistusta (Gain) ja toisella off-settiä (Zero) (kuva 29).



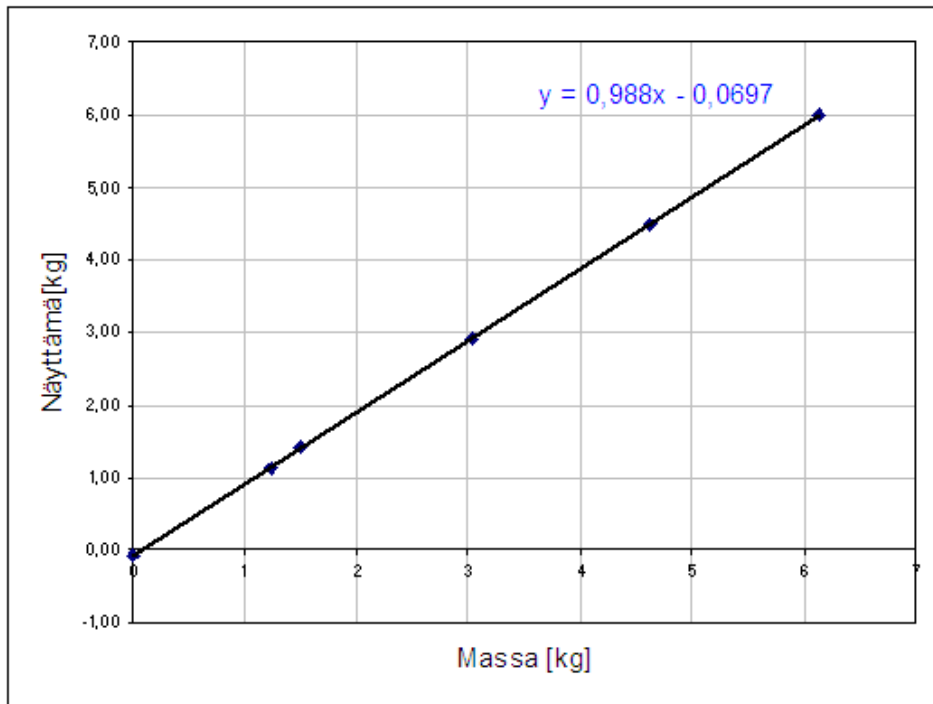
KUVA 29. HBM RM4220 vahvistimen kalibroitiruuvit

Kuvassa 30 nähdään kalibroinnin periaate tunnettujen kalibroitipainojen avulla.

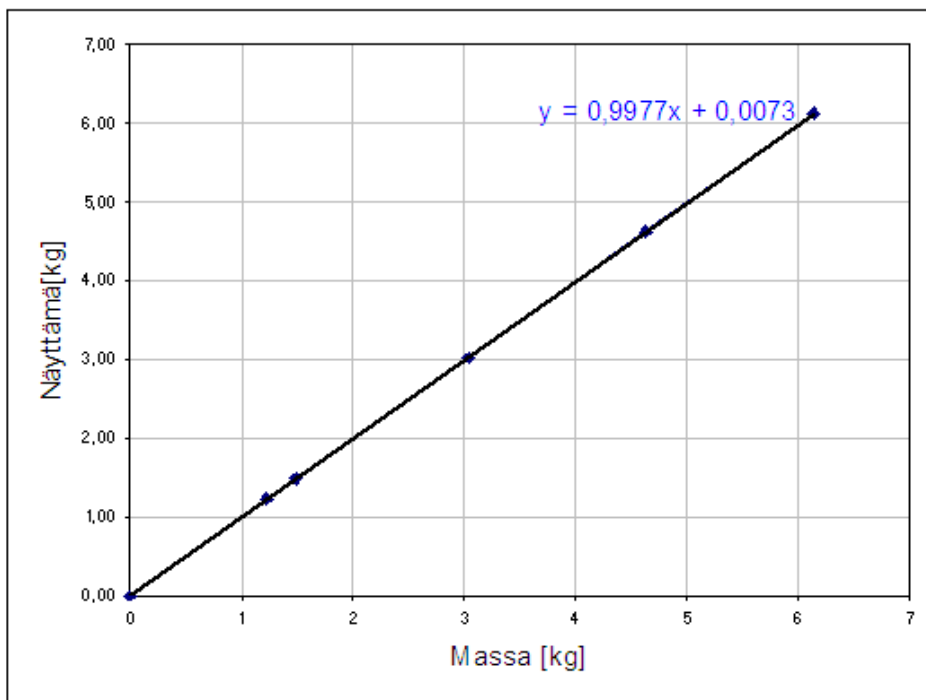


KUVA 30. Kalibroinnin periaate

Kuvassa 31 nähdään arvot ennen HBM RM4220 -vahvistimen kalibrointia ja kuvassa 32 arvot vahvistimen kalibroinnin jälkeen.



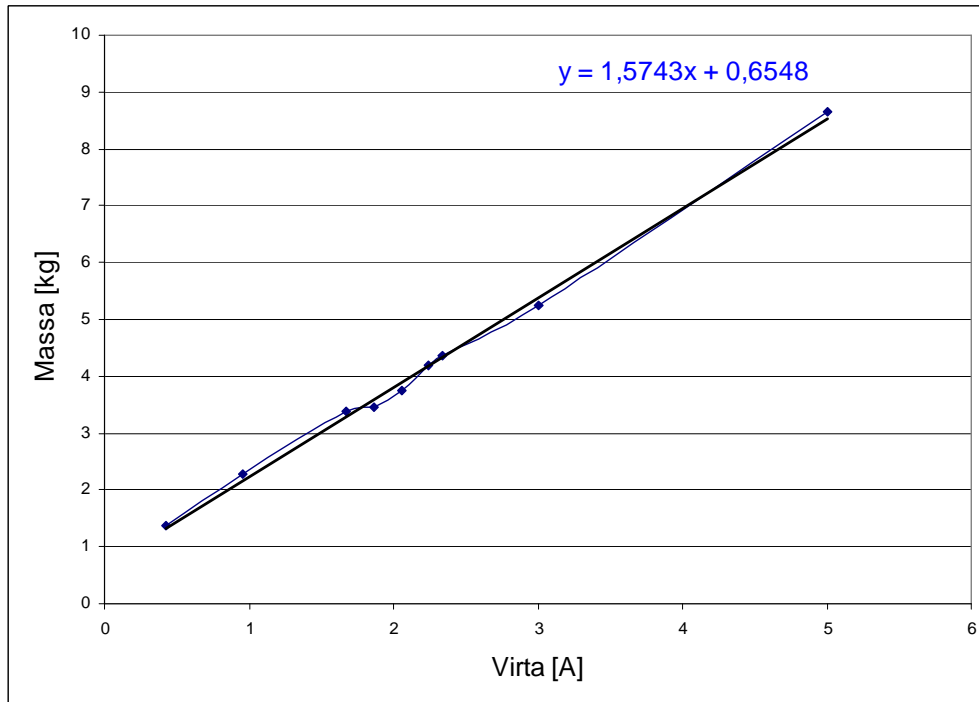
KUVA 31. Näyttämä massan funktiona ennen kalibrointia



KUVA 32. Näyttämä massan funktiona kalibroinnin jälkeen

Tämän jälkeen selvitettiin testimoottorin tuottama voima virran funktiona sitä varten tehdyllä LabVIEW-ohjelmalla. Tulosten perusteella moottorin tuottama voima kasvaa lineaarisesti virran mukaan. Moottorin välityssuhde on 1:17.

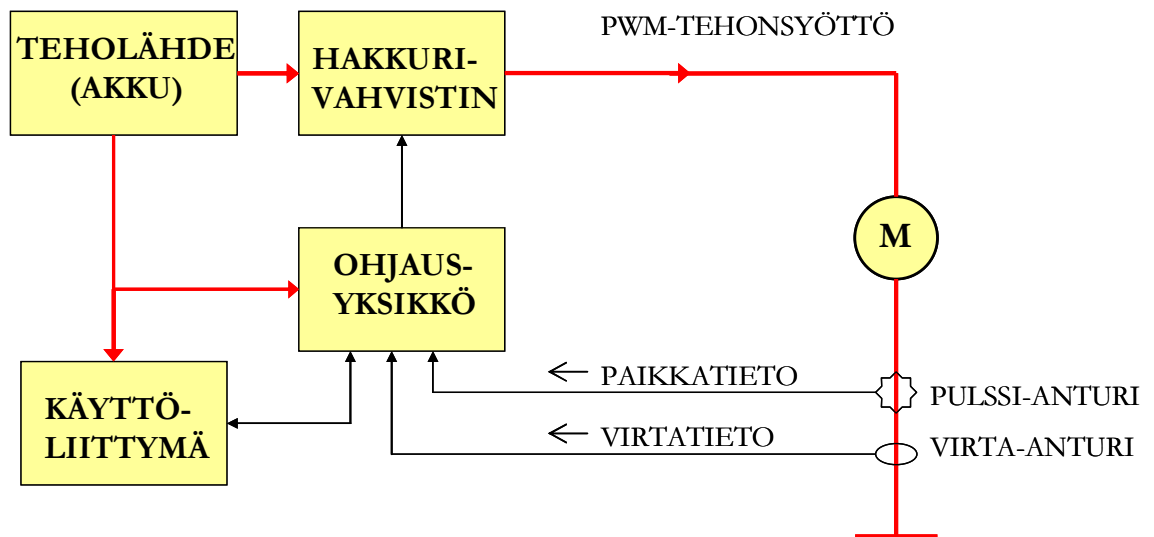
Kuvassa 33 nähdään moottorin tuottama voima kilogrammoina moottorin roottorivirran funktiona. Kuten kuvaajasta voidaan havaita, voima on suoraan verrannollinen moottorin roottorivirtaan. Mittausepävarmuutta aiheuttivat muun muassa suuresta välityksestä johtuvat kitkahäviöt.



KUVA 33. Moottorin kehittämä voima kilogrammoina roottorivirran funktiona

### 3.3 Lopullinen kytkentä

Alustavien kokeiden perusteella voitiin todeta, että periaateratkaisu toimi. Seuraavaksi alkoi lopullisen kytkennän suunnittelu. Kuvassa 34 on laitteiston lohkokaavio. Moottorin ja hakkurivahvistimen tehollähteenä toimii akkupora-koneen oma akku. Ohjausyksikön tehonsyöttö on järjestetty pienitehoisella verkkomuuntajalla.



KUVA 34. Testauskytkennän lohkokaavio

Käyttöliittymänä toimii 2x16 merkin LCD-näyttö sekä kolme painikenappia (kuva 35).

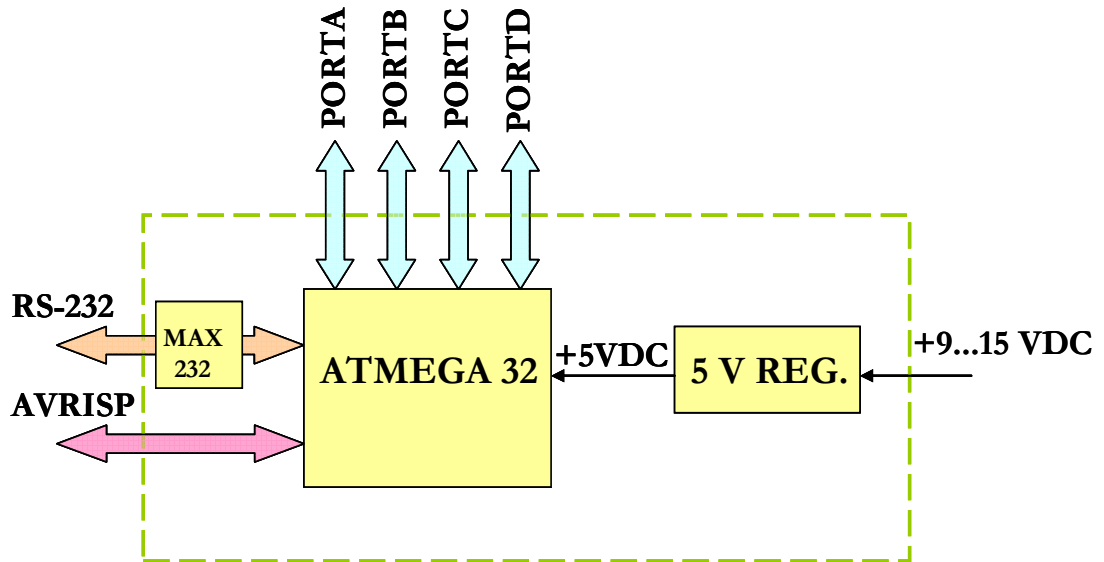


KUVA 35. Laitteen käyttöliittymä

Ohjaimeksi valittiin Atmelin Atmega 32, jonka ominaisuuksien arvioitiin riittävän prototyyppiin. Ohjelmointi tapahtui C-kielillä. Ohjelmointiympäristönä toimi WinAVR.

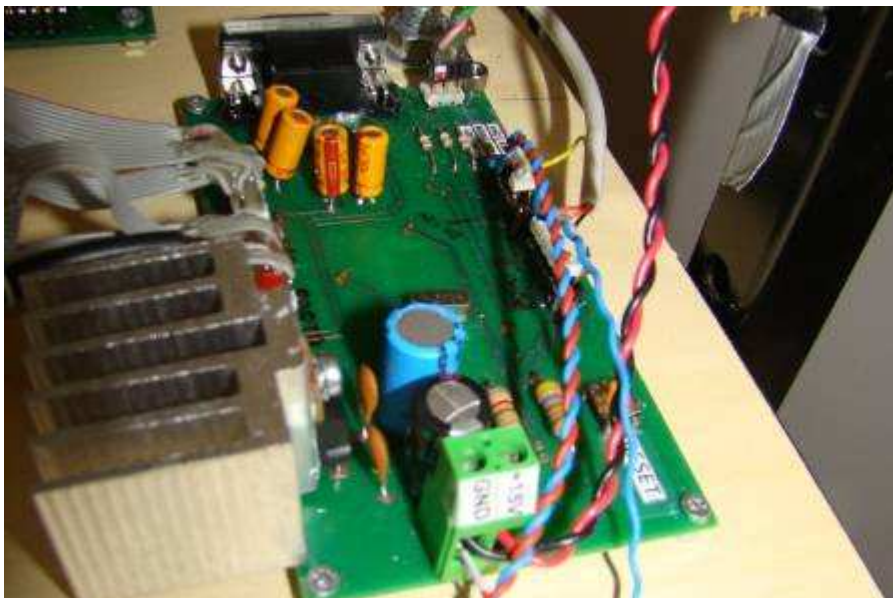
Ohjauksen suunnittelu aloitettiin määrittämällä kortin vaatimat ulkoiset liitännät. Korttiin sisällytettiin AVRISP-ohjelmointiliitäntä ohjelmointiin, neljä I/O-liitäntää, RS-232-liitäntä sarjaporttiliikennettä varten sekä käyt-

töjänniteliitäntä tehonsyöttöä varten. Ohjainkorttiin sisällytettiin myös 5 voltin regulointipiiri sopivan käyttöjännitetasen luomiseksi sekä MAX232-tasonmuunnin sarjaportin ja kontrollerin välille. (Kuva 36.)



KUVA 36. Ohjainkortin lohkokaavio liitännöineen

Kuvassa 37 valmis ohjainkortti kiinnitettynä testausalustaan.

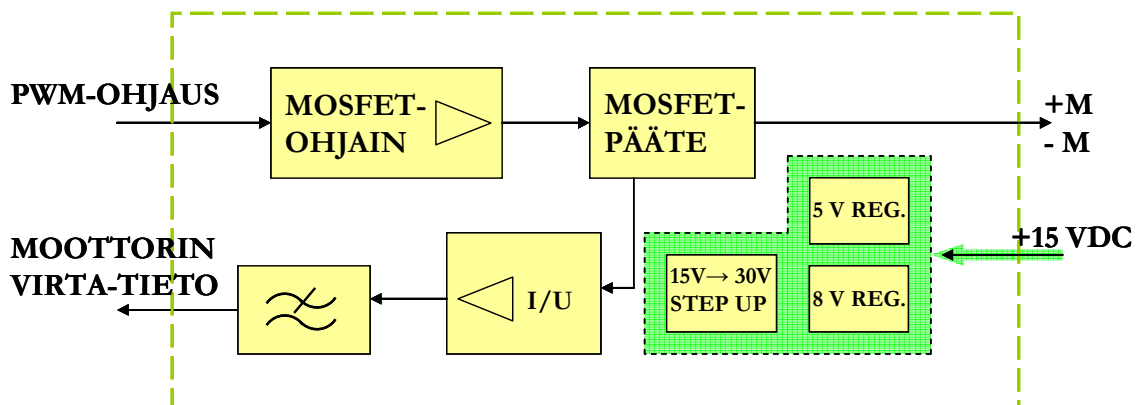


KUVA 37. Ohjainkortti



Hakurivahvistin toteutettiin N-tyyppin MOSFETeillä niiden pienen kanavaresistanssin vuoksi. PWM-ohjaussignaali tuodaan ohjainkortilta hakurivahvistimen MOSFET-ohjainlohkoon. Lohko sisältää MOSFET-transistorien tarvitsemat ohjainpiirit, koska TTL-lähtö ei suoraan kykenisi ohjaamaan MOSFET-transistoreita varsinkaan suurella taajuudella transistoreiden hilakapasitanssien takia.

Hakurivahvistinkortin tehölähdelohko sisältää 5 voltin ja 8 voltin jänniteregulaattorit. Lisäksi tehölähdelohkoon suunniteltiin ns. varauspumppu 15 voltin jännitteen nostamiseksi 30 volttiin riittävän hila-lähde (gate-source)-jännitteen varmistamiseksi käyttöjännitepuolen FETille. Moottorin virran mittaukseseen valittiin 0,01 ohmin sarja- eli shunttivastus, jonka yli vaikuttava roottorivirtaan verrannollinen jännite vahvistetaan ja viedään alipäästösuodatuksen jälkeen ohjainkortin AD-muuntimelle. (Kuva 38.)



KUVA 38. Hakurivahvistinkortin lohkoakaavio

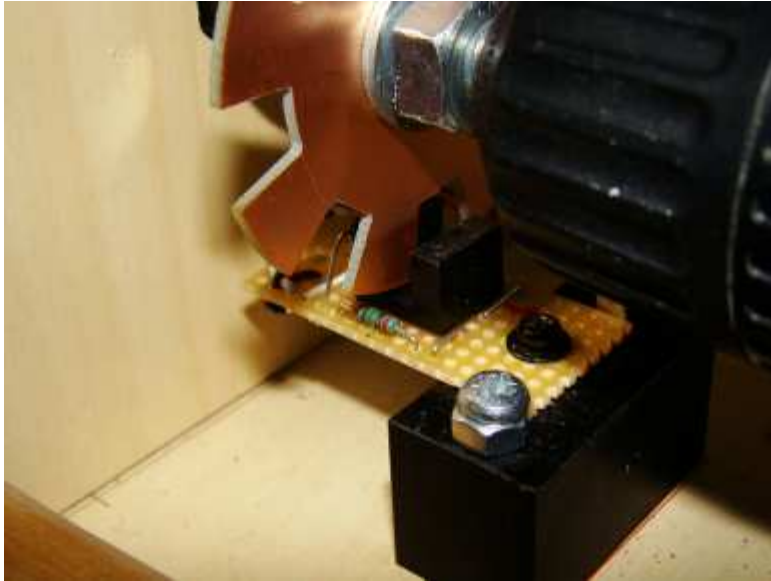
Hakurivahvistimen (kuva 39) suunnittelussa tehtiin lukuisia erityyppisiä laskelmia ja simulointeja, kuten tehotransistoreiden tehohäviön arviointia, jäähdytyslevyn mitoituksia sekä optimaalisen PWM-taajuuden selvittämistä. Taajuuden suhteen jouduttiin tekemään kompromissi, koska pienillä taajuuksilla moottorin ohjaus aiheutti voimakkaan epämiellyttävän äänen, kun taas äänetön, satojen kilohertsien suuruinen PWM-taajuus aiheutti suuret tehohäviöt transistoreissa. PWM-taajuudeksi valittiin ihmisen kuuloalueen yläpuolella

oleva 28,8 kHz:n taajuus meluongelmien välttämiseksi, kuitenkin niin että moottorin transistoreiden tehohäviöt pysyivät vielä siedettävänä.



*KUVA 39. Hakkurivahvistin*

Moottorin pyörimisnopeuden ja -suunnan mittaukseen valmistettiin kahdeksanhampainen ratas (kuva 40), joka katkoo kahta keskenään 90 asteen vaihesiirrossa olevaa valoveräjää. Näin saadaan määritettyä nopeuden lisäksi pyörimissuunta. Pulssit muokataan tämän jälkeen Schmitt-triggeripiirillä, jotta pulsseista saadaan puhdasta suorakaideaaltoa.



*KUVA 40. Moottorin pyörimisnopeutta ja -suuntaa mittaava dekooderipyörä*

Kyt kentöjen simuloinnissa käytettiin apuna Orcad 9.2 -versiota sekä Matlabia. Orcadilla simuloitiin erilaisia skenaarioita aikavakioista sekä komponenttien tehohäviöistä. Nämä tulokset olivat lähinnä suuntaa antavia, ja tulosten lopullinen käyttökelpoisuus selvisi vasta käytännön kokeissa.

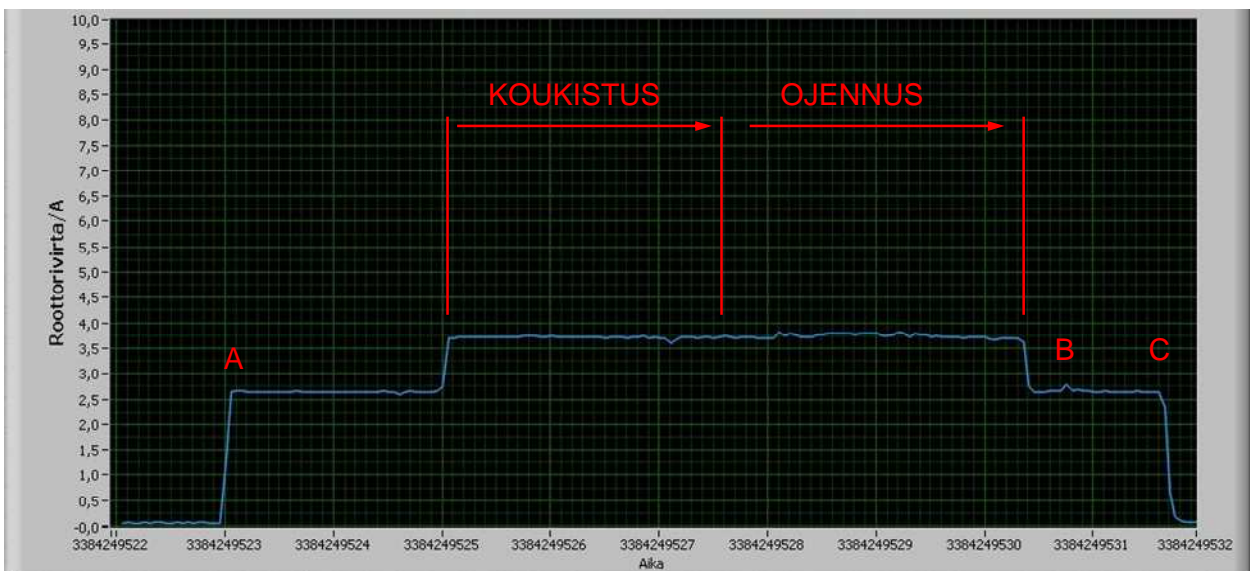
Piirilevyt suunniteltiin Eagle -piirilevynsuunnitteluohjelmalla ja ne jysrittiin piirilevynjysintälaitteella OAMK:n laitehuollossa olevalla piirilevyjysimellä suunnitteluinsinööri Auno Latvalehdon toimesta.

Kaikki tässä työssä tuotetut materiaalit, jotka katsottiin kuuluviksi salassapitosopimuksen piiriin, luovutettiin työn valmistuttua tilaajalle.

## 4 TULOKSET

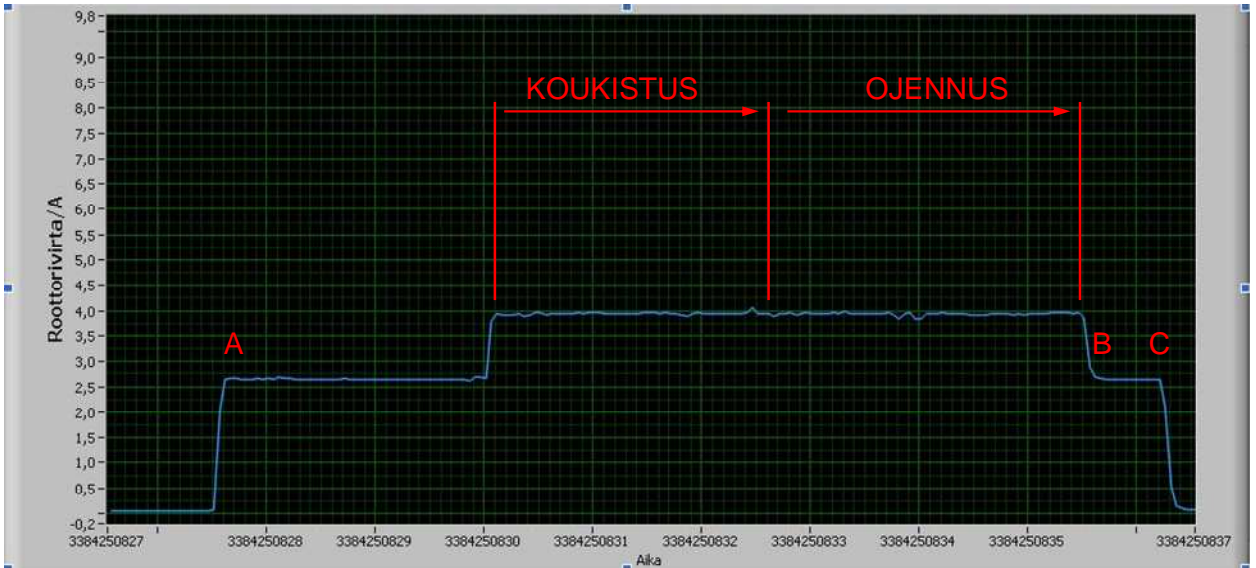
Prototyypin testattiin suorittamalla haisliike moottorin päässä olevaan rullaan kiinnitetyn narun ja kahvan avulla. Kolmessa ensimmäisessä liikkeessä säädin asetettiin vakiovastukselle, jonka suuruutta kasvatettiin portaittain. Moottorin virta liikkeen aikana vietiin NI USB 6009 -mittakortin kautta tietokoneeseen, jossa siitä piirrettiin kuvaajat LabVIEW'illä. Viimeisessä liikkeessä käytettiin ohjaimen ohjelmoitua profiilia, jossa vastus kasvaa liikeradan funktiona.

Kuvassa 41 nähdään moottorin roottorivirta haisliikkeen aikana. A-kohdassa vakiovirtasäätö kytketään päälle, jolloin esiasetusvirta kytkeytyy moottorille. Koukistus-vaiheen aikana säädin tunnistaa liikkeen, ja säätö kytkeytyy päälle ja pitää roottorivirran vakiona (3,7 A) riippumatta moottorin pyörimissuunnasta. Moottorin pyörimissuunta muuttuu siirryttäessä haisliikkeen koukistusvaiheesta ojennusvaiheeseen. Ojennusvaiheen lopussa (käsi takaisin suoraksi ala-asentoon) roottorivirta pienenee esiasetusarvoonsa. Kohdassa C säätö kytketään pois päältä.



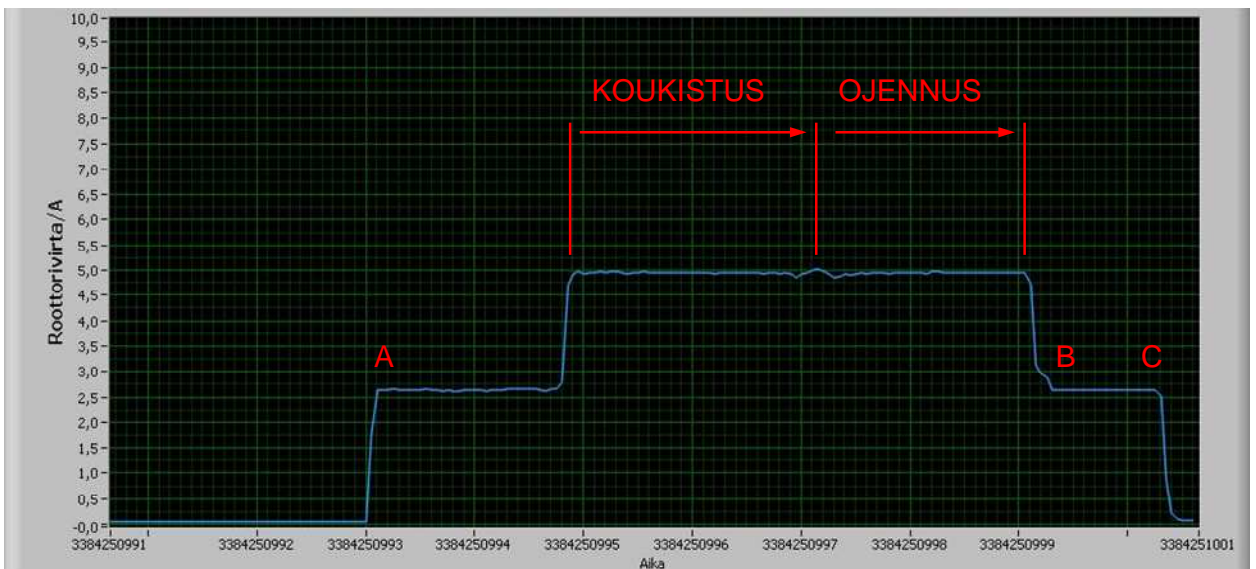
KUVA 41. Roottorivirta haisliikkeen aikana. Säätimen asetus: 3,7 A vakiovirta-säätö.

Kuvassa 42 tilanne on muuten sama kuin edellä, mutta roottorivirta on asetettu 4,0 A:n suuruiseksi.



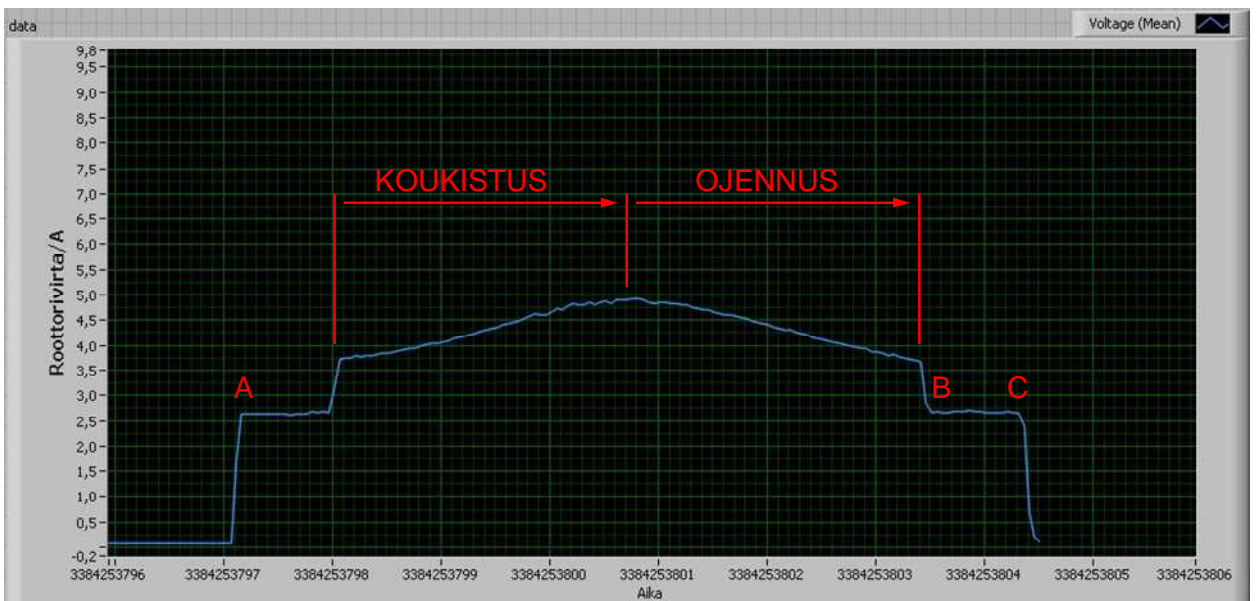
KUVA 42. Roottorivirta haUISliikkeen aikana. Säätimen asetus: 4,0 A vakiovirta-säätö.

Kuvassa 43 tilanne edelleen sama kuin edellä, mutta vakiovirta asetettu nyt 5 A:n suuruiseksi.



KUVA 43. Roottorivirta haUISliikkeen aikana. Säätimen asetus: 5,0 A vakiovirta-säätö.

Kuvassa 44 nähdään roottorivirta profiilisäädön aikana. Säädin kasvattaa nyt roottorivirtaa liikeradan mukaan eli paikan funktiona. Kohdassa A säätö kytketään päälle. Koukistusvaiheessa moottorin virta kasvaa 3,7 ampeerista 5,0 ampeeriin, jolloin ollaan hauisliikkeen yläasennossa. Ojennusvaiheen aikana roottorivirta pienenee vaiheittain takaisin alkuarvoonsa 3,7 ampeeriin. Lopuksi säädin tunnistaa että ollaan alkuasennossa, ja pudottaa roottorivirran esiasetusarvoon (B-kohta). C-kohdassa säätö kytketään pois päältä.



KUVA 44. Roottorivirta hauisliikkeen aikana. Säätimen asetus: 3,7 – 5,0 A profiilisäätö.

## 5 POHDINTAA

Lopputyön toteuttamiseksi syntyi oikeastaan kaksi ideaa, joista toinen olisi ollut huomattavasti vaikeampi toteuttaa, mutta tuloksena olisi ollut suurempia voimia käsittävä laitteisto. Näin ollen lopputyössä päädyttiin mekaanisesti yksinkertaisempaan ratkaisuun, joka arvioitiin olevan mahdollista toteuttaa lopputyön rajausten mukaisesti.

Työn alkuvaiheessa oli epäselvää, mihin ja millaisia maksimivoimia laitteen piti kyetä käsittelemään. Työn loppuvaiheessa tarkentui, että voimien suuruusluokat lopullisessa tuotteessa olisivat suurempia kuin alustavissa esimerkeissä.

Laitteen suunnittelua ohjasi osaltaan myös resurssien puute, varsinkin mekaniikan valmistuksessa. Tästä seurasi, että laitteen suunnittelussa ei ollut mahdollista toteuttaa syntyneitä ideoita kaikilta osin.

Työssä pääsin soveltamaan hyvin aiemmilta kursseilta oppimiani asioita, kuten fysiikkaa ja sähkötekniikkaa. Erityisen suuri hyöty oli myös ohjelmointikursseista, varsinkin C-kielen opiskelusta sekä näiden jatkona HYTKEssä yliopettaja Manne Hannulan tarjoamassa kesätyöpaikassa opiskelemastani mikrokontrollereiden ohjelmoinnista. Toisaalta eteen tuli myös asioita, jotka eivät kuuluneet koulutusohjelmaamme, kuten säätöteoria ja sähkömoottoreiden toiminta. Näistä työ opetti paljon uusia asioita.

Sähkömoottoria ohjaavan hakkurivahvistimen PWM-taajuuden valinta aiheutti ongelmia. Vapaasti värähtelevällä säädöllä (chopper), jossa säädin katkaisee virran aina sen saavutettua asetusravon, PWM-taajuutta rajoittaa moottorin sähköinen aikavakio. Valitulla moottorilla taajuus asettui n. 400 Hz:n paikkeille, joka on ihmisen kuuloalueella. 400 Hz:n PWM-taajuuteen olisi sisällynyt teknisesti paljon etuja, kuten hyötysuhteen paraneminen ja transistorien tehohäviöiden pieneneminen. Haittana tällä taajuusalueella oli kuitenkin

kin voimakas ja huomiota herättävä epämiellyttävä ääni, joten taajuus nostettiin ihmisen kuuloalueen ulkopuolelle.

Mekaniikan toteuttamisessa tilanne oli se, että yksinkertaistenkin osien tekeminen vaati kekseliäisyyttä sekä turhautumisen sietämistä, mutta eteen tulleista ongelmista selvittiin yllättävänkin helposti.

Sähkömoottorin avulla on mahdollista simuloida tietyin rajoituksin massaa, kun tiedetään moottorin akselin kulmakiihtyvyys. Kiihtyvyys voidaan määrittää esimerkiksi mittaamalla akselin kierrosnopeutta reaaliajassa, josta kiihtyvyys määritetään ohjelmallisesti (nopeuden muutos aikayksikössä). Lisäksi täytyy huomioida pyörivien osien hitausmomentit, jos kulmakiihtyvyydet ovat suuria. Jos kulmakiihtyvyyttä ei ole, vaan pelkästään tasainen liike tai ei liikettä lainkaan, tällöin moottoriin syötetään vakiovirta, jolla saadaan haluttu voima. Tämä vastaa käsipainon tasaista liikuttamista vertikaalisuunnassa tai kannatteleminen paikoillaan. Massan simuloinnissa dekooderipyörän hampastuksen olisi syytä olla nykyistä kahdeksan hampaista tiheämpi, jotta säädin reagoisi riittävän nopeasti ja tarkasti lyhyellä matkalla tapahtuviin nopeuden muutoksiin.

Voidaan myös pohtia sitä, onko massan simuloinnista hyötyä kuntoilun kannalta, koska tällöin kuormitus muuttuu epätasaisemmaksi verrattuna pelkkään vakiovoimasäätöön. Toisaalta massan simuloinnin tuoma ”tuttuuden” tunne voi tehdä liikesuorituksen miellyttävämmän tuntuiseksi, ja kyseistä parametria voidaan tarvittaessa muuttaa. Voidaan siis vaikuttaa erikseen massaan (hitauteen) ja painovoimaan. Tällöin voitaisiin simuloida esimerkiksi massan liikuttamista painottomassa tilassa.

Ottaen huomioon työhön sisältyneet haasteet lopputulos on varsin tyydyttävä. Nyt aikaansaadun työn ja kokemuksen pohjalta olisi hyvät edellytykset lähteä jatkokehittämään lopullista tuotetta tai tuotteita, jotka poikkeavat käyttötarkoituksensa mukaan toisistaan (kuntoilu, kuntoutus). Kuntoiluun soveltuisi tämän työn pohjalta syntyneen tiedon valossa toinen, monimutkaisempi



ratkaisu, kun taas kuntoutukseen voitaisiin hyvin soveltaa tässä työssä toteutettua ratkaisua.

# LÄHTEET

Airila, Mauri 1999. Mekatroniikka. 5., korjattu painos. Helsinki: Opetusministeriö.

DC motors, speed controls, servo systems: Engineering Handbook 1980. Fifth edition. Electro-Craft Corporation

Eriksson, Lasse – Nihtilä, Markku – Oksanen, Timo 2002. P-, PI- ja PID -säätö AS-74.230 Automaatio- ja säätötekniikan laboriotyöt. Teknillinen Korkeakoulu. Systeemitekniikan laboratorio. Saatavissa:

<http://www.control.hut.fi/Kurssit/AS-0.2230/tyo11/Ohje.pdf>. Hakupäivä 8.12.2010.

Harju, Timo – Marttinen, Arto 2000. Säätopiirin virityksen perusteet. Espoo: Control CAD Oy.

Inkinen, Pentti – Manninen, Reijo – Tuohi, Jukka 2006. Momentti 2, insinöörifysiikka. 2. painos. Helsinki: Otava.

Maiocchi, Giuseppe 2003. Application Note AN281, Driving DC Motors. ST-Microelectronics. Saatavissa:

<https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bk60a0001/lisatty/sahkokaytot.pdf>. Hakupäivä 21.3.2011.

Peltonen, Hannu – Perkkiö, Juha – Vierinen, Kari 2000. Insinöörin (AMK) Fysiikka osa II. 4. painos. Jyväskylä: Lahden Teho-Opetus Oy.

PWM. 2009. Saatavissa: [http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width\\_modulation](http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation). Hakupäivä 21.3.2011.

Sähkökäytöt 2007. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Konetekniikan osasto, Mekatroniikan ja virtuaalisuunnittelun laboratorio, Ko4210000 Mekatroniikan peruskurssi, Kevät 2007. Saatavissa:

<https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bk60a0001/lisatty/sahkokaytot.pdf>.

Hakupäivä 7.12.2010.