

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU

Juha Petteri Koski

HARJATTOMAN DC-MOOTTORIN OHJAUS

Tekniikka ja liikenne
2010

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
Elektroniikan ja tietotekniikan koulutusohjelma

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Juha Koski
Opinnäytetyön nimi	Harjattoman DC-moottorin ohjaus
Vuosi	2010
Kieli	suomi
Sivumäärä	33
Ohjaaja	Jukka Matila

Tämä opinnäytetyö on tehty Vaasan ammattikorkeakoulun, tekniikan ja liikenteen yksikön, tietotekniikan koulutusohjelman opinnäytetyöksi. Työn tarkoitus oli tutkia harjattoman tasavirtamoottorin toimintaperiaatteita sekä kehittää cd-asemissa käytettävän harjattoman tasavirtamoottorin ohjaus.

Tavoitteena on verrata harjallisten ja harjattomien tasavirtamoottoreiden ominaisuuksia sekä tutkia harjattoman tasavirtamoottorin ohjaus. Ohjauksesta tavoitteena on tutkia harjattoman tasavirtamoottorin anturillinen ja anturiton ohjaus sekä tärkeimpiä säätötekniisiä ratkaisuja. Lisäksi tavoitteena on esittää harjattoman tasavirtamoottorin ohjauselektroniikka ja kommutointi. Päättävänä on kehittää harjattoman tasavirtamoottorin ohjaus.

Aluksi täytyi tutkia harjattoman tasavirtamoottorin toimintaperiaate sekä Hallanturien toiminta. Anturillisen ja anturittoman ohjausmenetelmien sekä säätötekniisten ratkaisujen tutkimisen jälkeen voitiin suunnitella elektroniikka. Kun ohjauselektroniikka toimi, voitiin aloittaa ohjelmiston suunnittelu AVR-Studio-editoria ja STK500-kehitysalustaa käyttäen.

Lopputuloksena saatiin tutkittua tärkeimpiä harjattoman tasavirtamoottorin ohjaamisen teorioita ja prototyypin ohjauselektroniikasta. Lisäksi saatiin testattua moottorin ajo tasaisella nopeudella.

Asiasanat harjattoman DC-moottorin ohjaus

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Elektroniikan ja tietotekniikan koulutusohjelma

ABSTRACT

Author	Juha Koski
Title	Brushless DC-Motor Control
Year	2010
Language	Finnish
Pages	33
Name of Supervisor	Jukka Matila

The aim of the thesis was to explore the operational principles of the brushless direct current motor and to develop the brushless direct current motor controller.

The main purpose was to compare the features of normal direct current motors and brushless direct current motors, as well as to examine and the brushless direct current motor control. The motor control contains the sensed and sensorless closed loop control and motor adjustment solutions. Another aim was to develop brushless direct current motor control electronics, and to present commutation. The key objective was to develop a brushless direct current motor control.

At first, operational principles of the brushless direct current motor, and Hall-sensor were explored. When sensed and sensorless motor control principles, in addition to adjustment were examined, the electronics of the motor control could be designed. After the motor control electronics were completed, the motor control software design was undertaken, by using AVR-Studio editor and STK500 development kit.

The result was a fully functioning prototype of brushless direct current motor control electronics, and the research of the main topics in motor control theories. The motor was also test driven under constant speed.

Keywords Brushless DC-motor control

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
1 JOHDANTO	6
1.1 Työn tausta	6
1.2 Työn kuvaus	6
2 HARJATON TASAVIRTAMOOTTORI.....	7
2.1 Harjaton tasavirtamoottori sovelluksissa	7
2.1.1 Harjaton tasavirtamoottori sovelluksissa-yhteenveto	7
2.1.2 Harjallinen tasavirtamoottori	8
2.1.3 Harjaton tasavirtamoottori	8
2.3 Harjattoman tasavirtamoottorin rakenne ja toiminta.....	9
2.3.1 Hall-anturi.....	9
2.3.2 Staattori.....	10
2.3.3 Roottori	11
2.4 Harjattoman tasavirtamoottorin ohjaus	12
2.4.1 Harjattoman tasavirtamoottorin anturiton ohjaus	12
2.4.2 Harjattoman tasavirtamoottorin ohjaus suoralla takaisinkytkennällä. 13	
2.4.3 Harjattoman tasavirtamoottorin säätö.....	14
2.4.4 PID.....	14
2.4.5 Sumea säätö	15
3 KANAVATRANSISTORI	17
3.1 Yleistä kanavatransistoreista.....	17
3.2 Valitun kanavatransistorin ominaisuuksia	17
3.2.1 IRL520N:n tärkeimmät ominaisuudet	18
3.2.2 Päästötilan resistanssi	19
3.2.3 Hilan kapasitanssi ja varaus	19
4 MIKRO-OHJAIN.....	20
5 ELEKTRONIIKAN SUNNITTELU	21
5.1 Kytkinmatriisi	21

	5
5.2 Piirikaavio	21
6 KOMMUTOINTI.....	23
7 OHJELMISTON SUNNITTELU	26
7.1 Ohjelmiston suunnittelun vaiheet.....	26
7.2 Tehtävän määrittely.....	26
7.3 Algoritmi	26
7.4 Ohjelmointiympäristö ja ohjelmiston kehittäminen.....	28
8 TESTAUS	29
9 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	31
LÄHDELUETTELO.....	32

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Opinnäytetyö on tarkoitettu Vaasan ammattikorkeakoulun, tekniikan ja liikenteen yksikön, tietotekniikan koulutusohjelman opinnäytetyöksi. Työn aiheen on antanut Vaasan ammattikorkeakoulun lehtori Jukka Matila.

1.2 Työn kuvaus

Työn aihe on kehittää harjattoman tasavirtamoottorin ohjaus. Opinnäytetyössä käsitellään harjattoman tasavirtamoottorin toimintaperiaatteiden teoriaa sekä kyseisen moottorin ohjausta, johon kuuluu moottorin kiihdytys ja tasainen ajo. Harjattomien DC-moottoreiden ohjaus on toimintaperiaatteiltaan kaiken kokoisissa ja kaiken tyyppisissä moottoreissa lähes samanlainen, joten tässä opinnäytetyössä esitettävät teoriat soveltuvat myös muiden harjattomien DC-moottoreiden teorioiksi.

2 HARJATON TASAVIRTAMOOTTORI

2.1 Harjaton tasavirtamoottori sovelluksissa

Nykyään harjattomia tasavirtamoottoreita on käytössä kaikilla tekniikan alueilla. Harjattomia tasavirtamoottoreita käytetään kodinkoneissa, teollisuudessa, koneiden automaatioissa, cd-asemissa, kovalevyissä, tuulettimissa ja monissa muissa sovelluksissa. BLDC-moottorien käyttö voidaan jakaa karkeasti kolmeen erilaiseen tapaan. Ensiksikin moottorin pyörintänopeutta ei ohjata dynaamisesti, vaan käynnistetään moottori, pyöritetään sitä määrättyllä nopeudella ja sen jälkeen sammutetaan moottori. Tämän tyyppistä moottorin käyttöä tarvitaan esimerkiksi tuulettimissa ja pumpuissa. Nämä laitteet on yleensä kytketty suoraan moottorin akseliin. Moottorin pyörintänopeutta voidaan vaihdella myös dynaamisesti. Kyseiset sovellukset vaativat tarkkaa ja nopeaa moottorin ohjausta, joissa nopeutta voidaan muuttaa laitteen vaatimalla tavalla jatkuvasti. Esimerkiksi pesukoneita, polttoainepumppuja, robottien toimintoja ja cd-asemia ohjataan tällä tavalla. Dynaaminen nopeuden muuttaminen monimutkaistaa moottorin ohjausta ohjelmoinnin kannalta huomattavasti, koska moottorin ohjaukseen tarvitaan monimutkaisempia algoritmeja. Kolmas tapa on ohjata moottoria dynaamisesti. Monet teollisuus- ja automaatio-sovellukset kuuluvat tähän ryhmään. Moottoria ajetaan niin, että ensin kiihdytetään, jonka jälkeen ajetaan tasaisella nopeudella, jarrutetaan ja pysäytetään moottori tarkasti määrättyyn asentoon, jolloin käytettävä laite on esimerkiksi sopivassa asennossa tai paikassa. Tämän tyyppisissä moottorin käyttökohteissa moottoria ohjataan laitteelta saatujen tietojen perusteella. Laitteen toimintoja voidaan tarkkailla antureilla, jotka tutkivat esimerkiksi pyörintänopeutta, lämpötilaa tai virtauksia. Sovellusta monimutkaistaa mahdollinen kuorman vaihtelu ajon aikana, joten moottoria voidaan ohjata kolmen silmukan ratkaisulla: vääntömomentin ohjaus-, nopeuden ohjaus- ja paikkatieto-ohjaus-silmukoilla. /5/

2.1.1 Harjaton tasavirtamoottori sovelluksissa-yhteenveto

Harjattomat tasavirtamoottorit soveltuvat moniin sovelluksiin, koska niillä on hyvät nopeus- ja vääntömomenttiominaisuudet. Lisäksi harjattomilla

tasavirtamoottoreilla on hyvä moottorin dynaamisen ohjauksen vaste, pitkä käyttöikä ja lähes äänetön, korkea pyörimisnopeus. Moottorit ovat kokoonsa nähden tehokkaita. Ominaisuuksiensa puolesta harjattomia tasavirtamoottoreita käytetään ja tullaan jatkossakin käyttämään monilla tekniikan alueilla ja monen tyyppisissä sovelluksissa. /5/

2.1.2 Harjallinen tasavirtamoottori

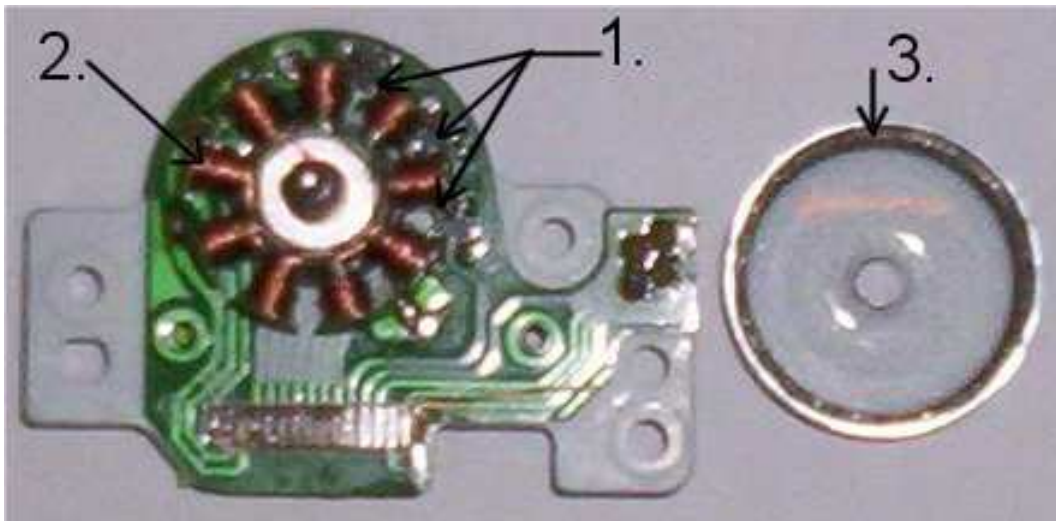
Harjallisen DC-moottorin haittana ovat juuri harjat. Harjallisissa moottoreissa kommutointi tehdään harjoilla ja kommutaattorilla. Harjat muodostavat häiriöitä radiotaajuuksilla, minkä takia ne voivat häiritä muita laitteita. Lisäksi harjojen liukuminen kommutaattoria vasten voi aiheuttaa joissain sovelluksissa häiritsevää ääntä. Halvimpien harjallisten moottoreiden harjat kuluvat nopeasti, jolloin ne pitää vaihtaa. Heikkolaatuisen moottorin harjat täytyy vaihtaa jopa 1000 tunnin välein, joten huoltokustannukset nousevat. Harjalliset moottorit tuottavat enemmän lämpöä kuin harjattomat moottorit, joten jäähdytyksestä täytyy huolehtia, koska lämmöntuoton ansiosta saattaa roottori pahimmassa tapauksessa jumiutua kiinni. Jos moottorinohjaukseen on tarvetta lisätä elektroniikkaa, kannattaa harjallisen moottorin sijaan käyttää harjatonta moottoria, koska harjattomalla moottorilla on parempi suorituskyky ja sitä voidaan ohjata tarkemmin.

2.1.3 Harjaton tasavirtamoottori

Harjattomassa DC-moottorissa edellä mainittuja ongelmia ei ole. Harjattomalla DC-moottorillakin on ongelmansa. Sitä ei voi ohjata suoraan tasasähköllä, joten elektroniikan tarve kasvaa. Kommutoinnin vaiheistaminen suoritetaan elektroniikan avulla ja roottorin asento tutkitaan, esimerkiksi Hall-antureilla. Hall-antureita käytetään harjattomassa tasavirtamoottorin ohjauksessa moottorin takaisinkytkentään. Takaisinkytkentä voidaan tehdä myös anturittomasti siten, että tarkkaillaan vaihetta, joka on nolatilassa. Johtamattomassa tilassa olevaan vaiheeseen indusoituu jännite roottorin liikkuessa. Indusoitunutta jännitettä tarkkailemalla saadaan roottorin asentotieto kommutointia varten. Harjattoman tasavirtamoottorin takaisinkytkemättömään ohjaukseen ei ole vielä kehitetty

luotettavaa tapaa, joten harjattoman tasavirtamoottorin ohjaukseen tarvitaan ainakin toistaiseksi aina takaisinkytkentä. /20/

2.3 Harjattoman tasavirtamoottorin rakenne ja toiminta

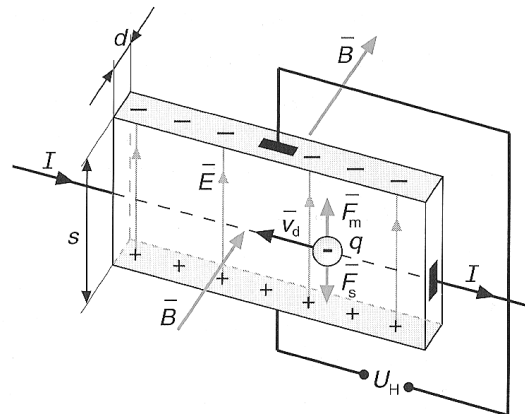


Kuva 1. cd-aseman BLDC-moottori.

Harjattoman DC-moottorin rakenne: kuvassa 1. on eräs cd-asemissa käytetty harjaton DC-moottori. Kuvaan on numeroitu moottorin osat. 1. nuolet osoittavat Hall-antureita, joita kyseisessä sovelluksessa on kolme kappaletta. 2. nuoli osoittaa staattoria, jossa näkyy käämintä. 3. nuoli osoittaa roottorin kehää, jossa on kestmagneetit.

2.3.1 Hall-anturi

Hall efektin löysi Edwin Hall vuonna 1879. Hall-efekti viittaa jännitteeseen, joka kulkee johtavan materiaalin, esimerkiksi piin (Si) yli. Hall-efekti tapahtuu kun magneettikenttä vaikuttaa johtimessa kulkevaan virtaan. Magneettikentän aikaansaamaa poikittaista voimaa kutsutaan *Lorentzin* voimaksi. /18/ Hall-anturi vaatii magneettikentän toimiakseen. Harjattoman DC-moottorin ohjauksessa Hall-anturilla tarkastellaan roottorin paikkatieto, eli sillä saadaan selville missä asennossa roottori on. Tieto roottorin asennosta on tärkeä, koska sen avulla voidaan suorittaa kommutointi. /11/



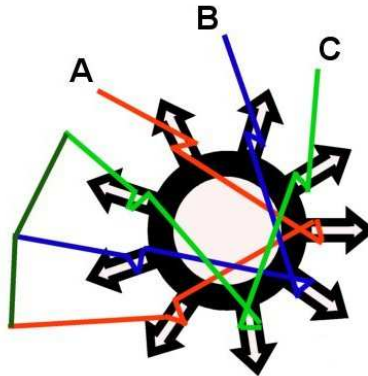
Kuva 2. Hall-ilmiö/9/

Kuvassa 2 on litteä metalliliuska, jonka avulla voidaan todeta Hall-ilmiö. Liuska on tasaisessa magneettikentässä siten, että magneettivuontiheys B on kohtisuorassa liuskan tasoa vastaan. Magneettinen voima $F_m = qv_d B$ vaikuttaa vaellusnopeudella v_d liikkuvaan varaukseen $-q$. Kun magneettinen voima vaikuttaa varaukseen, metalliliuskan yläreuna varautuu negatiivisesti ja alareunaan jää positiivinen varaus. Varaukset aiheuttavat liuskassa ylöspäin suuntautuvan sähkökentän. Sähkökentässä negatiiviseen varaukseen vaikuttavan voiman $F_s = qE$ suunta on alaspäin. Positiivisten ja negatiivisten varausten kertyessä reunoille sähkökenttä kasvaa. Kun sähkökenttä on kasvanut riittävän suureksi, sen voima tasapainottaa magneettisen voiman, joten sähkökentän voima $E = v_d B$. Sähkökentässä reunojen välillä on potentiaaliero. Tätä eroa kutsutaan Hall-jännitteeksi U_h . Hall-jännitteen suuruus on $U_h = v_d B s$ tai $U_h = (IB) / (nqd)$. Metalleissa Hall-jännite jää tyypillisesti 1 uV:n alle. Puolijohteissa Hall-jännite on suurempi. /9/

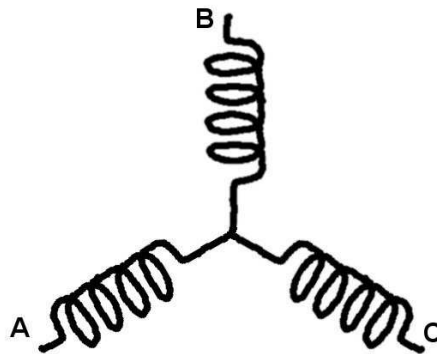
2.3.2 Staattori

Yleensä CD-asemissa käytetään yhdeksännäppäisiä staattoreita. Staattorin rautasydän on kasattu rautalevyistä, joita on ladottu päällekkäin, ja levyjen väleihin on laitettu eriste. CD-asemissa käytetyn moottorin staattorin paksuus vaihtelee neljän ja viiden millimetrin välillä. Staattorin paksuus vaikuttaa moottorin voimaan siten, että mitä paksumpi staattori on, sitä voimakkaampi moottori on, mutta CD-levyn pyörittämiseen riittää 4-5 mm paksuus. /7/ Tässä

työssä moottorin staattorissa on yhdeksän napaa ja staattori on käämitty tähtikuvioon. Kuvissa 3. ja 4. on esitetty harjattoman tasavirtamoottorin staattorin käämintä.



Kuva 3. Staattorin käämintä (tähtikuvio).



Kuva 4. Staattorin kytkentä (tähtikuvio).

2.3.3 Roottori

Moottorin pyörivä osa on roottori. Harjattoman DC-moottorin roottorissa on parillinen määrä kestopagneetteja. Kestopagneettien määrä vaikuttaa roottorin askelten pituuteen ja vääntömomenttiin. Jos kestopagneetteja on paljon, roottorin askeleet ovat lyhyempiä ja vääntömomentti on pienempi. Tutkitussa moottorin roottorissa on kaksitoista kestopagneetta. Kun staattorin käämien virta tahdistetaan, pyörivä magneettivuo sekä vetää puoleensa kestopagneetteja, että hylkii niitä. Tämä johtuu siitä, että kestopagneeteissa on etelä- ja pohjoisnavat. Kommutoimalla, eli muuttamalla magneettikentän polariteettiä (etelä ja

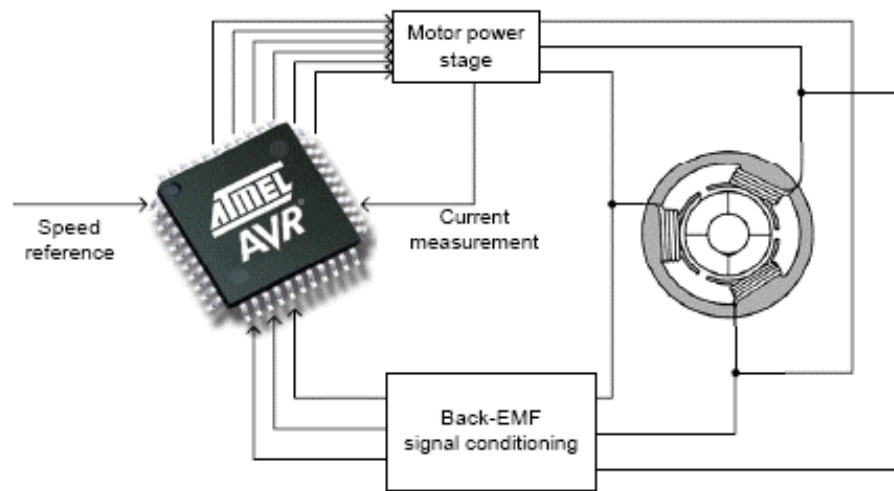
pohjoinen) staattorin käämeissä oikealla tavalla tahdistettuna, roottori pyörii. /2/

2.4 Harjattoman tasavirtamoottorin ohjaus

Harjatonta tasavirtamoottoria voidaan ohjata kun tiedetään roottorin asentotieto. Suorassa kytkennässä asentotieto voidaan lukea esimerkiksi optisilla antureilla tai Hall-antureilla. Harjatonta tasavirtamoottoria voi ohjata myös ilman antureita, jolloin takaisinkytkentä kommutointia varten suoritetaan tarkkailemalla johtamattomassa tilassa olevaa vaihetta. Harjattoman tasavirtamoottorin säätö vaatii myös moottorin pyörintänopeuden tarkkailua. Kun pyörintänopeus tiedetään, voidaan mahdollisen muutoksen tapahtuessa suorittaa korjaava säätö.

2.4.1 Harjattoman tasavirtamoottorin anturiton ohjaus

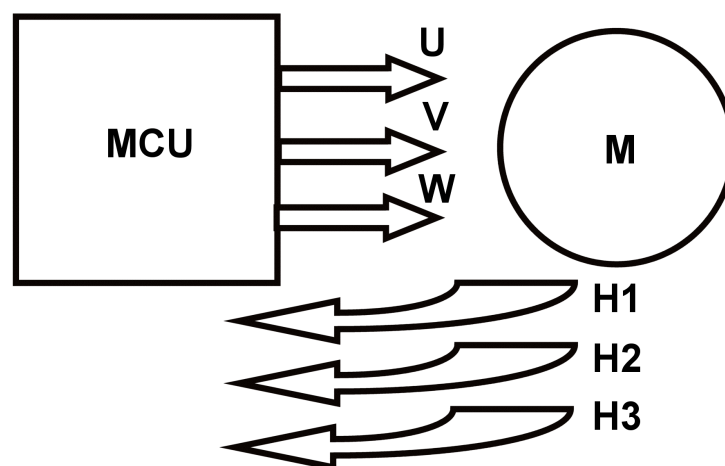
Jokaisella roottorin askeleella yksi vaihe ei ole johtavassa tilassa ja tällöin siihen indusoituu jännite roottorin liikuessa. Tarkkailemalla vaihetta, joka ei ole johtavassa tilassa, saadaan elektroniikalle takaisinkytkentä. Takaisinkytkennän perusteella voidaan suorittaa kommutointi. Ideaalisessa tilanteessa indusoitunut jännite kohtaa johtavien vaiheiden jännite-eron keskikohdan jakson puolivälissä, eli nollakohdassa. Nollakohdassa johtamattoman vaiheen indusoitunut jännite ylittää nollatason. Koska yksi askel on 60 astetta, kommutoinnissa nollatason ylitykseen kuluva aika on 30 astetta eli kahdestoistaosa koko kierroksesta. Harjattoman tasavirtamoottorin anturittomassa ohjauksessa moottorin pyörintänopeutta ohjataan pulssinleveysmodulaatiolla ja tarkkaillaan johtamattomaan vaiheeseen indusoitunutta jännitettä, minkä perusteella suoritetaan kommutointi. Kuvassa 5. on esitetty harjattoman tasavirtamoottorin anturiton takaisinkytkentä. /8/



Kuva 5. Anturiton takaisinkytkentä. /3/

2.4.2 Harjattoman tasavirtamoottorin ohjaus suoralla takaisinkytkennällä

Harjattoman tasavirtamoottorin ohjaukseen tarvitaan ohjauselektronikka, jolla tahdistetaan roottorin askeleet. Tutkitussa moottorissa roottorin asentotieto luetaan Hall-antureilta, joita on kolme (H1, H2, H3). Moottorille meneviä signaaleja, joita on myös kolme (U, V, W) ohjataan MOSFET kanavatransistoreilla, jotka toimivat kytkiminä. Hall-antureilla luetun roottorin asentotiedon perusteella tahdistetaan kytkimille menevät signaalit. Kytkimiä on kuusi ja kerrallaan niistä on johtavassa tilassa aina kaksi. Roottorin yhtä pyörähdystä kohden tehdään kuusi askelta. /4/



Kuva 6. Harjattoman tasavirtamoottorin ohjaussignaalit (suora takaisinkytkentä).

2.4.3 Harjattoman tasavirtamoottorin säätö

Periaatteellisessa tilanteessa moottoria voitaisiin ohjata ohjelmoimalla käynnistyminen, kiihdytys ja tasainen ajo, mutta todellisessa tilanteessa tämän tyylinen ratkaisu ei toimi. Ohjaukseen tarvitaan säätötekniisiä ratkaisuja. Jos moottoriin vaikuttaa muuttuvia, moottorin pyörintänopeuteen vaikuttavia voimia, täytyy moottorin vääntömomenttia säätää, ettei nopeus muuttuisi. Tästä johtuen moottorin ohjaukseen tarvitaan takaisinkytkentä, joka on joko anturillinen tai anturiton. Lisäksi moottorin ohjaukseen tarvitaan säätömenetelmä. Takaisinkytkennän ja säätömenetelmien avulla voidaan moottorin nopeus pitää haluttuna. Harjattomassa tasavirtamoottorissa voidaan säätää pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia. Vääntömomenttia muuttamalla voidaan moottorin pyörimisnopeus pitää vakiona vaikka moottorin kuorma muuttuisi. Harjattoman tasavirtamoottorin pyörimisnopeutta säädetään jännitteen avulla ja vääntömomenttia säädetään virran avulla. Harjattoman tasavirtamoottorin säätöön on olemassa monia menetelmiä, esimerkiksi PID- ja sumea säätö.

2.4.4 PID

PID-säädön lausekkeessa on kolme osaa Proportional, Integral ja Derivative. Ajettaessa moottoria tietyllä vakionopeudella, moottorille aiheutuva kuorman muutos muuttaa nopeutta, jolloin se ei ole enää haluttu nopeus. Tästä seuraa tilanne, jossa tarvitaan säätötekniisiä ratkaisuja, jotta saadaan moottori taas pyörimään halutulla vakionopeudella. PID-säädön P-osa yrittää korjata muutoksen mahdollisimman nopeasti, että pyörintänopeus saataisiin taas normaaliksi. Ainoastaan P-osa ei riitä säätötekniikaksi, koska sen korjausteho on suoraan verrannollinen pyörinnän virheeseen. Ongelmaksi muodostuu se, että kun moottorille lisätään kuormaa ja pyörintänopeus hidastuu, tehoa lisätään nopeuden palauttamiseksi. Kun nopeus on palautunut vakioksi, mutta kuormaa on edelleen eri määrä kuin vakiotilanteessa, joudutaan taas korjaamaan lisäämällä tehoa. Tästä aiheutuu moottorin epätasainen käynti, eli moottorin nopeus säätyy jatkuvasti. Lisäämällä säätöön I-osa saadaan moottorin ohjaukseen korjaus, joka lisää tai

vähentää moottorin ohjaukseen menevää tehoa jatkuvasti vähän, kunnes haluttu nopeus on saavutettu ja muutosta ei enää tarvita. Säädon I-osa on nopeuden virheen integraali.

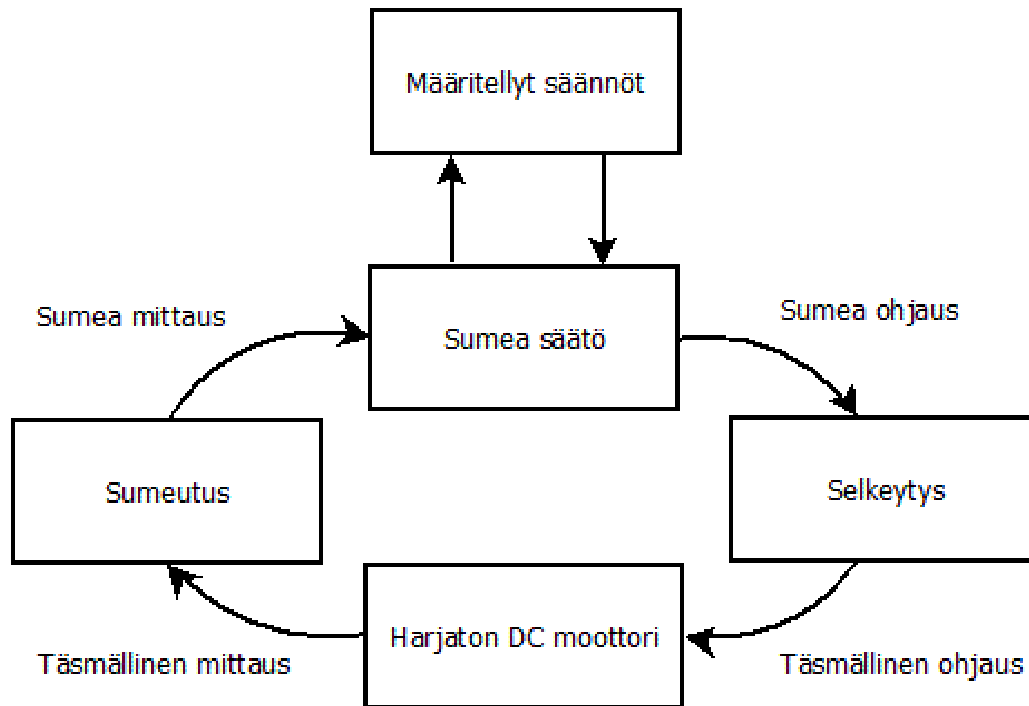
Säädon PI osat toimivat yhdessä siten, että P-osa pyrkii korjaamaan pyörintänopeuden virheen mahdollisimman nopeasti. I-osa taas toimii hitaammin ja estää mahdollisen moottorin epätasaisen käynnin, eli jatkuvan värähtelyn. Säädon saa entistä tarkemmaksi, kun käytetään vielä lisäksi säädon D-osaa. Säädon D-osalla tarkastellaan pyörimisnopeuden muutoksen nopeutta ja korjataan haluttua nopeutta kohti, kunnes se on saavutettu. Esimerkiksi jos pyörimisnopeus hidastuu äkillisesti, säädon D-osalla kasvatetaan moottorin ohjaustehoa kunnes nopeuden hidastuminen pysähtyy. Säädon D-osalla voidaan säätää moottorin ajon tasaisuutta nopeissa, lyhytaikaisissa muutoksissa moottorin pyörimisnopeudessa. Yhdessä säädon osat muodostavat PID säädon. Usein moottorin pyörintänopeuden säätämisessä käytetään pelkästään säädon P- ja I-osia. /14/

2.4.5 Sumea säätö

Yksinkertaistettuna sumea logiikka tarkoittaa sitä, että jos jokin menee vähän pieleen, korjataan vähän ja jos jokin menee paljon pieleen, korjataan paljon. Sumean säädon muodostaminen voidaan jakaa neljään osaan. Ensimmäisenä esitetään mittaustulos ja sen perusteella tieto. Esimerkiksi jos x on A, niin y on B. Moottorinohjauksessa tämä tarkoittaa, että jos moottorin pyörimisnopeudesta saadaan mittaustulos x ja se on arvoltaan A, niin ulostuloon ohjaussignaaliksi muodostetaan y , joka on arvoltaan B. Seuraavaksi määrätään jäsenyysfunktiot ehdoille ja seurauksille. Ehto- ja seurauksosot eivät ole täsmällisiä arvoja, vaan sumeita muuttujia, joten ne esitetään sumeiden joukkojen avulla. Sumeat joukot ilmaistaan lingvistisillä säännöillä. Yksinkertaistettuna moottorinohjauksessa lingvistisiä arvoja voisivat olla esimerkiksi hidas, sopiva ja nopea. Kolmanneksi sijoitetaan lingvistiset produktiosäännöt. Annetaan lingvistisille muuttujille symbolit H, S ja N, jotka edustavat hidasta, sopivaa ja nopeaa. Tällöin produktiosäännöt voidaan ilmaista esimerkiksi: jos $x_1 = H$, ja $x_2 = S$, niin y on N, tai jos $x_1 = S$, ja $x_2 = N$, niin y on S. Viimeisessä vaiheessa suoritetaan sumea päättely. Kun säännöt on määritelty, ulostulolle annetaan säätöosan määrittämä

arvo, joka perustuu muuttujien syöttöehtoihin. Koska harjattoman tasavirtamoottorin kuorma saattaa vaihdella jatkuvasti, sumean säädön neljää askelta suoritetaan toistuvasti. Kuvassa 7. on esitetty sumea säätö vuokaaviona.

/15/



Kuva 7. Sumea säätö. /15/

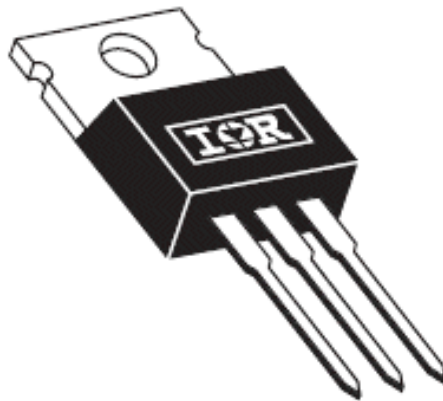
3 KANAVATRANSISTORI

3.1 Yleistä kanavatransistoreista

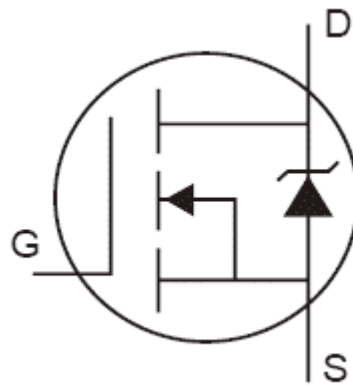
Kanavatransistori (FET, Field Effect Transistor) on jännitteellä ohjattava puolijohdekomponentti. Kanavatransistorissa virta kulkee lähteen (S, Source) ja nielun (D, Drain) välisessä puolijohdekanavassa. Puolijohdekanavan virtaa ohjataan hilaan (G, Gate) tuotavalla jännitteellä. /12/ Kanavatransistori ei kuluta ohjausvirtaa juuri lainkaa. /9/

3.2 Valitun kanavatransistorin ominaisuuksia

Kanavatransistorin valintaan vaikuttavat kotelon ominaisuudet, jännitekestoisuus, päästötilan resistanssi sekä hilan kapasitanssi. /8/ Ohjain valittiin prototyyppiin kanavatransistoriksi IRL520N HEXFET POWER MOSFET-mallisen kanavatransistorin. Kyseisellä kanavatransistorilla voidaan ohjata myös isompia moottoreita, koska se kestää maksimissaan 100 voltin jännitteen ja 10 ampeerin virran. /10/ Jatkokehitystä ajatellen IRL520N kanavatransistorit voi helposti korvata toisilla kanavatransistoreilla. Esimerkiksi SO-8-koteloidut kanavatransistorit sopisivat hyvin pieniin sulautettuihin järjestelmiin, koska SO-8-kotelo on pieni pintaliitoskomponentti. SO-8-kotelo vie vain vähän piirilevytilaa. /6/ Harjattoman DC-moottorin ohjaamiseen tarvitaan kuusi kanavatransistoria, jotka muodostavat kytkinmatriisin. /8/



Kuva 8. IRL520N TO-220 kotelo. /10/



Kuva 9. IRL520N piirrosmerkki. /10/

3.2.1 IRL520N:n tärkeimmät ominaisuudet

Kanavatransistoria valittaessa on kiinnitettävä huomiota kotelon ominaisuuksien lisäksi jännitekestoisuuteen, päästötilan resistanssiin sekä hilan kapasitanssiin. /8/ IRL520N-mallinen komponentti on N-kanavainen kanavatransistori. IRL520N jännitekestoisuus (V_{ds}) on 100 voltia. Kyseisen kanavatransistorin maksimiohjausjännite on +- 16 voltia. IRL520N:n päästötilan resistanssi on 0,18 ohmia. Suuri päästötilan resistanssi aiheuttaa komponentin lämpenemisen, koska häviöteho on tällöin suuri. Mitä suurempi häviöteho on sitä enemmän komponentti tarvitsee jäähdytystä. Hilan kapasitanssi on 440 pF. Hilan kapasitanssin ollessa pieni, kanavatransistoria voidaan ohjata nopeasti. Jos taas

hilan kapasitanssi on suuri, ohjaaminen on hitaampaa. Hilan varaus on maksimissaan 20 nC. /10/

3.2.2 Päästötilan resistanssi

IRL520N päästötilan resistanssi ($R_{ds(on)}$) on 0,18 ohmia. 25 celsius asteen lämpötilassa maksimivirta $I(d)$ on 10 ampeeria, jos $V(g_s)$ on 10V. /10/ Tällöin kytkinkohtainen tehohäviö voidaan laskea $P(on) = ((I^2 * R) / 9) / 3$ (1). Kaavassa Teho lasketaan $P(on) = I^2 * R$. /16/ Kytkinten rinnankytkentä pudottaa tehohäviön kolmannekseen, joten kytkinkohtainen häviö on yhdeksäsosa. Tämä jaetaan vielä kolmella, koska jokainen vaihe johtaa vuorollaan enintään kolmasosan ajasta. Kytkinkohtainen tehohäviö on: $P(on) = ((10^2 * 0,18) / 9) / 3 = 667 \text{ mW}$. 667mW tehohäviön TO-220 kotelo kestää hyvin. /8/

3.2.3 Hilan kapasitanssi ja varaus

IRL520N:n hilan kapasitanssi (C_{iss}) on 440 pF. Jos hilan kapasitanssi on suuren varaaminen kestää pidemmän aikaa, joten kanavatransistoria ei voida ohjata nopeasti. 440 pF kapasitanssi on riittävän pieni harjattoman tasavirtamoottorin ohjaukseen. Hilan varaus (Q_g) on maksimissaan 20 nC. /10/ Kannan ohjausjännitteen ollessa 12V ja PWM pulssin ollessa 20 kHz, voidaan laskea hilan ohjaukseen kuluva teho kaavalla $P(drive) = V(g_s) * Q_g * f$ (2). $P(drive) = 12V * 20 \text{ nC} * 20 \text{ kHz} = 4,8 \text{ mW}$. Verrattaessa hilan ohjaukseen kuluva teho kytkinkohtaiseen tehohäviöön huomataan, että hilan ohjaukseen kuluva teho on vähäinen. /8/

4 MIKRO-OHJAIN

Mikro-ohjainta sanotaan usein mikrokontrolleriksi (MCU, microcontroller unit), joka juontuu englanninkielisestä sanasta microcontroller. Yleisimmin sovelluksissa on käytetty 8-bittisiä mikro-ohjaimia, mutta nykyään käytetään monimutkaisimmissa sovelluksissa myös 16- ja 32- bittisiä mikro-ohjaimia. Mikro-ohjaimilla on korvattu digitaalisia logiikkapiirejä, ja mikro-ohjaimia käytetäänkin jo suurimmassa osassa elektroniikkaa sisältävistä sovelluksista. Mikro-ohjaimet ovat tulleet suosituiksi, koska ne ovat edullisia logiikkapiireillä toteutettuihin sovelluksiin verrattuna. Logiikat ja muut toiminnot ohjelmoidaan mikro-ohjaimiin esimerkiksi C-kielellä, joten lisätoimintojen tekeminen on kustannustehokasta ja piirilevyt voidaan tehdä pienemmiksi, koska yhdellä mikro-ohjaimella korvataan useita logiikkakomponentteja. Ohjelmistoa voidaan myös päivittää kesken tuotannon. Lisäksi laitteen ohjelmiston voi suojata siten, että sen kopiointi tai tutkiminen on vaikeaa tai jopa mahdotonta. /13/

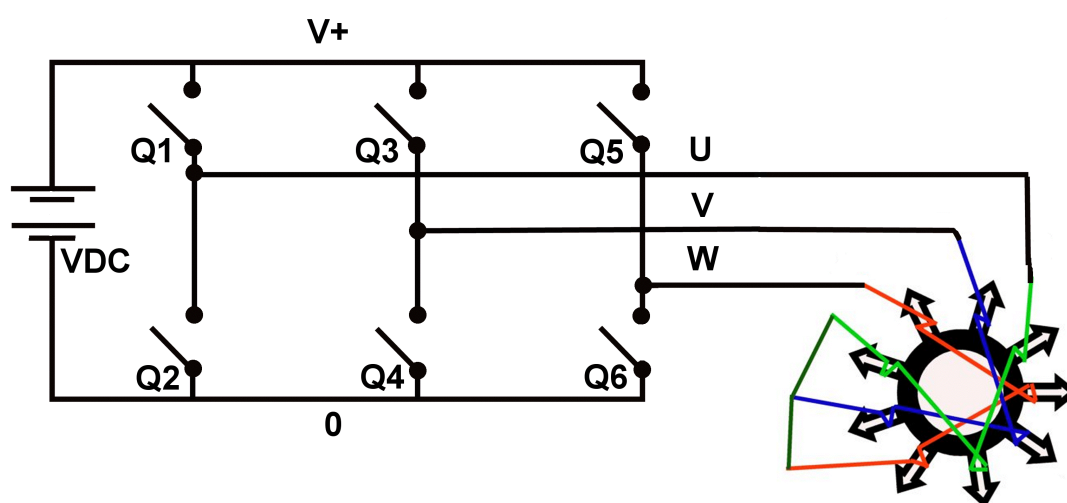


Kuva 10. Atmega8515-mikro-ohjain. /17/

5 ELEKTRONIIKAN SUNNITTELU

5.1 Kytkinmatriisi

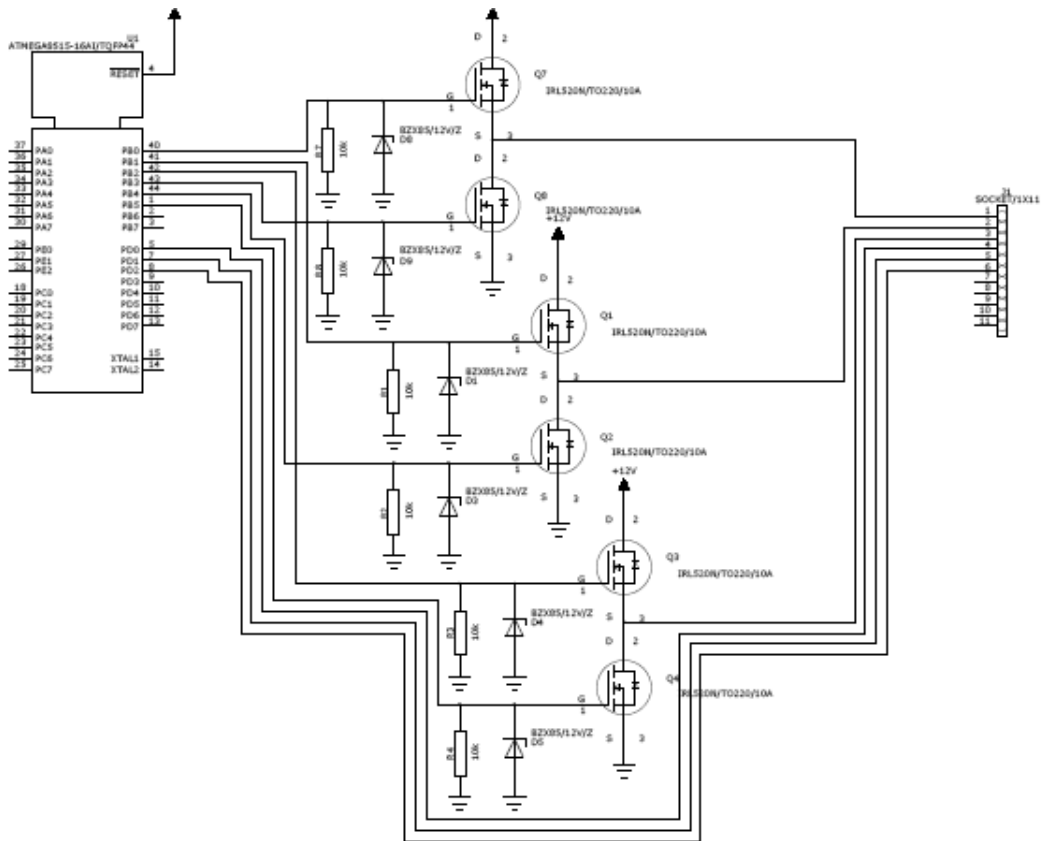
Harjattoman tasavirtamoottorin kommutointiin tarvitaan kytkinmatriisi. Kytkinmatriisina tässä työssä on kuusi kappaletta IRL520N MOSFET kanavatransistoria, joista moottoria ajettaessa johtaa aina kaksi kanavatransistoria vuorollaan, esimerkiksi ensimmäisellä askeleella johtavassa tilassa ovat kytkimet Q1 ja Q4.



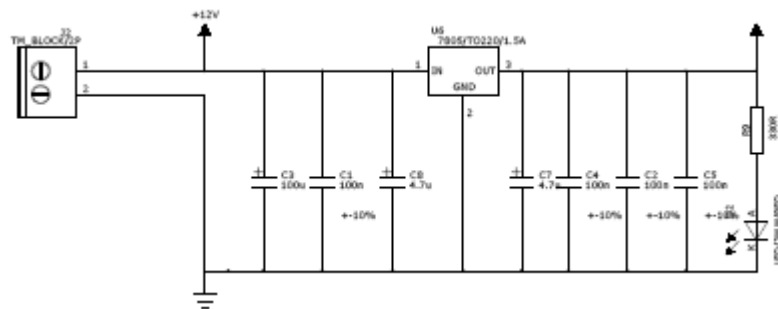
Kuva 11. Kytkinmatriisi liitettyä harjattomaan tasavirtamoottoriin.

5.2 Piirikaavio

Piirikaavio on tehty PowerLogic piirikaavionsuunnitteluohjelmalla. Piirikaaviossa on kuusi kappaletta IRL520N MOSFET kanavatransistoria, joita ohjataan mikrokontrollerin porteilla PB0 – PB5. IRL520N hilalta on kytketty maapotentiaaliin vastus ja diodi. Kanavatransistorin ohjausvirta on pieni, joten ilman vastusta hilalle annettava ohjaussignaali jäisi tilaan 1, jolloin kanavatransistori jäisi johtavaan tilaan. Diodi on myös kytketty maapotentiaaliin estämään mahdollisia häiriösignaaleja nielun ja hilan välillä. Hall-anturit on kytketty portteihin PD0 – PD2. Mikro-ohjaimena on Atmel Atmega 8515. BLDC-moottori kytketään kuvassa 7. olevaan riviliittimeen siten, että moottorin ohjaussignaalit kytketään nastoihin 1-3 ja Hall-anturit nastoihin 4-6.



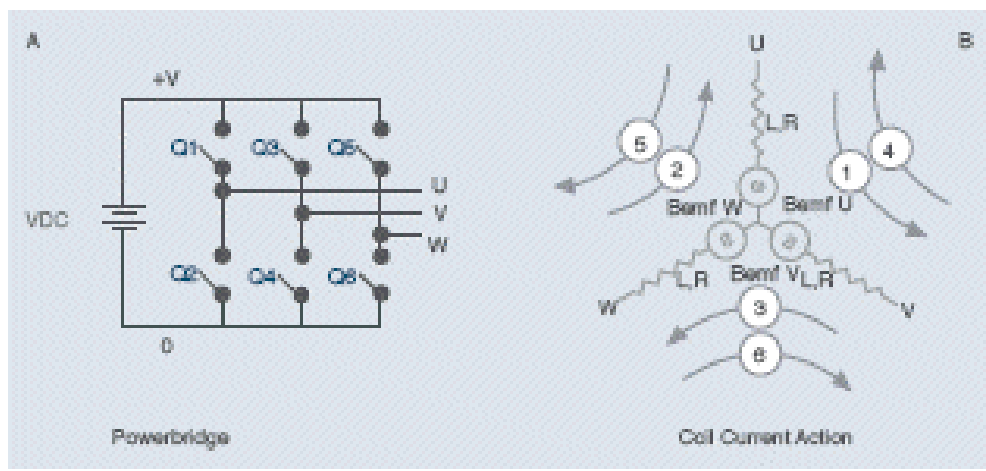
Kuva 12. BLDC moottorin ohjauselektronikan piirikaavio



Kuva 13. Teholähde

6 KOMMUTOINTI

Harjattoman kolmivaiheisen tasasähkömoottorin kuuden kommutoinnin muodostamiseen tarvitaan roottorin asentotieto, joka saadaan luettua kolmelta Hall-anturilta. Yksi moottorin kierros koostuu kuudesta jaksosta. Seuraavissa kuvassa ja taulukoissa on havainnollistettu kytkimien toiminta ja virran kulkusuunta sekä Hall-anturien tieto askelittain. /8/ Kytkimet ja virran kulkusuunnat vaiheittain on esitelty kuvassa 14.



Kuva 14. Kytkinmatriisi ja virran kulkusuunnat. /4/

Taulukko 1. Pyöräminen myötäpäivään. /4/

Hall	Pyöräminen myötäpäivään		
H3-H2-H1	Askel	Moottorin virran kulkusuunta	Aktiiviset kytkimet
1-0-1	1	U-V	Q1 & Q4
0-0-1	2	U-W	Q1 & Q6
0-1-1	3	V-W	Q3 & Q6
0-1-0	4	V-U	Q3 & Q2
1-1-0	5	W-U	Q5 & Q2
1-0-0	6	W-V	Q5 & Q4

Taulukko 2. Pyöräminen vastapäivään. /4/

Hall	Pyöräminen vastapäivään		
H3-H2-H1	Askel	Moottorin virran kulkusuunta	Aktiiviset kytkimet
1-0-1	4	V-U	Q3 & Q4
0-0-1	5	W-U	Q5 & Q2
0-1-1	6	W-V	Q5 & Q4
0-1-0	1	U-V	Q1 & Q4
1-1-0	2	U-W	Q1 & Q6
1-0-0	3	V-W	Q3 & Q6

Roottorin asentotietoa ei ehkä saada siinä vaiheessa kun roottori ei vielä pyöri. Seurauksena asentotiedon puutteesta moottori käynnistetään sopivaksi todetulla hitaalla vakionopeudella. Heti kun roottori pyörähtää, voidaan lukea Hallantureilta roottorin asentotieto ja aloittaa kommutointi sen perusteella. /8/

7 OHJELMISTON SUNNITTELU

7.1 Ohjelmiston suunnittelun vaiheet

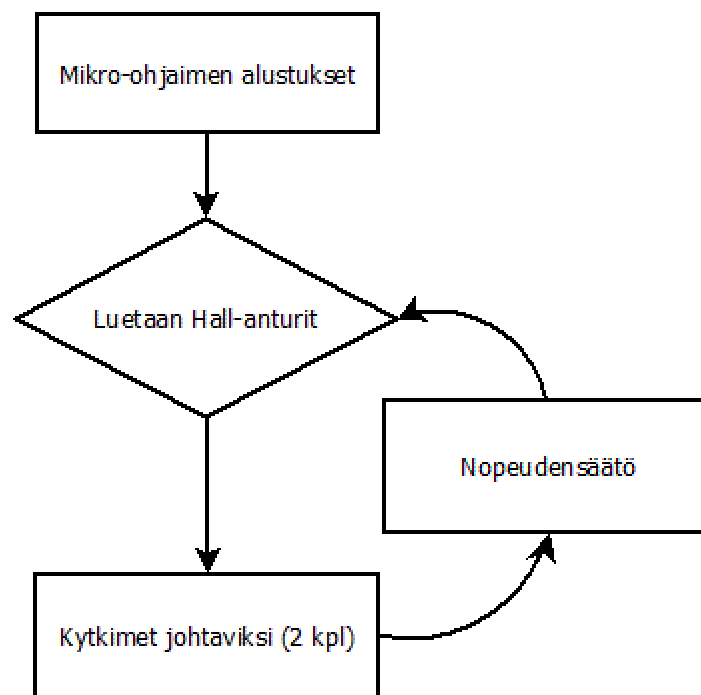
Ohjelmiston huolellinen suunnittelu luo koodin kirjoittamiselle perustan. Kunnollisella suunnittelulla säästetään aikaa. Ohjelmiston suunnittelulla koodista tulee ryhdikästä, toimivaa ja mahdollisimman yksinkertaista. Ohjelman voi suunnitella ”ylhäältä alas”, jolloin hahmotellaan ensin isommat kokonaisuudet, jonka jälkeen se voidaan jakaa pienempiin, helpommin hallittaviin osiin. Sulautetuissa järjestelmissä suunnittelu tehdään joissain tapauksissa toisin päin, eli ”alhaalta ylös”, jolloin suunnitellaan pienemmät kokonaisuudet ensin ja lopuksi kirjoitetaan pääohjelma, jolla ohjataan kokonaisuus.

7.2 Tehtävän määrittely

Tehtävän määrittelyllä pyritään analysoimaan mahdollisimman tarkasti ja selkeästi mitä ohjelman pitäisi tehdä. Sulautetun järjestelmän ohjelmaa suunniteltaessa tehtävän määrittelyssä otetaan huomioon tapauskohtaisesti ainakin seuraavia asioita: millaisiin osiin tehtävät jaetaan, mitä I/O-portteja tarvitaan, tarvitaanko muita jännitteitä käyttöjännitteen lisäksi, I/O-signaalien käyttö (mitä tulevalle tiedolle tehdään ja mitä sillä ohjataan), miten toimitaan ongelmatapauksissa.

7.3 Algoritmi

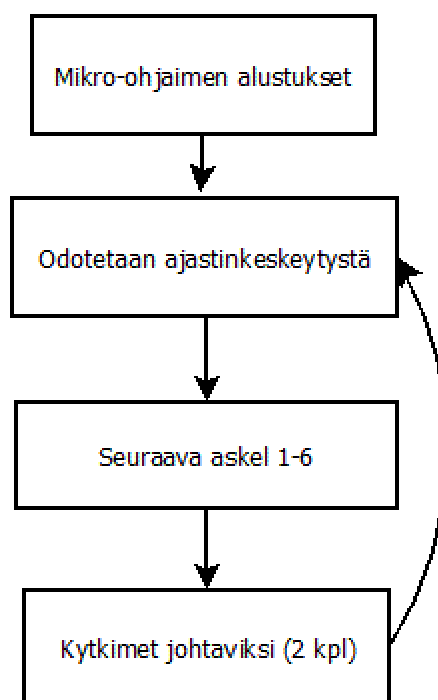
Ongelman ratkaisu kuvataan algoritmilla. Algoritmilla esitetään ongelman ratkaisu askelittain loogisessa järjestyksessä niin, että algoritmin perusteella voidaan kirjoittaa ohjelmisto. Algoritmina käytetään usein vuokaaviota. Vuokaavio voidaan tehdä esimerkiksi siten, että jokainen vuokaavion kuva vastaa ohjelmassa yhtä funktiota. /19/ Seuraavassa vuokaaviossa on esitetty yksinkertainen harjattoman tasavirtamoottorin algoritmi.



Kuva 15. Harjattoman tasavirtamoottorin ohjausalgorithmi.

7.4 Ohjelmointiympäristö ja ohjelmiston kehittäminen

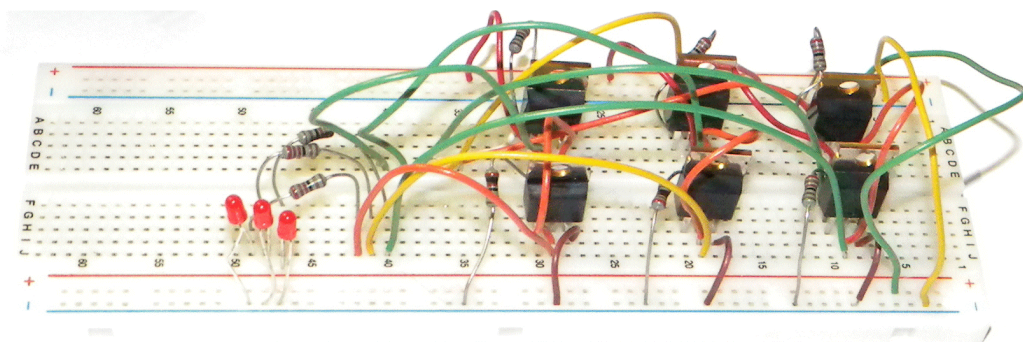
Ohjelmiston kehitysalustana toimivat C-kääntäjä Win-AVR sekä koodieditori AVR-Studio, jolla aluksi simuloitiin mikrokontrollerin porttien toimintaa. Kehitysalustana on STK500, jossa mikro-ohjaimena on Atmega8515. Prototyypin ohjelmisto ohjaa moottoria siten, että kytkimiä ohjataan tasanopeudella ja takaisinkytkentää ei vielä ole. Kytkinten ohjauksen testausvuokaavio on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Kytkinten ohjauksen testausvuokaavio.

8 TESTAUS

Koekytkentälevyyn kytkettiin kolme kappaletta lediä kytkinten testaamista varten. Aluksi testattiin kytkimien toiminnan ledin avulla. Hiloille tuodut jännitteet sytyttivät ledit halutulla tavalla. Ledit simuloivat kolmea moottorille lähtevää ohjauspulssia. Ledit eivät kuulu varsinaiseen kytkentään (kuva 17). Koekytkentälevylle tehty elektroniikan testiversio toimii.



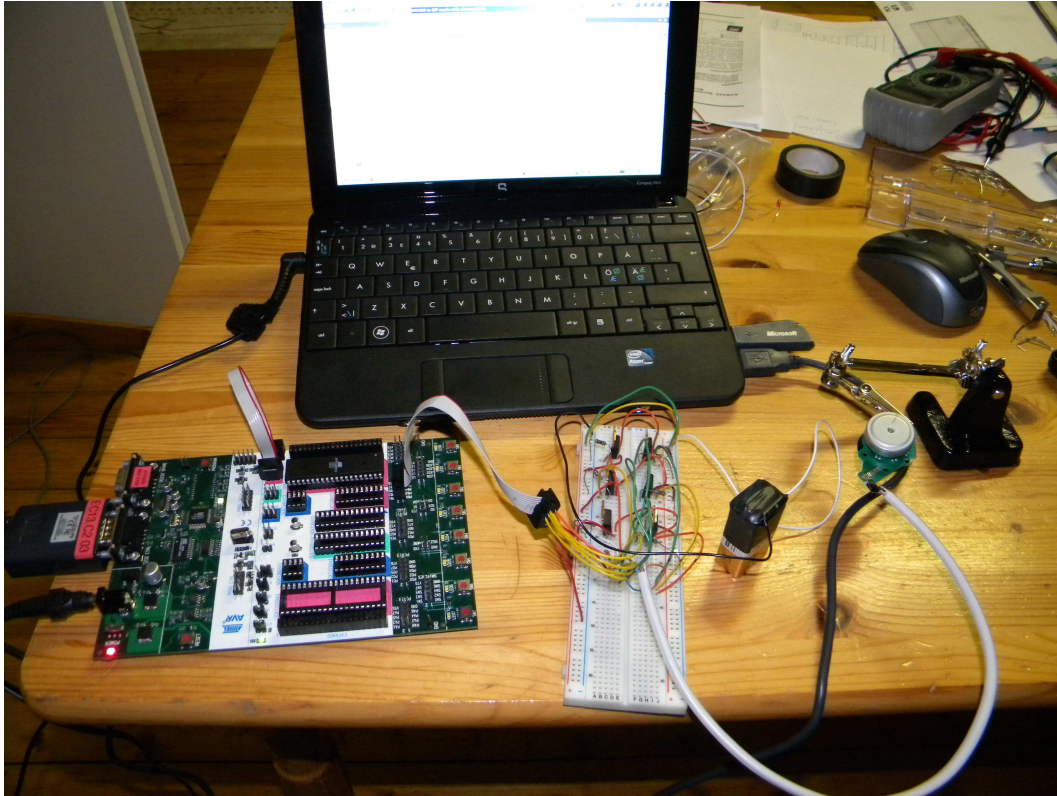
Kuva 17. Koekytkentälevy.



Kuva 18. STK500. /1/

Moottorin ajoa testattiin mikro-ohjaimen avulla. Koodi kirjoitettiin AVR-Studiolla, jonka avulla myös mikro-ohjain ohjelmoitiin. Mikro-ohjain liitettiin STK500 kittiin ja STK500 liitettiin kannettavaan tietokoneeseen RS232 – USB-muuntimen avulla. Testaukseen tarkoitettussa ohjelmassa oli ainoastaan tasanopeudella ajastettu kytkimien ohjaaminen. Kytkimien tilat ajastettiin ajastinkeskeytyksillä. Ajastinkeskeytysten aika ei ollut muuttuva, joten moottori

pyöri ainoastaan tasanopeudella. Ohjaimen testiversio toimi suunnitellusti (kuva 19). Jos ohjainta haluttaisiin ohjata kunnolla, täytyisi mikro-ohjaimella lukea Hall-anturien tiedot, joko kiertokyselyn avulla tai ulkoista keskeytystä käyttäen. Tämän perusteella voitaisiin suorittaa säätö ja kommutointi.



Kuva 19. Testikykentä.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tarkoitus oli kehittää harjattoman tasavirtamoottorin ohjaus. Tutkin harjattoman tasavirtamoottorin ohjaukseen liittyviä teorioita ja yhdistin työhöni niistä mielestäni tärkeimpiä. Tutkittavaa olisi erittäin paljon lisää, koska erityyppisiä ohjausmenetelmiä ja säätömahdollisuuksia on paljon. Työn tekeminen on ollut yllättävän haastavaa juuri siksi, että erilaisia menetelmiä on paljon ja työtä aloittaessani en ollut tutustunut harjattomien tasavirtamoottorien toimintaan lainkaan. Tästä johtuen kaikki aiheeseen liittyvät asiat oli opeteltava työtä tehdessä. Työn tekeminen on ollut opettavaista. Olen oppinut elektroniikasta, ohjelmointiympäristöstä ja harjattoman tasavirtamoottorin toiminnasta sekä ohjausmenetelmistä paljon uusia asioita. Elektroniikka on valmis, mutta ohjelmistoa pitäisi vielä kehittää. Ohjelmistoon voisi kehittää vielä suljetun silmukan ohjauksen sekä säätöteknisiä ratkaisuja.

LÄHDELUETTELO

- /1/ Atmel Products [viitattu 27.5.2010]. Saatavilla www-muodossa:
<URL:http://www.atmel.com/dyn/products/tools_card.asp?tool_id=2735 >
- /2/ AVR194: Brushless DC Motor Control using Atmega32M1 [viitattu 13.5.2010]. Saatavilla www-muodossa:
<URL:http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8138.pdf>
- /3/ AVR444: Sensorless control of 3-phase brushless DC motors [viitattu 15.5.2010]. Saatavilla www-muodossa:
<URL:http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8012.pdf >
- /4/ BLDC Motor Control: Using Atmel AVR Microcontrollers [viitattu 2.5.2010]. Saatavilla www-muodossa:
<URL:http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/a9_automotive-mc.pdf>
- /5/ Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals [viitattu 7.4.2009]. Saatavilla www-muodossa:
<URL:<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>>
- /6/ Choosing The Right Power MOSFET Package [viitattu 10.5.2010]. Saatavilla www-muodossa:
<URL:<http://www.irf.com/technicalinfo/whitepaper/mosfetpackageeeepn0204.pdf>>
- /7/ Electric Motors – part 1 [viitattu 19.4.2009]. Saatavilla www-muodossa:
<URL:<http://www.southernsoaringclub.org.za/> >
- /8/ Harjattomien tasavirtamoottoreiden ohjain lennokkikäyttöön [viitattu 1.11.2009]. Saatavilla www-muodossa:
<URL:<http://lib.tkk.fi/Dipl/2006/urn007532.pdf>>
- /9/ Inkinen Pentti, Manninen Reijo & Tuohi Jukka 2002. Momentti 2

Insinöörifysiikka. 1 p. Kustannusosakeyhtiö Otava. s. 124, 128, 581

/10/ International Rectifier [viitattu 3.5.2010]. Saatavilla www-muodossa:

<URL:<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irl520n.pdf> >

/11/ Introduction to Hurst Brushless DC Motors [viitattu 17.4.2009]. Saatavilla
www-muodossa:

<URL:<http://www.allegromicro.com/en/Products/Design/hurst/bldcmot.pdf> >

/12/ Kanavatransistori [viitattu 19.10.2009]. Saatavilla www-muodossa:

<URL:<http://www.tekniikka.info/articles/10558.htm>>

/13/ Koskinen Jari 1998. Mikrotietokonetekniikka, Sulautetut järjestelmät. 1 p.
Kustannusosakeyhtiö Otava. s. 147, 14

/14/ Matila Jukka. Basic DC Motor Speed Control With The Infeon C167 Family.
Vaasan ammattikorkeakoulu. Tekniikka ja liikenne. Moniste.

/15/ Mattila Jorma K 1998. Sumean logiikan oppikirja. 2 p. Hakapaino Oy. s. 173-
175

/16/ Mäkelä Mikko, Soininen Lauri, Tuomola Seppo & Öistämö Juhani 2002.
Tekniikan kaavasto. 4 p. Tammertekniikka. s. 120

/17/ Octopart [viitattu 7.11.2009]. Saatavilla www-muodossa:

<URL:<http://octopart.com/info/Atmel/ATMEGA8515-16AU>>

/18/ Position and Level Sensing Using Hall Effect Sensing Technology [viitattu
18.4.2009]. Saatavilla www-muodossa:

<URL:<http://www.allegromicro.com/en/Products/Design/an/AN295044.pdf>>

/19/ Vahtera Pentti 2003. Mikro-ohjaimen ohjelmointi C-kielellä. 1 p. WSOY. s.
36-42

/20/ Valentine Richard 1998. Motor Control Electronics Handbook. 1 p. The
McGraw-Hill Companies. s. 7