



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

**Sähköavusteisen polkupyörän vääntömomenttisäädön
toteuttaminen amplitudimodulaatiolla
Designing Torque Controller for a Pedal Electric Bike
Using Amplitude Modulation**

Matti Paakkinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Matti Paakkinen

Sähköavusteisen polkupyörän vääntömomenttisäädön toteuttaminen amplitudimodulaatiolla

2012

Kandidaatintyö.

37 sivua, 23 kuvaa, 1 taulukko ja 2 liitettä

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Lasse Laurila

Sähköavusteinen polkupyörä on hieman tavallista polkupyörää vahvarakenteisempi ja painavampi. Lisäpainoa tuovat muun muassa akut ja sähkömoottori, joka avustaa polkemista. Moottori asennetaan yleensä eturenkaan keskiöön. Suurimmassa osassa, jollei kaikissa, kaupallisista sähköavusteisissa polkupyörissä moottori on hiiliharjaton tasavirtamoottori.

Hiiliharjattoman tasavirtamoottorin pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia voidaan säätää usealla eri tavalla. Markkinoilla olevat säätimet perustuvat poikkeuksesta pulssinleveysmodulaatioon. Tämän työn tarkoituksena on tutkia, onko säätöjärjestelmä mahdollista toteuttaa muulla tavalla kuin pulssinleveysmodulaattorilla. Tutkimuksessa päädytään käyttämään amplitudimodulointia, jolloin taajuus voidaan pitää vakiona. Tämän tutkimuksen rinnalla samaan polkupyörään rakennetaan polkemisenergian avulla akkuja lataava latausjärjestelmä.

Tämän kandityön puitteissa tutkimus jää kesken, mutta toiminta osoitetaan teoreettisesti ja simuloimalla. Suurin syy kokeellisen testauksen epäonnistumiseen on käytettyjen komponenttien sopimattomuus sovellukseen.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree Programme in Electrical Engineering

Matti Paakkinen

Designing Torque Controller for a Pedal Electric Bike Using Amplitude Modulation

2012

Bachelor's Thesis.

37 pages, 23 pictures, 1 table and 2 appendices

Examiner: Associate Professor Lasse Laurila

A pedal electric bike is a bit stronger and heavier than a regular bicycle. The additional weight comes from batteries and an electrical motor that assists pedaling. It is usually placed in the hub of the front wheel. Most if not all of the commercial pedal electric bicycles have a brushless-DC-motor as a motor.

There are various methods of controlling a brushless-DC-motor. All of the commercial controllers are based on pulse width modulation. It is studied in this thesis whether it is possible to use some other method than pulse width modulation in controller. The selected method is an amplitude modulation because in that case the frequency can be kept constant. Along this study there is another study that is related to the bike. The goal of the other study is to design a battery recharging system that uses pedaling energy.

Within this bachelor's thesis the research is not fully completed. The possibility of this method is proven theoretically and with simulations. The main reason why the practical test failed is that the used parts are not suitable for this purpose.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet	5
1. Johdanto	7
2. Ongelman määrittely	8
2.1 Lain määräämät asiat	8
2.2 Säätimelle asetetut vaatimukset	9
3. Sädettävä laitteisto	10
3.1 Moottori	11
3.2 Akusto	11
3.3 Latausjärjestelmä	12
4. Ohjausyksikön suunnittelu	13
4.1 Liikettä vastustavat voimat	13
4.2 Hiiliharjattoman tasavirtakoneen vääntömomenttisäätö	16
4.3 Polkutunnistin	18
4.3.1 Hall-ilmio	19
4.4 Modulointitavan valinta	20
4.4.1 Valmistajan säädin, pulssinleveysmodulaattori	21
4.4.2 Oma säädin, amplitudimodulaatio	21
4.5 Moottorin sammutus	25
4.6 Koko säädin	26
4.7 Komponenttien mitoitus	27
5. Säätimen rakentaminen	28
5.1 Piirilevysuunnittelu	28
6. Testaus ja vertailu valmistajan säätimeen	31
6.1 Testaus laboratorio-olosuhteissa	31
7. Yhteenveto	35
LÄHTEET	36
LIITTEET	
I	Valokuva polkupyörästä
II	Laskuihin käytetty MatLab -koodi

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

A	pinta-ala
A_i	darlingtonin virtavahvistus
B	magneettivuontiheys
BLDC	Brushless Direct Current, hiiliharjaton tasavirta
C	kapasitanssi
C	kappaleelle ominainen muotokerroin
C_{rr}	vierintävastuskerroin
d	levyn paksuus
E	jännite
e	elektronin varaus
EMC	Electromagnetic Compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus
F	voima
f	taajuus
g	gravitaatiovoima
I	virta
i	välityssuhde
K_t	koneelle ominainen konevakio
m	massa
N	pinnan tukivoima
n	pyörimisnopeus
N	varauselektronien tiheys
NiMH	nikkelimetallihydridi-akku
pedelec	PEDal ELEctric Cycle, Sähköavusteinen polkupyörä
q	varaus
R	resistiivisyys
r	säde
t	aika
v	nopeus
V	jännite
β	virtavahvistus
η	hyötysuhde
ρ	tiheys
τ, T	vääntömomentti
Φ	magneettivuo

Alaindeksit

a	ankkuri
B	kanta
C	kollektori
E	emitteri
g	gravitaatiovoima
H	hall-elementti
i	ilmanvastus
in	tulo
kok	kokonaisvoimaa ilmoittava indeksi
out	lähtö
ref	vertailutaso
smv	sähkömotorinen voima
supply	operaatiovahvistimen käyttöjännite
v	vierintävastus
x	x-akselin suuntainen komponentti
y	y-akselin suuntainen komponentti

1. JOHDANTO

Sähköavusteiset polkupyörät eli pedelecit (*PEDal ELEctric Cycle*) ovat nykyisten energiansäästökampanjoiden myötä tulleet laajalti tunnetuiksi. Sähköavusteisesta polkupyörästä on kuitenkin haettu patenttia jo vuonna 1978 (Rudwick 1981) ja ensimmäiset kaupalliset mallit tulivat myyntiin vuonna 2000. Koska ensimmäiset pedelecit olivat enemmänkin sähköpyöriä kuin sähköavusteisia polkupyöriä, säädettiin Euroopassa pedelecille erillinen lakipykälä vuonna 2002, missä se määritellään. (Swizzbee 2004) Sähköavusteinen polkupyörä on käytännössä samanlainen kuin tavallinenkin polkupyörä, mutta siihen on asennettu akusta energiansa saava sähkömoottori avustamaan polkemista. Idea on todella hyvä ajatellen esimerkiksi ihmisiä, joilla on jonkinasteisia vaikeuksia pyörällä liikkumisen kanssa. Hekin voivat liikkua pyörällä, kun moottori avustaa liikkeellelähdyksessä ja ylämäissä. Ruuhkaisissa kaupungeissa polkupyörän käyttö työmatkaan on usein jopa nopeampi vaihtoehto kuin henkilöauton käyttö ja polkuavusteinen pyörä vähentää matkanteon rasitavuutta.

Suomessa pedelecit ovat pikku hiljaa yleistymässä. Helkama aloitti ensimmäisenä Suomessa valmistamaan kaupallista pedeleciä vuonna 2005. Vuonna 2010 Suomeen tuotiin laillisesti 15928 pedeleciä (Suomen Tulli 2012). Maahantuontimäärä osoittaa pedeleicien selkeän kysynnän kasvun. Hollannissa myynti oli jo vuonna 2008 yli 50 000 kpl vuodessa. (Taloussanommat 2008)

Vaikka sähköavusteinen polkupyörä onkin huomattavasti esimerkiksi autoa energiatehokkaampi, koska polttomoottorin hyötysuhde on huono tasavirtamoottoriin nähden ja autossa liikuteltava massa on huomattavasti suurempi, on sähköavusteisen polkupyörän energiatehokkuudessa kehitettävää. Pedeleceissä käytetään kaupallisissa sovelluksissa vääntömomenttisäättöön pulssinleveysmodulaattoria, mistä aiheutuu hiiliharjattoman tasavirtakoneen kommutoinnissa merkittävää rippeliä. Lisäksi säätölaitteiden hyötysuhteissa on parantamisen varaa (Starschich 2007).

Pyörissä käytettävien akkujen kapasiteetti on melko pieni, joten avustettu ajomatka on melko lyhyt. Tästä johtuen akkuja täytyy ladata usein. Akkujen kestoja voi lisätä rakentamalla pyörään erillisen lataussysteemin. Lataussysteemejä ei ole markkinoilla olevissa pyörissä lainkaan, mikä selittyy osin pedeleicien valmiiksi korkeasta hinnasta. Tässä kandidaatintyössä esitetään polkemisenergiaa hyväksikäyttävä lataussysteemi lyhyesti sekä suunnitellaan ja rakennetaan ohjausyksikkö säätämään moottoria ja lataussysteemiä. Työn tarkoituksena on toteuttaa halpa, toimiva ja ennen kaikkea laillinen säätölaite.

2. ONGELMAN MÄÄRITTELY

Koska säädettävä laitteisto on melko yksinkertainen ja säädin voidaan toteuttaa usealla eri tavalla, on syytä tarkastella ensin mitä asioita tulee ottaa huomioon säätimen suunnittelussa. Nämä asiat voidaan jakaa kahteen kategoriaan. Osa vaatimuksista tulee suoraan Suomen laista sekä EU-direktiiveistä ja loput rajaukset asetetaan itse siten, että rakenteesta ei tule liian kompleksista ja säätö voi onnistua.

2.1 Lain määräämät asiat

Suomen tieliikenteessä noudatetaan sekä Suomen ajoneuvolakia, että EU-direktiivejä. Koska tämän työn sähköavusteisen polkupyörän on tarkoitus olla liikennekelpoinen, täytyy lakiin tutustua tarkemmin. Ohessa on esitetty kyseiset lait ja määräykset sanatarkasti.

Suomen ajoneuvolaki 19 §: ”*Polkupyörällä* tarkoitetaan yhden tai useamman henkilön tai tavaran kuljettamiseen valmistettua, vähintään kaksipyöräistä, polkimin tai käsikammin varustettua moottoritonta ajoneuvoa. Polkupyöräksi katsotaan myös sellainen enintään 250 W:n tehoisella sähkömoottorilla varustettu ajoneuvo, jonka moottori toimii vain poljettaessa ja kytkeytyy toiminnasta viimeistään nopeuden saavuttaessa 25 kilometriä tunnissa.” Tekstissä mainitaan, että moottori saa toimia vain poljettaessa, mutta se ei ota kantaa generaattorikäyttöön.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2002/24/EY, joka määrittelee moottoriajoneuvon, kertoo seuraavaa: ”Tätä direktiiviä ei sovelleta polkimin varustettuihin ajoneuvoihin, joissa on jatkuvalta nimellisteholtaan enintään 0,25 kW:n sähkökäyttöinen apumoottori, jonka tehonsyöttö pienenee asteittain ja lopulta lakkaa ajoneuvon saavuttaessa 25 km/h nopeuden tai ennemmin, jos kuljettaja lopettaa polkemisen, eikä näiden osiin tai erillisiin teknisiin yksiköihin, ellei niitä ole tarkoitettu asennettavaksi tässä direktiivissä tarkoitettuihin ajoneuvoihin.”

Toisin sanoen laki määrää kolme asiaa; moottori ei saa toimia, mikäli polkimet eivät pyöri, tehonsyötön täytyy pienentyä asteittain nopeuden kasvaessa ja ajoneuvon saavuttaessa nopeuden 25 km/h moottorin täytyy lakata toimimasta. Lisäksi osa jälleenmyyjistä ilmoittaa sivuillaan, että tässäkin projektissa käytettävä kaasukahvallinen säätö on tieliikennelain mukaan laitton, mutta lakiteksti ei mainitse siitä mitään.

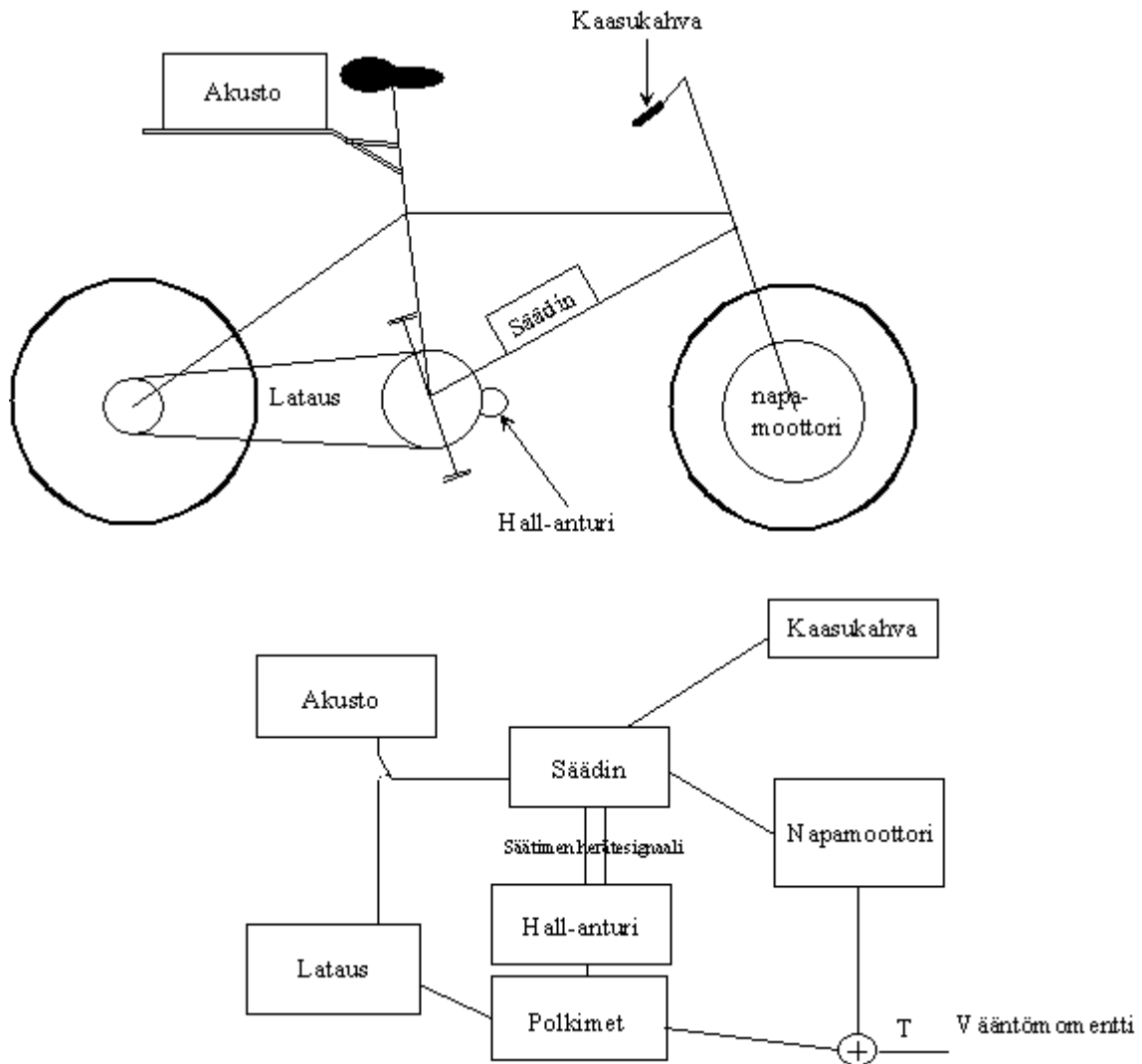
2.2 Säätimelle asetetut vaatimukset

Huomioidaan lain määräykset kolmella eri osiolla. Säätimen täytyy tunnistaa polkeminen, joten polkimilta tuleva signaali toimii kytkimenä. Samalla tavalla hoidetaan moottorin pysäytys, mutta signaali tulee tällöin moottorin nopeudesta. Kolmas vaatimus eli tehonsyötön pienentyminen asteittain on vaikein toteuttaa. Tämä osio toteutetaan pulssinleveysmodulaattorilla, josta tarkemmin luvussa 4.

Lain määrittämien asioiden lisäksi latausjärjestelmä asettaa vaatimuksia. Koska akkujen lataaminen tapahtuu rinnan moottorin tehonsyötön kanssa, niiden yhtäaikainen toiminta aiheuttaisi vaihtelevaa tehonsyöttöä, jonka säätäminen on vaikeampaa kuin pelkän akun jännitteen säätö. Asetetaan siis säätimelle vaatimus, ettei moottorin tehonsyöttö ja akun lataaminen voi tapahtua samanaikaisesti. Lisäksi sen täytyy olla säädettävissä kaasukahvasta.

3. SÄÄDETTÄVÄ LAITTEISTO

Luodaan aluksi kokonaiskuva laitteistosta. Kaikille osille, paitsi akustolle ja säätimelle, on polkupyörän rakenteesta johtuen vain yhdet mahdolliset paikat. Akusto vie tilaa ja painaa useamman kilon, joten se kannattaa asettaa tarakalle. Säädin puolestaan on hyvä olla keskeisellä paikalla, koska siihen tulee johtimia melkein kaikilta muilta osilta. Sijoitetaan se siis runkoon. Kuva 1 havainnollistaa millainen on eri osien sijoittelu pyörässä. Liitteessä I on valokuva pyörästä, johon sähköiset osat on liitetty.



Kuva 1 Laitteiston vuokaavio ja sijoittelu polkupyörään.

Vaikka rakennusvaihe on melko työläs johtuen muun muassa amerikkalaisesta hihnasta, joka ei sovellu suoraan eurooppalaiseen polkupyörään, ei siihen puututa tässä työssä. Tarkastellaan seuraavaksi tärkeimpiä osia yksi kerrallaan.

3.1 Moottori

Käytettävä moottori on Erider-napamoottori, joka asennetaan eturenkaan sisälle. Moottori on hiiliharjaton tasavirtamoottori eli BLDC-moottori (*Bushless Direct Current*) Moottorin nimellisjännite on 36 V ja –teho 250 W. Suurimmaksi virraksi saadaan noin 6,9 A. Kuvassa 2 on valokuva käytettävästä asennetusta napamoottorista.



Kuva 2 Eturenkaan keskiöksi asennettu napamoottori liittimineen. Liittimiä ovat vaiheiden meno- ja paluujohtimet sekä moottorin sisällä olevien Hall-antureiden meno- ja paluujohtin.

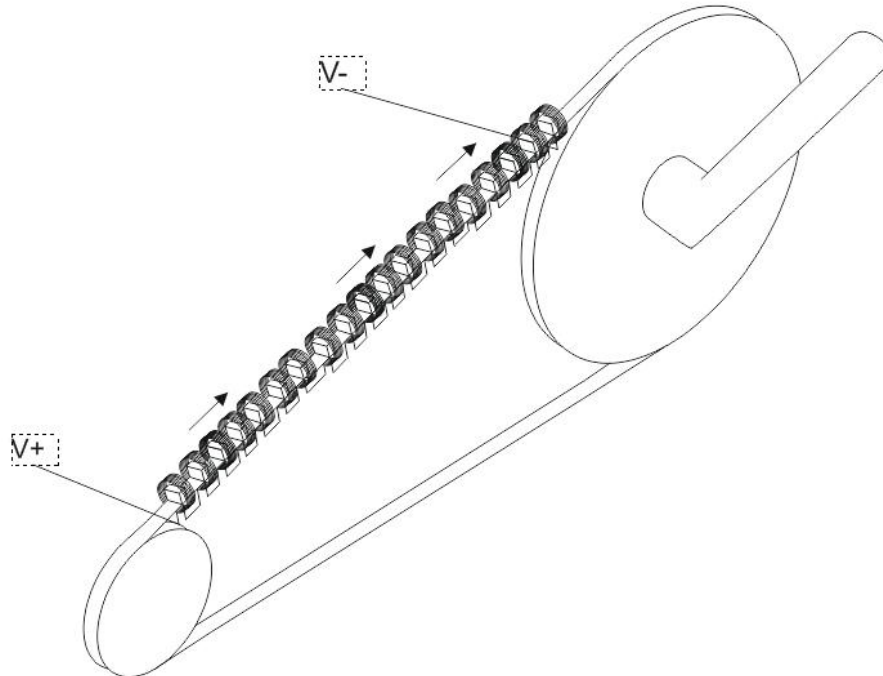
Moottorista ei ole saatavilla sisäisen rakenteen kuvausta, joten oletetaan sen olevan rakenteeltaan Hall-antureilla kommutoitava tyyppillinen BLDC-moottori. Tästä tarkemmin kappaleessa 4.2 Hiiliharjattoman tasavirtakoneen vääntömomenttisäätö.

3.2 Akusto

Käytetty akusto koostuu kolmesta 12 voltin akkupaketista. Jokaisessa paketissa on kymmenen 1,2 V D-kokoluokan NiMH-akkupatteria. Akkupakettien mitatut kapasiteetit ovat 8,5, 5,0 ja 4,0 ampeerituntia. Käytännössä kokonaiskapasiteetti on pienimmän akun mukaisesti 4,0 Ah. Täydellä teholla ajettaessa akusto tyhjenee noin 35 minuutissa. Jokainen akkupaketti painaa noin kaksi kiloa.

3.3 Latausjärjestelmä

Lataussysteemin periaate on yksinkertainen; korvataan ketjut hihnavedolla, liimataan hihnan pintaan magneetteja ja käämitään hihnan ympärille keloja, kuva 3.



Kuva 3 Lataussysteeminä toimivan lineaarigeneraattorin periaatekuva. Todellisessa järjestelmässä magneetteja on liimattuna koko hihnan matkalle ja keloja on hieman vähemmän. (Khabbal 2012)

Poljettaessa keloihin indusoituu jännitettä Faradayn lain mukaisesti.

$$E_{smv} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{BdA}{dt}, \quad (3.1)$$

missä Φ on magneettivuo, A efektiivinen pinta-ala ja t aika. Toisinsanoen, mitä nopeammin poljetaan, sitä enemmän indusoituu jännitettä. Jännite on vaihtelevaa, joten ennen akulle viemistä se täytyy tasasuunnata ja reguloida.

4. OHJAUSYKSIKÖN SUUNNITTELU

Kun kaikki vaatimukset ja säädettävä laitteisto on tiedossa, voidaan aloittaa säätimen suunnittelu. Säädin koostuu kolmesta osiosta; polkutunnistimesta, pulssinleveysmodulaattorista ja virrankatkaisuosiosta. Lisäksi nämä osiot täytyy liittää toisiinsa ja akustoon sekä lataussysteemiin. Tarkastellaan osia yksi kerrallaan, jotta kokonaisuus on helpompi hahmottaa.

4.1 Liikettä vastustavat voimat

Avustuksen tarve voidaan määrittellä, kun tunnetaan pyörään ja pyöräilijään vaikuttavat voimat. Avustuksen optimointi on tärkeää, koska liiallinen avustus voi aiheuttaa akkujen nopean tyhjenemisen ja liian pieni avustus taas aiheuttaa hyytymisen jyrkässä mäessä. Avustuksen tarve on suurimmillaan pienillä nopeuksilla, jolloin ollaan joko lähdössä liikkeelle tai ylämäessä. (Hsu 2012)

Pyöräilijään vaikuttaa kolme liikettä vastustavaa voimaa; renkaiden ja tien välinen vierintävastus, ilmanvastus ja ylämäessä vaikuttava painovoima. Lisäksi mekaanisessa laitteessa on aina jokin hyötysuhdekerroin, jolla voidaan skaalata lopullinen tulos. Vierintävastus voidaan laskea yhtälöllä

$$F_v = C_{rr}N, \quad (4.1)$$

missä N on pinnan tukivoima ja C_{rr} vierintävastuskerroin, joka on polkupyörälle noin 0.005. ja ilmanvastus. Pinnan tukivoima saadaan yhtälöstä

$$N = mg \cos \phi, \quad (4.2)$$

missä m on esineen massa, g gravitaatiovoima ja ϕ pinnan kulma horisontaaliseen tasoon nähden. Polkupyörälle ominaisesta vierintävastuskertoimesta johtuen jäävät kitkavoimat pieniksi. Ilmanvastuksesta aiheutuvat voimat riippuvat nopeuden neliöstä, joten ne vastustavat liikettä enemmän kuin renkaiden vierimisvastus. Ilmanvastuksen suuruus voidaan laskea yhtälöllä

$$F_i = \frac{1}{2} \rho v^2 AC, \quad (4.3)$$

missä ρ on väliaineen tiheys, v virtaavan ilman nopeus eli pyöräilijän nopeus ja tuulennopeus, A esineen otsapinta-ala ja C on kappaleelle ominainen muotokerroin. Koska moottorin avustusta tarvitaan lähinnä ylämäessä, on oleellista laskea, minkä suuruisia voimia ylämäki aiheuttaa. Voima voidaan laskea gravitaatiovoiman x-suuntaisesta komponentista, kun tiedetään mäen kaltevuuskulma horisontaaliseen tasoon nähden

$$F_g = G_x = G \sin \Phi = mg \sin \Phi. \quad (4.4)$$

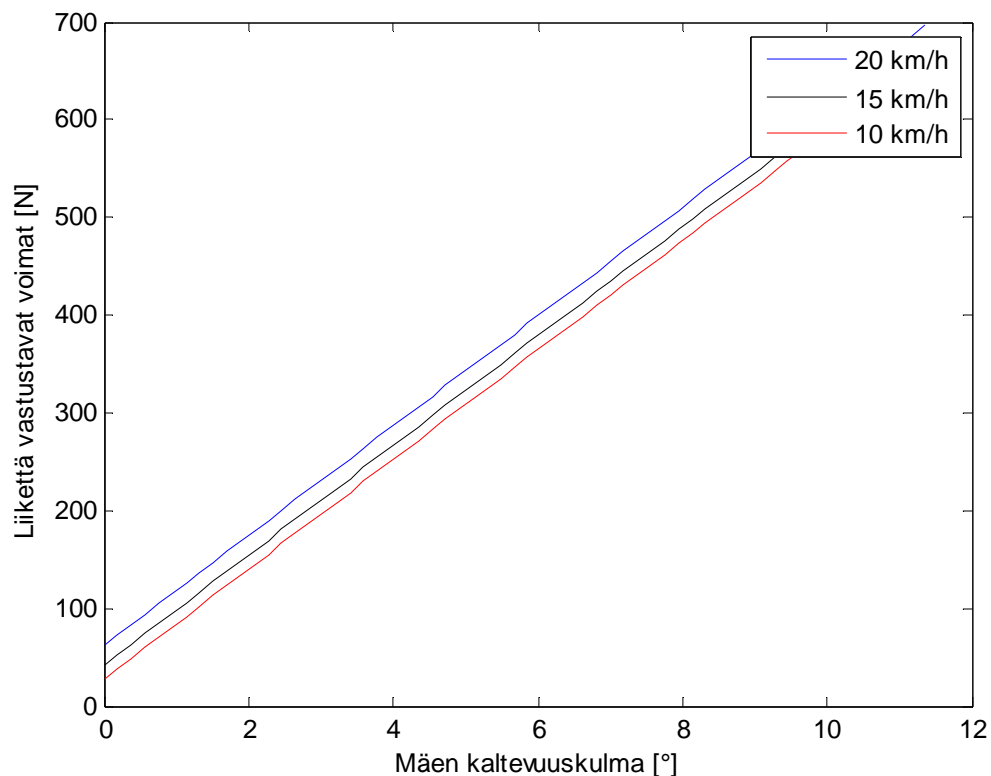
Kokonaisvoima saadaan yhdistämällä edelliset ja huomioimalla rattaiden välityssuhde ja pyörän hyötysuhde.

$$F_{\text{kok}} = \frac{F_V + F_i + F_g}{\eta} * i, \quad (4.5)$$

missä välityssuhde i on eturattaan hammasmäärä jaettuna takarattaan hammasmäärällä, mikä on kyseisellä pyörällä 2,3, ja η on pyörän hyötysuhde, mikä voi olla jopa 0,985, mutta tyypillisesti se on noin 0,7 (Pietro 2000). Voiman ja vääntömomentin suhde on

$$\tau = F_{\text{kok}} * r, \quad (4.6)$$

missä r on voiman varsi eli renkaan säde. Lasketaan edellisten yhtälöiden avulla kuinka suuria voimia vaaditaan tasaisen nopeuden ylläpitämiseen. Sijoittamalla pyörälle tyypilliset arvot erilaisilla nopeuksilla ja mäen kulman arvoilla saadaan kuvan 4 mukainen esitys vastustaville voimille.

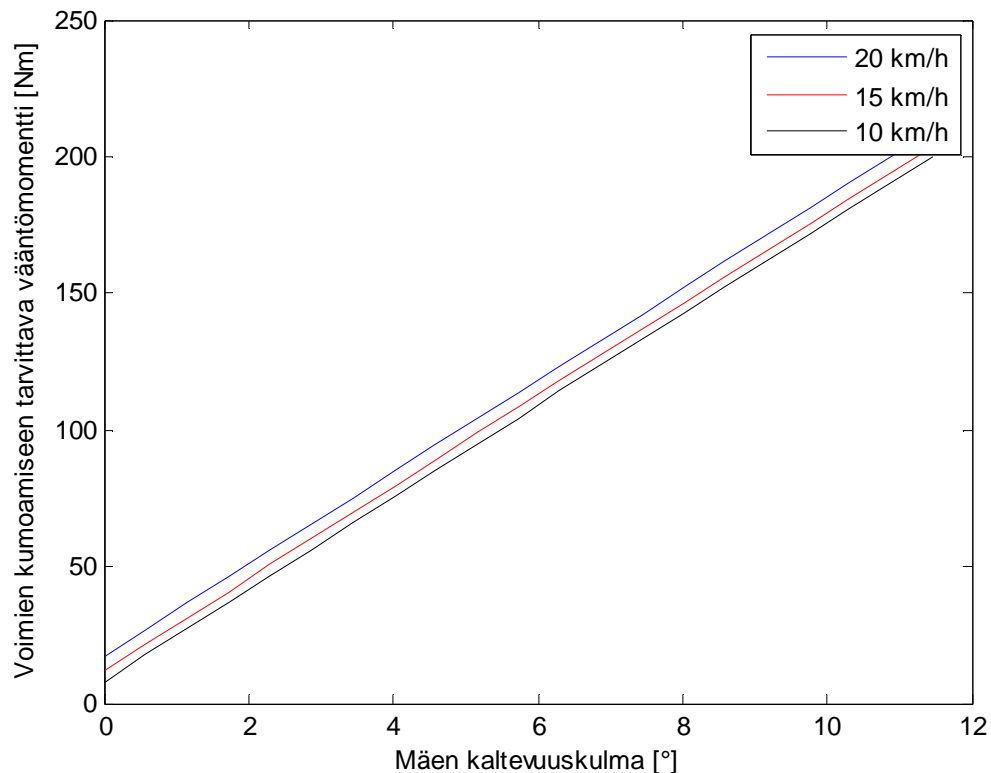


Kuva 4 Polkupyörän ja pyöräilijän liikettä vastustavat voimat mäen kaltevuuskulman funktiona kolmella eri nopeudella ajettaessa tasaisella nopeudella.

Edellä todettiin, että ilmanvastus on huomattavasti suurempi voima kuin kitkavoima ja kuvasta nähdään, että nopeuden muutokset eivät juurikaan vaikuta kokonaisvoiman suuruu-

teen, joten ylivoimaisesti suurin liikettä vastustava voima on gravitaatiovoima. Esimerkiksi 10 asteen mäessä voimat ovat jo 500 N:n suuruiset. Suomesta löytyy esimerkiksi Koliilta 20 %:n mäki, mikä vastaa asteissa yhdeksän asteen nousua. Tällaiset mäet ovat kuitenkin harvinaisia, joten tätä voidaan pitää ylärajana.

Tässä tapauksessa on mielekkäämpää tarkastella moottorilta vaadittavaa vääntömomenttia kulman funktiona. Käytettävän pyörän renkaan säde on 30 cm, joka sijoitetaan yhtälöön (4.6), jolloin saadaan kuvan 5 mukainen riippuvuus.



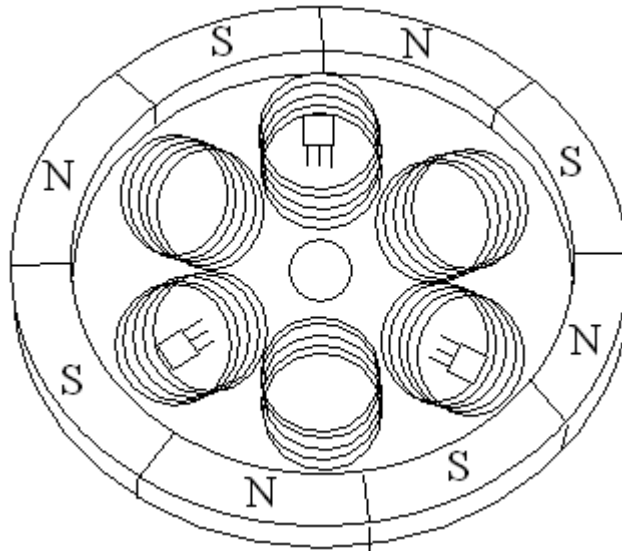
Kuva 5 Tarvittavan vääntömomentin suuruus nopeuden ylläpitämiseen mäen kaltevuuskulman funktiona kolmella eri nopeudella.

Kuvasta nähdään, että voimien voittamiseen vaadittava vääntö kasvaa jyrkästi kulman kasvaessa. Käytävissä oleva moottori ei pysty tuottamaan lähellekään tällaisia vääntömomenteja, joten se ei pelkästään riitä nopeuden ylläpitämiseen.

Poljettaessa pyörään vaikuttaa myös lataussysteemin aiheuttama sähköinen voima. Siitä saatavat arvot ovat kuitenkin mitättömän pieniä ($F_{SMV}=0.05$ N) verrattuna dominoivaan ilmanvastukseen, joten se voidaan jättää huomiotta. (Khabbal 2012)

4.2 Hiiliharjattoman tasavirtakoneen vääntömomenttisäätö

BLDC-moottori vaatii toimiakseen kolmivaiheista trapezoidiaaltoa eli nousu- ja laskureunoilta hieman loivennettua kantiaaltoa, siniaaltoa tai muokattua siniaaltoa. Vaikka sen tulojännitteenä ja -virtana ovat samanlaiset aaltomuodot kuin oikosulkumoottorilla, eroavat ne ominaisuuksiltaan suuresti. Vaihtovirtakone toimii kiertokenttäperiaatteella, kun BLDC-moottorissa virran suuntaa muutetaan kommutoimalla, kuten hiiliharjallisessakin koneessa, mutta kommutointi tapahtuu sähköisesti (Kenjo 1985). Sähköinen kommutointi toteutetaan usein optiikan tai Hall-antureiden avulla. BLDC-moottorissa on myös kiinni akusto tai muu tasajännitelähde (Aura 1986). Tässä projektissa käytettävä moottori on napamoottori, mikä tarkoittaa sitä, että staattori on moottorin navassa ja roottori kiertää sen ympärillä. Hall antureilla kommutoitava hiiliharjaton napamoottori on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6 Yksinkertaisen kolmivaiheisen napamoottorin, joka on toteutettu hiiliharjattomalla tasavirtamoottorilla, rakenne.

Tasavirtamoottorin vääntömomentsi, T , on suoraan verrannollinen ankkurivirtaan, I ,

$$T = K_t I, \quad (4.7)$$

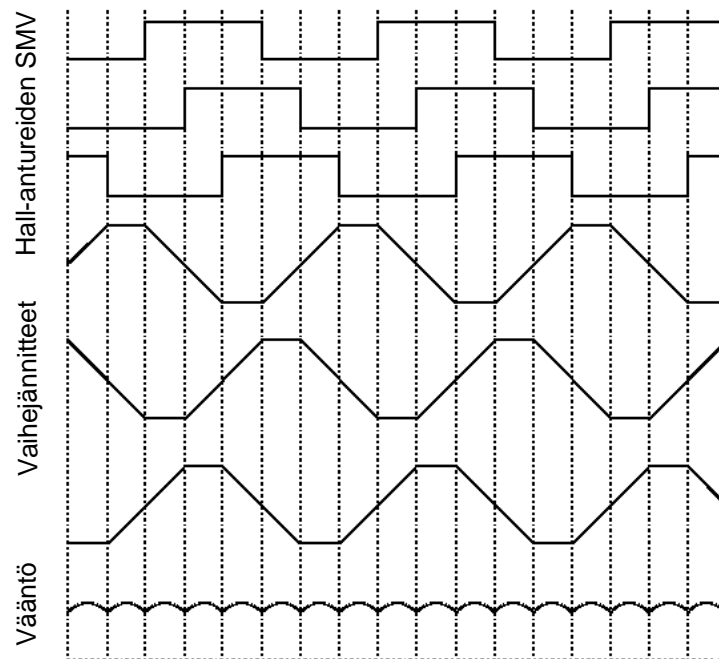
missä K_t on moottorikohtainen vakio [Nm/A]. Toisaalta moottorin pyörimisnopeus noudattaa yhtälöä

$$n = U - \frac{I_a R_a}{k_t \phi}, \quad (4.8)$$

missä U on jännite, I_a ankkurivirta, R_a ankkuriresistanssi, k koneelle ominainen vakio ja ϕ päävu. Myös siniaallon taajuus vaikuttaa nopeuteen, joskin epäsuorasti. Hall-antureilla toteutetussa kommutoinnissa antureiden tilat vaihtuvat käyttötaajuudella, joka siten vaikuttaa moottorin pyörimisnopeuteen. Optisessa kommutoinnissa virta kääntyy aina, kun va-

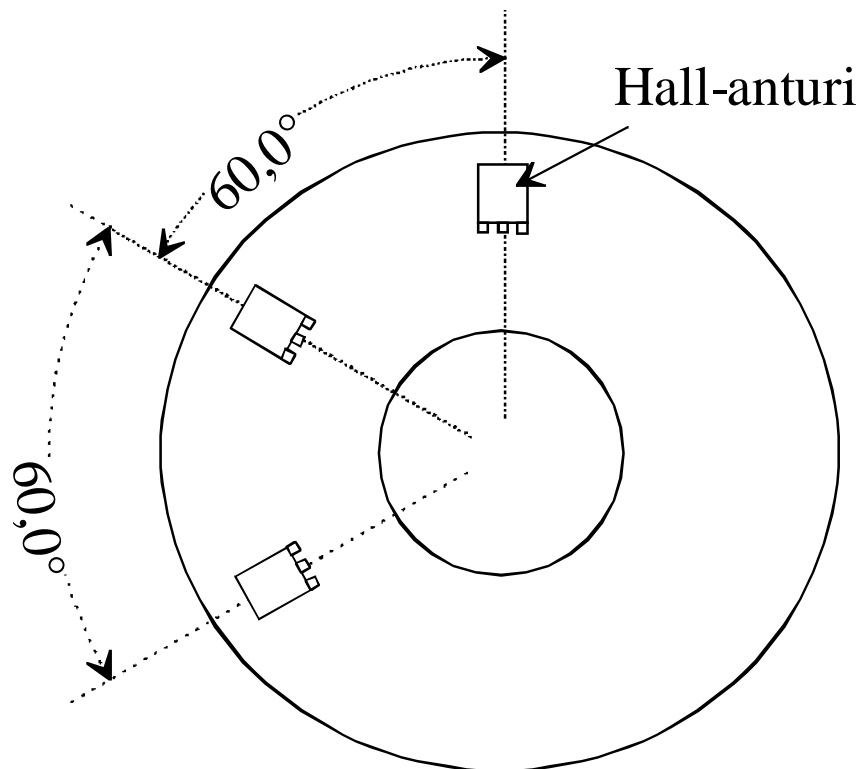
lopulssin matka-aika muuttuu. Kun pulssi kimpoaa roottorihampaasta, on sen matka-aika lyhyempi kuin silloin, kun pulssi kimpoaa roottoriurasta. Kappaleessa 4.1 esitettiin voimalaskut, joiden perusteella vääntömomentin tarve kasvaa lineaarisesti mäen kulman kasvaessa. Lisäksi tarvittava vääntö on moottorin kokoon nähden suurta. Näillä perusteilla voidaan keskittyä vääntömomenttisäätöön.

Moottori on kytkettynä etuhaarukkaan vanteen keskiöksi. Toisin sanoen moottoria käytetään suoravetoisena, joten sen kulmanopeus on sama kuin renkaan. Tästä päästään tilanteeseen, jossa moottorin vääntöä saadaan lisättyä kasvattamalla moottorille syötettävää tehoa. Kuvassa 7 on esitettyä kolmivaiheisen hiiliharjattomasta tasavirtakoneesta saata-va vääntömomentti vaihejännitteiden avulla.



Kuva 7 Jännitteiden ja vääntömomentin käyrämuotoja tyypillisessä BLDC-moottorissa. (Kenjo 1985)

Kuvasta nähdään, millainen käyttäytyminen vaihejännitteillä on, kun Hall-anturin tila vaihtuu. Vaiheilla 1 ja 3 saadaan laskeva jännite, kun vastaavan Hall-anturin lähtö on 1 ja nouseva, kun Hall-anturin lähtö on 0. Muutoksen jälkeen kolmannella askeleella vaihejännite on vakio. Tämä johtuu siitä, että vaihejännitteen arvo on saavuttanut suurimman tai pienimmän mahdollisen arvonsa. Vastaavan Hall-anturin looginen tila pysyy vielä samana. Vaiheella 2 käyttäytyminen on päinvastainen tässä esimerkitapauksessa, koska Hall-anturi on kytketty eri päin, kuva 8. Tämä on Hall-antureilla toteutettavan kommutoinnin yksinkertainen esitys. Hall-antureita käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa. Kuvassa 8 on esitetty Hall-antureiden tyypillinen sijoitus, jotta saadaan kuvan 7 mukaiset jännitteet.

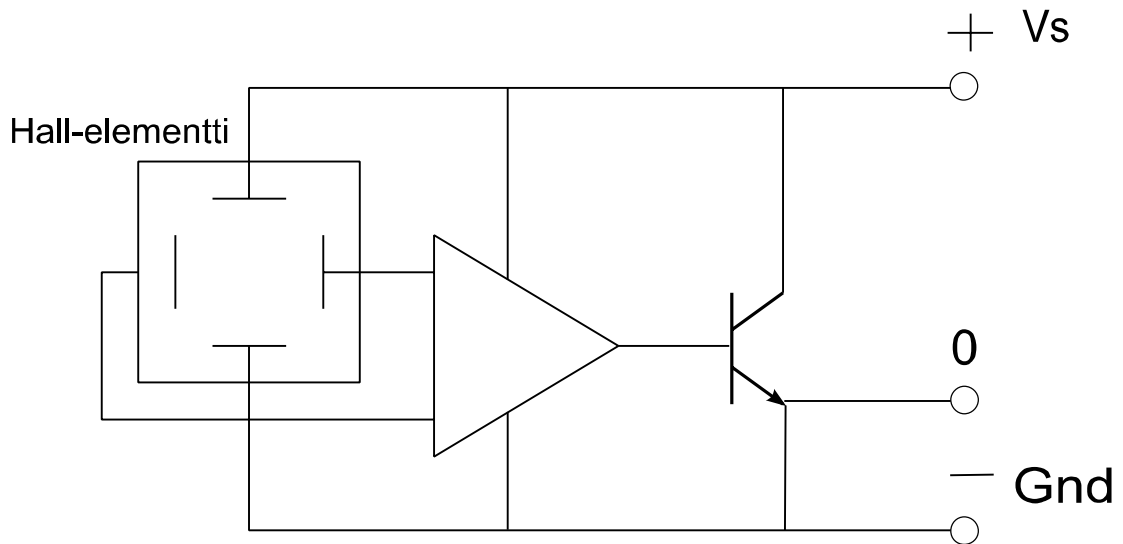


Kuva 8 Hall-elementtien tyypillinen sijoittaminen BLDC-moottorin sisään. (Kenjo1985)

Mikäli käytetään kuvassa 6 esiteltyä sijoittelutapaa, muuttuu edellä esitetyn vaiheen 2 käyttäytyminen päinvastaiseksi. Tärkeintä on, että jokaisessa vaiheessa on anturi. Huomionarvoista tällaisessa sijoittelussa on, että sähköinen jakso on nyt 720° moottorin pyöriessä yhden kierroksen (360°). Tämä johtuu siitä, että Hall-anturi vaihtaa loogista tilaansa neljä kertaa yhden mekaanisen kierroksen aikana. Toisin sanoen vaiheen napa ohittaa Hall-anturin kahdesti mekaanisen kierroksen aikana.

4.3 Polkutunnistin

Säätimen vaatimuksena on, että avustava moottori on päällä vain polkemisen aikana. Toimitetaan säätimen herätesignaali polkutunnistimen avulla. Eturattaan viereen asennetaan metallinen rengas, jonka yli asetetaan jännite ja eturattaan keskiöön asennetaan magneetteja. Rattaan pyöriessä eli polkemisen tapahtuessa Hall-anturit reagoivat magneettikenttään ja tuottavat jännitesignaalia. Kun tämä jännite ohjataan komparaattorina toimivalle operaatiovahvistimelle, jonka lähtö on NPN-transistorin kannassa, saadaan luotua sähköinen kytkin, kuva 9.



Kuva 9 Analogisen Hall-anturin yksinkertainen kytkentämalli.

Valmistajan ilmoituksen mukaan polkupyörän nopeuden täytyy olla vähintään 3 km/h, jotta Hall-elementin signaali on riittävän voimakas. Tämä arvo on outo, koska polkimien pyörimisnopeus voi olla mitä tahansa kyseisellä nopeudella riippuen käytettävästä vaihteesta. Todennäköisesti mitoitus on tehty 26 tuumaiselle pyörälle, jossa on standardikokoiset ratat ja vaihteistoa ei ole. Suunniteltavassa säätimessä jännite asetetaan niin pienelle tasolle kuin mahdollista, jotta avustusta saa aina polkimien pyöriessä.

4.3.1 Hall-ilmiö

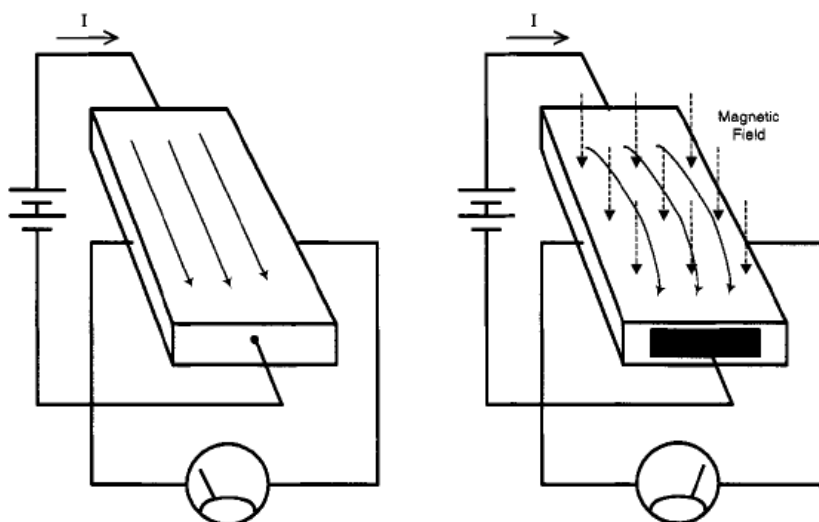
Hall-ilmiö kuvaa elektronien kulkusuunnan muutosta ulkoisen magneettikentän vaikutuksesta. Kun suorakulmainen johtava levy asetetaan sähköpiiriin siten, että siinä kulkeva virta on poikittain johtimia kohden, ei johtimien välille aiheudu jännitettä. Kun levyyn kohdistetaan ulkoinen magneettikenttä, elektroneihin vaikuttaa Lorentzin voima

$$F = -q(v \times B), \quad (4.9)$$

missä q on alkeisvaraus, v elektronin nopeus ja B magneettikentän voimakkuus. Tällöin johtimien välille aiheutuu Hall-jännite, jonka suuruus on

$$V_H = -\frac{IB}{ned}, \quad (4.10)$$

missä d on levyn paksuus ja n varauselektronien tiheys. Kuvassa 10. on esitetty virran poikkeutuminen pienen ulkoisen magneettikentän tapauksessa.



Kuva 10 Hall-ilmiön toimintaperiaate. Vasemmassa ulkoinen magneettikenttä ei vaikuta johdinlevyyn. Oikeassa magneettikenttä poikkeuttaa elektronien kulkusuuntaa muodostaen Hall-jännitteen. (Ramsden 2006)

Levyssä kulkee virta vasemmalta oikealle. Kun ulkoinen magneettikenttä vaikuttaa levyyn alhaalta ylöspäin, kaareutuu virran suunta vastapäivään, jolloin levyn päihin muodostuu jännite. (Ramsden 2006)

4.4 Moduloititavan valinta

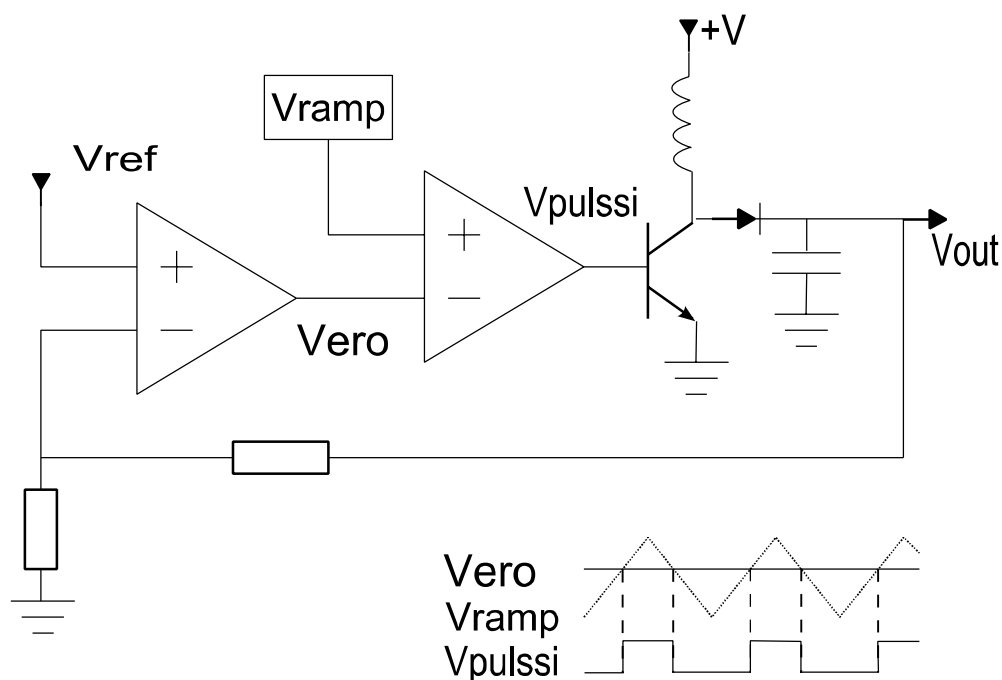
Lain määräämä asteittainen tehonsyötön väheneminen nopeuden kasvaessa vaatii jonkinlaisen säätölaitteen. Säätimen tulee tunnistaa moottorin nopeus ja vähentää tehonsyöttöä asteittain. Kuten kappaleessa 4.2 kerrottiin, moottorin pyörimisnopeutta saadaan kasvatettua lisäämällä koneelle syötettävää jännitettä. Säätimen tulee siis mitata koneen jännitettä ja verrata sitä haluttuun jännitteeseen. Teollisuudessa yleisimmin käytetty sovellus tasavirtakoneiden ohjauksessa on pulssinleveysmodulaattori, joka täyttää vaatimukset. (Kenjo 1985)

Vaihtoehtoisesti voidaan säädin toteuttaa jollakin muulla moduloititavalla. Muita tapoja ovat amplitudi-, taajuus- ja vaihemodulaatio. Jokaista tapaa voidaan periaatteessa soveltaa tässäkin sovelluksessa, mutta esimerkiksi vaihemodulaation käyttö on todella hankalaa moottorikäytössä ja vaatii ohjausyksiköltä paljon. Tässä kappaleessa perehdytään tarkemmin valmistajan käyttämään menetelmään ja suunnitellaan oman säätimen pohja.

Moduloititavaksi valitaan amplitudimodulaatio, koska siten voidaan pitää moottorin pyörimisnopeus vakiona. Nyt tehoa kasvatetaan kasvattamalla amplitudia ja taajuus pidetään vakiona. Lisäksi ajettaessa vakiotajuudella poistuu Hall-antureiden käytön tarve.

4.4.1 Valmistajan säädin, pulssinleveysmodulaattori

Yksinkertaisimmillaan pulssinleveysmodulaattori vertailee kolmioaallon ja erosuureen välistä jännitettä komparaattorin avulla. Kun kolmioaalto on suurempi kuin erosuure komparaattori antaa lähdöstä loogista ykköstä eli käyttöjännitettä. Kun kolmioaalto on pienempi kuin erosuure, ulostulossa on looginen nolla eli komparaattorin lähdön jännite on nolla, kuva 11.



Kuva 11 Pulssinleveysmodulaattorin periaatteellinen toimintamalli

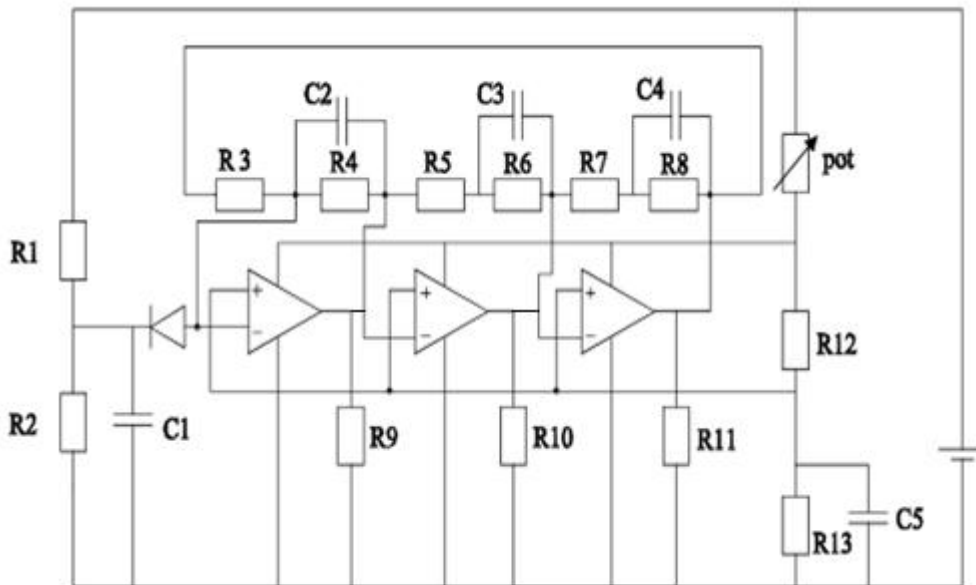
Mitä lähempänä systeemin ulostulo V_{out} on haluttua jännitettä V_{ref} , sitä kapeampi on modulaattorin läpäisevä pulssi. Jos haluttu suure saavutetaan, pulssin leveys on nolla eli komparaattorin lähdöllä ei ole jännitettä. (Niiranen 2000)

4.4.2 Oma säädin, amplitudimodulaatio

Tarkoituksena on luoda yksinkertainen ja mahdollisimman halpa säädin siten, että se täyttää lain määräämät seikat. Koska valmistajan säädin käyttää pulssinleveysmodulaatioon perustuvaa säädintä, tehdään säädin käyttäen toista modulointitapaa. Tällöin saadaan jonkinlainen vertailukohta modulaatitavan valinnan merkityksestä. Edellä perusteltiin, miksi amplitudimodulaatio valittiin.

Ensimmäinen asia, joka säätimessä täytyy tehdä, on tasajännitteen vaihtosuuntaus ja muuttaminen kolmivaiheiseksi. Yksi tapa on luoda yksinkertainen invertoiva integraattori operaatiovahvistimen avulla ja viivästä vaihetta kahdesti. Yksittäinen integraattori koos-

tuu operaatiovahvistimesta ja alipäästösuotimesta. Viivästys vaiheiden välillä luodaan liittämällä integraattoreita sarjaan, kuva 12.

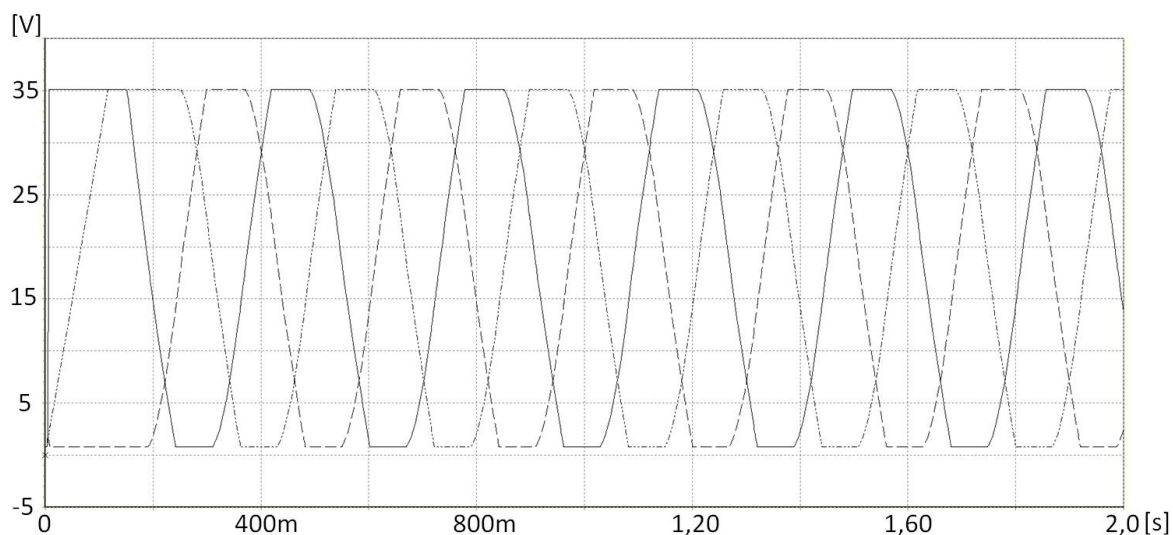


Kuva 12 Kolmivaiheisen sinigeneraattorin kytkentäkaavio. Operaatiovahvistimien lähdöistä saadaan kolme eri modifioitua siniaaltoa 120 asteen välein.

Testataan kytkennän toiminta simuloimalla piiriä 5Spice ohjelmalla. Jännitelähteeltä syötetään piiriin 36 V tasajännitettä. Operaatiovahvistimilla vaihe jää 60 astetta jälkeen, jolloin saadaan ulos modifioitua siniaaltoa. Oskillointitaajuus riippuu operaatiovahvistimien integroivan osan kondensaattorista ja vastuksesta seuraavasti

$$f = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (4.11)$$

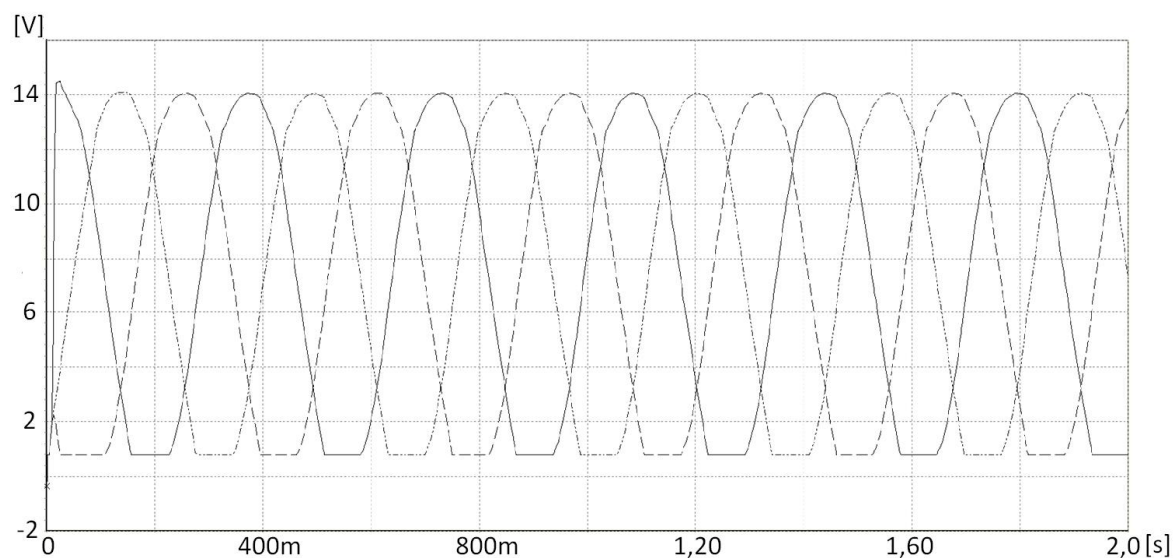
missä R on vastuksen arvo ja C kondensaattorin arvo. (Floyd 2007) Koska integraattoreihin on lisätty sarjaan vastukset $R3$, $R5$ ja $R7$ ei edellistä yhtälöä voida suoraan soveltaa. Taajuus on valittu halutuksi iteroimalla ko. vastusten arvoja. Simuloidut lähtöjännitteet eli vastusten $R9$, $R10$ ja $R11$ yli olevat jännitteet esitetty kuvassa 13.



Kuva 13 Kolmivaiheisen sinioskillaattorin lähtöjännitteet ajan funktiona, kun potentiometri on asetettu pienimpään arvoonsa.

Kuvasta nähdään, että lähtöjännitteet ovat halutunlaiset. Jännitteen huippuarvo on piirin häviöiden jälkeen noin 35 V ja pienin arvo noin 1 V.

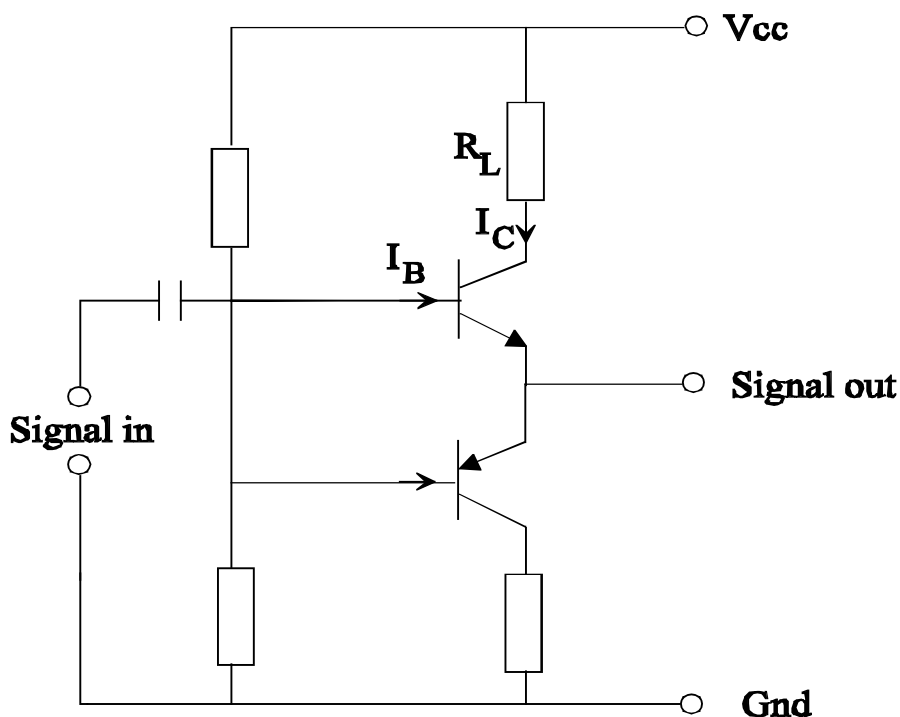
Kuvan 12 piirikaaviossa amplitudimodulaatio toteutetaan hyvin yksinkertaisesti potentiometrin avulla. Potentiometri on liitetty operaatiovahvistimille tulevaan positiiviseen käyttöjännitteeseen. Suurin käyttöjännite tulee potentiometrin ollessa pienimmillään eli 0Ω ja kasvatettaessa potentiometrin arvoa käyttöjännite alenee. Kuvassa 14 on esitettyä simulaatiotulos, kun potentiometrin arvo on $1/20$ osa R_{12} :n ja R_{13} :n arvosta.



Kuva 14 Vaihejännitteiden jännitteen kuvaaja, kun potentiometri on selkeästi nolasta poikkeavassa arvossa.

Kuvasta nähdään, että jännitteen huippuarvo on enää noin 14 V. Pienin arvo on edelleen noin 1 V. Lisäksi jännitteiden huiput ovat nyt enemmän kumpumaiset, mikä näkyy myös väännön vaihteluissa, vrt. kuva 7. Vaikka jännitteen käyrämuodot ovat halutunlaiset, eivät vaiheet pysty syöttämään moottorille riittävästi virtaa. Tämä johtuu siitä, että virta operaatiovahvistimen lähdössä on vain 30-100 mA, riippuen siitä mitä operaatiovahvistinta käytetään. Kokeellisesti havaittu moottorin virrantarve ajon aikana ilman erityistä kuormitusta on 400-600 mA. Käynnistysvirta puolestaan on aina jonkin verran tätä virtaa suurempi. Ilman kuormitusta käynnistysvirran arvoksi saadaan 1,2-1,4 A. Kuormitustilanteessa moottorin täytyy vääntää enemmän, joten myös virran täytyy olla suurempi.

Virran kasvattamiseen käytetään virtavahvistusta. Vahvistimet on jaettu A-, B- AB-, C- ja D-luokan vahvistimiin. Koska vahvistettava signaali ei ole koskaan negatiivinen, positiivisen virran vahvistaminen riittää. Vaikka tähän sovellukseen sopiikin A-luokan vahvistin, joka toteutetaan yhdellä transistorilla, käytetään silti B-luokan vahvistinta, kuva 15. B-luokan vahvistin on hyötysuhteeltaan parempi, eikä ole niin virhealtis. Virtavahvistuksella on melko huono hyötysuhde, joten akkukäyttöisessä sovelluksessa tästä voi tulla ongelma.



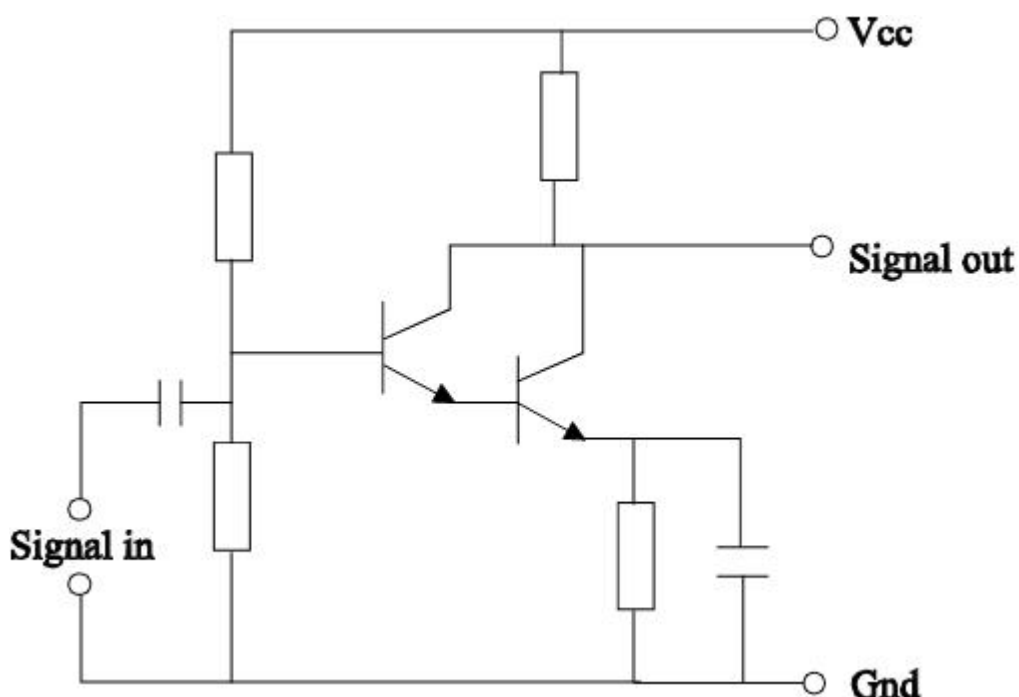
Kuva 15 B-luokan virtavahvistuksen kytkentämalli.

B-tyyppin virtavahvistin sisältää yhden NPN- ja yhden PNP-transistorin. Kantavirran etumerkistä riippuen jompikumpi transistoreista vahvistaa ulosmenevää signaalia. NPN-transistori (kuvassa ylempi), johtaa silloin, kun jännite on positiivinen ja PNP, kun virta on negatiivinen.

Tavallisen transistorin virtavahvistus määritellään yhtälöllä

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}, \quad (4.12)$$

missä I_C on kollektorivirta ja I_B kantavirta. Mikäli virtaa ei vielä pystytä tuottamaan tarpeeksi, voidaan virtavahvistusta kasvattaa niin sanotulla Darlingtonin parilla, kuva 13. Tässä kytkennässä liitetään kaksi transistoria peräkkäin siten, että saadaan vahvistusta molemmista.



Kuva 16 Darlingtonin parin kytkentäkaavio.

Darlingtonin virtavahvistus on yksinkertaisesti transistorien virtavahvistusten kertolasku

$$A_i = \beta_1 \beta_2. \quad (4.13)$$

Kuvassa 13 on vain NPN-transistoreilla toteutettu vahvistus, mutta lisäämällä siihen PNP-transistoreista tehdyn vastaavan kuvan 12 mukaisesti, saadaan luotua B-tyyppin virtavahvistus.

4.5 Moottorin sammutus

Lakitekstin mukaisesti moottori ei saa toimia, mikäli polkupyörän nopeus ylittää 25 km/h nopeuden. Valmistaja käyttäneen tässä moottorin vaiheiden ja Hall-anturien antamia signaaleja hyväkseen ja katkaisee sitten avustamisen. Edellä päätettiin käyttää amplitu-

4.7 Komponenttien mitoitus

Simulointiohjelman kirjastoista ei löydy testauslaboratoriosta löytyviä komponentteja, joten simulointitulokset ovat melko ideaalisia. Tästä syystä komponenttiarvoja täytyy hieman vaihdella testausvaiheessa. Käytettävät komponentit simulointitulosten perusteella.

Taulukko 1. Suunniteltavan piirin simuloitussa käytettävien komponenttien tietoja.

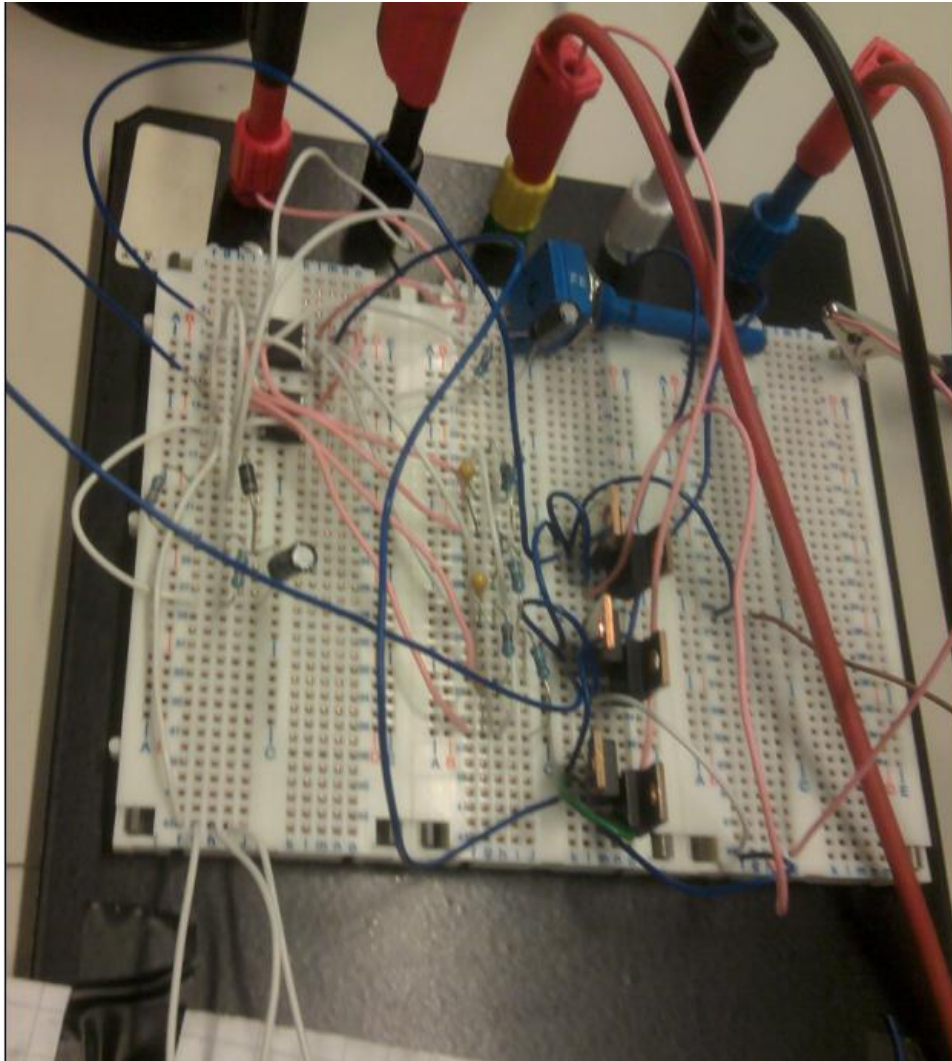
Komponentti	Arvo/Malli	Komponentti	Arvo/Malli	Komponentti	Arvo/Malli
R1	33 k Ω	R14	1,4 k Ω	C3	200 nF
R2	100 k Ω	R15	10 k Ω	C4	200 nF
R3, R5, R7	220 k Ω	R16	10 Ω	C5	10 μ F
R4, R6, R8	1000 k Ω	Rpot	10 k Ω	Oparit	LT1886
R12	10 k Ω	C1	10 μ F	BJT-NPN	
R13	10 k Ω	C2	200 nF	BJT-PNP	

Kuten sanottua, laboratoriossa ei ole samoja komponentteja, joten käytetään parhaimpia tarjolla olevia. Operaatiovahvistin valitaan käyttöjännitteen perusteella, mikä on LM833:lla riittävä sovelluksen kannalta eli $V_{\text{supply}}=36$ V. Valmistajan datalehdessä ei lue lähtövirrasta mitään, mutta tyypillinen arvo operaatiovahvistimelle on 30-100 mA, joten oletetaan sen olevan hyvin pieni.

Virtavahvistus täytyy edellisen oletuksen mukaan olla suuri, jotta saatava virta on noin ampeerin suuruinen. Laboratorion tarvikkeista ainoat BJT-transistorit, mitkä kestävät tarvittavan tehon ovat MJE15032 (NPN) ja MJE15033 (PNP). Virtavahvistusta luvataan enimmillään 50-kertainen. Vaikka lähtövirta olisi 30 mA, saataisiin virtaa silti 1,5 A.

5. SÄÄTIMEN RAKENTAMINEN

Ennen varsinaisen säätimen rakentamista toteutetaan kytkentä laboratorioissa kytkentäalustalla. Kuvan 18 mukainen kytkentä on esitetty valokuvana kuvassa 16. Kytkenässä ei ole mukana Hall-elementtiä eikä lataussysteemiä.



Kuva 18 Suunnittelun säätimen toteutus kytkentäalustalla.

Kuvassa vasemmalla ylhäällä on oskillaattorikytkentä ja oikealla BJT-transistoreilla toteutettu virtavahvistus. Kuvan ylälaidasta lähtee johtimet moottorille ja alalaidassa on moottorin paluujohtimet.

5.1 Piirilevysuunnittelu

Koekytkentäalustalla tehtävät kytkennät ovat epäselviä ja piiriin tehtävät muutokset aiheuttavat helposti virhetilanteita. Pitkät johdot ja kulunut kytkentälevy aiheuttavat mittauksiin

virheitä. Lisäksi mitta-antureiden sijoittaminen kytkentään on hankalaa. Piirin eri osioiden toiminnallisuuden testaamisen jälkeen on syytä suunnitella piirilevy.

Piirilevyn suunnitteluun käytetään KiCAD ohjelmistoa. Koska lataussysteemi ja polkutunnistin ovat fyysisesti sijoitettu kauas muusta säätölaitteistosta, jätetään ne myös piirilevyä pois. Ne on helppo liittää levyyn jälkikäteen oheispiireinä.

KiCAD ohjelmalla piirilevyn suunnittelu on helppoa. Ensin piirretään suunniteltu piirikaavio. Tämän jälkeen lisätään osille selitteet ja listataan eri verkot eli määrätään piirissä olevat solmupisteet. Kun nämä on tehty, valitaan komponenttikirjastosta millaiset liitännät kulkevat komponentille halutaan. Lopuksi siirretään malli Pcbnew editoriin, jossa varsinainen piirilevy suunnitellaan.

Komponenttien paikat tulevat editoriin kasassa, joten ne täytyy sijoitella levyille itse. Sijoittelussa on tärkeää, että ristikkäin olevia kuparointeja tulee mahdollisimman vähän, kuparointeja tulee mahdollisimman vähän ja muodostuvat silmukat ovat mahdollisimman pieniä, jottei synny EMC ongelmia. Lisäksi eniten kuumenevat komponentit tulee sijoittaa lähelle reunoja hyvän luonnollisen konvektiojäähdytyksen takia. Tässä sovelluksessa lämpötilojen nousun ei pitäisi aiheuttaa ongelmaa johtuen lyhyistä käyttöajoista ja pitkistä jäähtymisajoista käyttöjen välissä. Väärinkäyttönä ylikuumenemista voi tapahtua, mutta se vaatii jo tarkoituksellista vahingontuottamista. Laboratorio-olosuhteissa piiriä testattiin kymmeniä minutteja putkeen, eikä lämpötila noussut lähellekään kriittistä 125 °C:n rajaa, mikä voi vaurioittaa puolijohdekomponentteja.

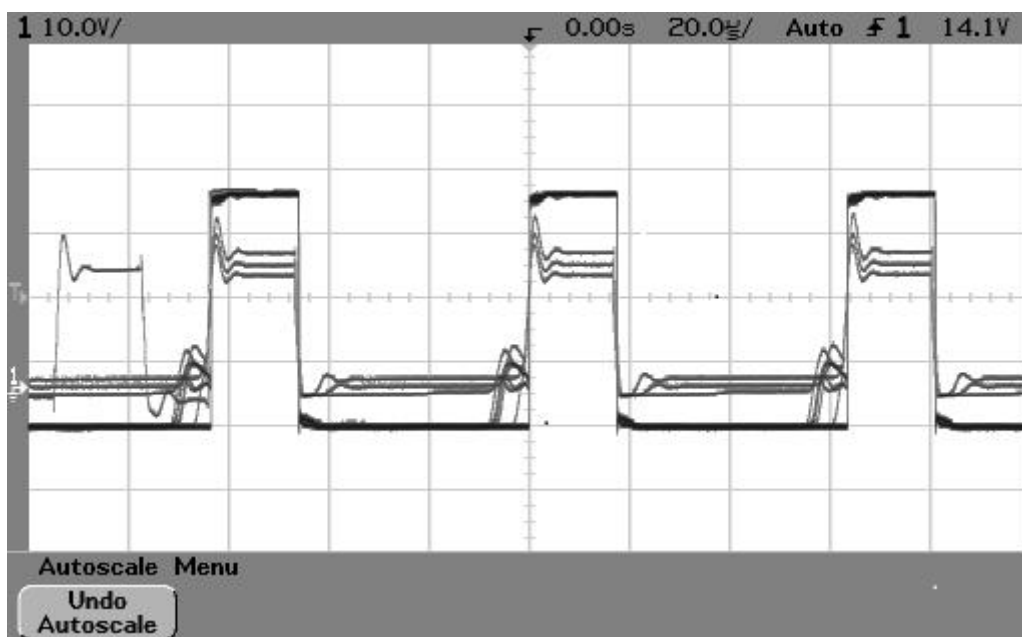
Komponenttipaikkojen sijoittelun jälkeen vedetään kupariliitokset. Tähän käytetään *Auto-router*-ominaisuutta, joka optimoi reitit. Luodaan vielä maatasot levyn molemmille puolille ja määritetään levyn ulkoreunat ja piirilevy on valmis. Kuvassa 19 on piirilevyn suunnitelukuva, jossa maataso on piilotettuna selvyden takia.

6. TESTAUS JA VERTAILU VALMISTAJAN SÄÄTIMEEN

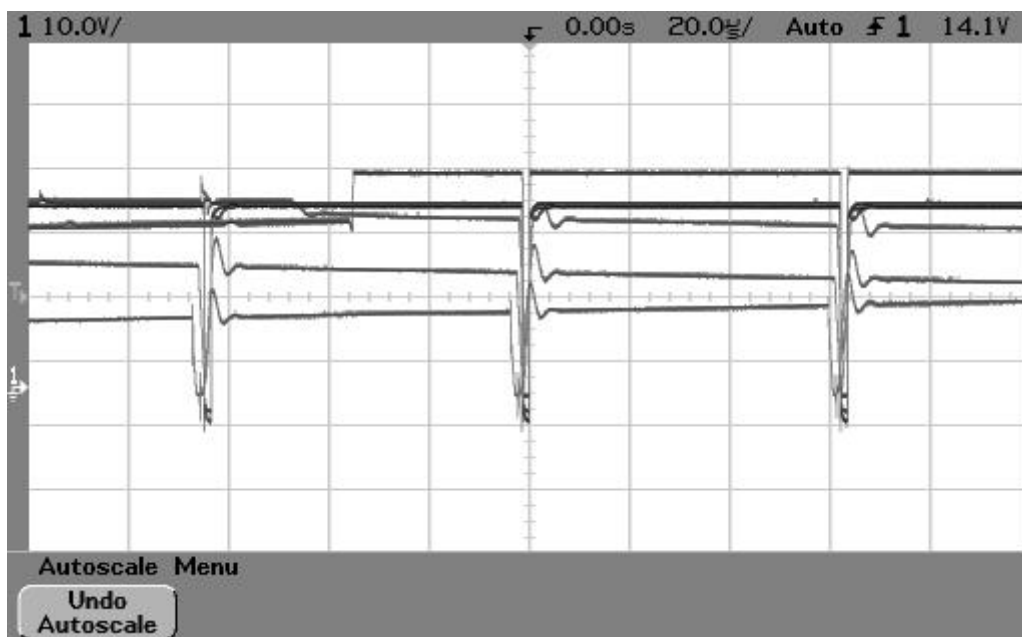
Tähän asti säädintä on tarkasteltu teoreettisella tasolla ja simuloimalla. Niiden antamiin tuloksiin täytyy kuitenkin suhtautua kriittisesti varsinkin, kun simulointiohjelman kirjastosta ei löydy käytettäviä komponentteja. Simulointitulokset eivät myöskään anna tietoa, toimii-ko säädin oikeasti vai onko esimerkiksi teorian tuntemuksessa puutetta.

6.1 Testaus laboratorio-olosuhteissa

Tarkastellaan ensin miten valmistajan säädin käyttäytyy laboratorio-olosuhteissa. Suorite-aan mittaukset asettamalla polkupyörä väärinpäin lattialle ja polkemalla sitä ilman kuormaa. Tietysti laakereiden ynnä muiden pyörässä kiinteästi olevien komponenttien kitkahäviöt aiheuttavat pientä kuormitusta. Tallennetaan oskilloskoopilla yhdelle vaiheelle tulevan jännitteen kuvaajat oskilloskoopilla kahdella selkeästi erillisellä avustuksella, kuvat 20 ja 21.



Kuva 20 Yhdelle vaiheelle tulevan jännitteen käyrämuoto, kun kaasukahvaa käännetään hieman. Kuvassa näkyy useita aaltoja, mutta tummalla näkyvä ja amplitudiltaan suurin aalto on mitattu vaiheen jännite. Muut aallot ovat mittauksessa esiintynyttä häiriötä. Häiriötä aiheuttavat muun muassa harmoniset aallot, mittalaitteet, kaasukahvan portaaton säätö ja liitännät.

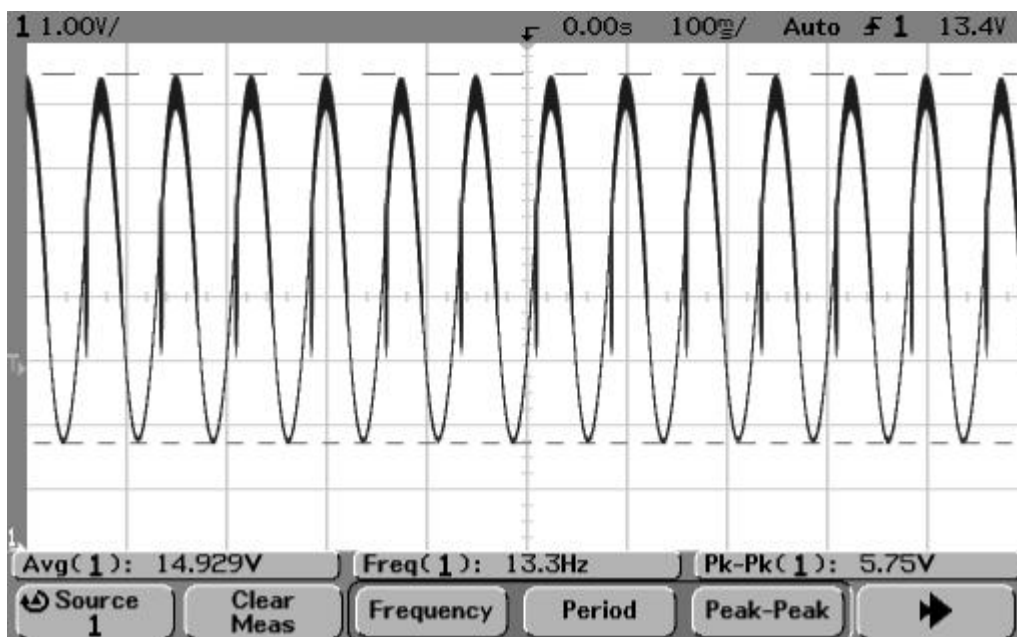


Kuva 21 Yhden vaiheen jännitteen käyrämuoto, kun kaasukahvaa käännetään paljon eli ajettaessa täydellä nopeudella. Kuvassa on erotettavissa useita eri aaltoja, mutta tummin aalloista on mitattu aalto. Häiriötä aiheuttavat samat tekijät kuin kuvan 20 tapauksessa.

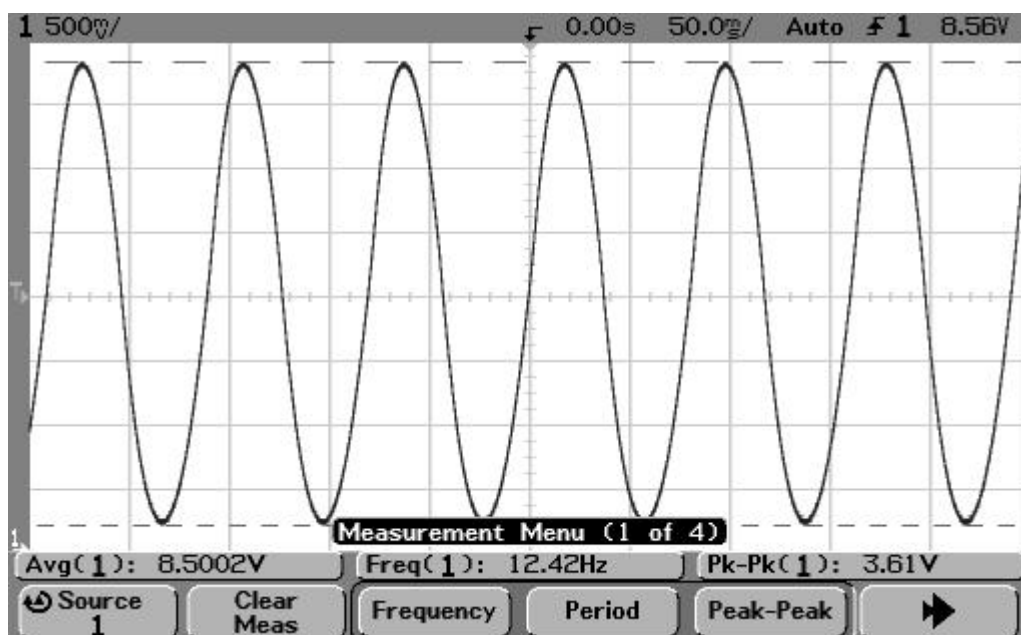
Kuvista huomataan, että moottorin tehoa, ja siten vääntömomenttia muutetaan muuttamalla jännitepulsstin leveyttä. Käyttöjännite on noin 36 V ja vaiheelle tuleva jännite on noin +/- 14 V. Vaihejännite kerrottuna kolmella on siis likimain yhtä paljon kuin käyttöjännite.

Erikoisinta valitun valmistajan säätimessä on se, että se ei täytä lain asettamia vaatimuksia. Moottorin käynnistäminen vaatii kyllä polkemisen, mutta sen jälkeen pedaleciä voi ajaa sähköpyöränä. Toisin sanoen polkimien Hall-anturilta ei tarvitse tuottaa jatkuvasti Hall-jännitettä, jotta moottori pyörisi.

Mitataan seuraavaksi oman säätimen jännitekäyrä kahdella selkeästi erilaisella avustuksella, kuvat 22 ja 23. Erotuksena valmistajan säätimeen on se, että kaasukahvaa käännettäessä kasvaa jännite eikä taajuus.



Kuva 22 Suunnitellun säätimen käyrämuoto käänettäessä kaasukahvaa reilusti.



Kuva 23 Suunnitellun säätimen käyrämuoto käänettäessä kaasukahvaa hieman.

Vaikka kuvat ovatkin piirretty hieman eri aika-akselilla johtuen oskilloskoopin *autoset*-toiminnosta, huomataan, ettei taajuus juurikaan vaihtelee, mutta jännitettä saadaan muutettua helposti kaasua kääntämällä. Kuvassa 22 jännitteen huippuarvo on noin 17,8 V ja kuvassa 23 noin 10,3 V. Ongelmaksi muodostuu nyt se, että piirin nollassa ei ole tasolla, jossa jännite olisi 0 V. Varsinkin suuremmalla jännitteellä oskillaattorien negatiivisiin käyttöjännitteisiin tulee paljon positiivista jännitettä. Kuvan 22 tilanteessa ei vielä ajeta täydellä nopeudella, mutta pienin jännite on hieman alle 10 V. Tämä ongelma tekee sen, että vai-

heet ovat jatkuvasti positiivisena ja siten vastustavat toinen toisiaan. Koska simuloinnissa tätä ongelmaa ei tule käytettäessä hyviä komponentteja, voidaan se osin laittaa huonojen komponenttien syyksi. Toinen syy on se, että jokainen vaihe on suoraan yhteydessä toisensa maahan, ja oskillointi aiheuttaa häiriötä. Alle 10 V:n huippujännitteellä oskillointi pysyy vielä halutunlaisena. Todennäköisin virhelähde on se, että säädin ei pysty syöttämään moottorille riittävästi virtaa, joten kaikkea jännitettä ei pystytä käyttämään hyödyksi. Ongelmaa voidaan yrittää korjata vaihtamalla operaatiovahvistimet paremmiksi tai kasvattamalla virtavahvistusta.

Ideaalitapauksessa käyttöjännite voidaan laskea kertomalla vaihejännite kolmella ja jakamalla se sitten neliöjuuri kahdella, jolloin saadaan tehollisarvo. Reilulla kaasulla ajettaessa käyttöjännite on yli 30 V.

Valmistajan säätimen tapauksessa vääntöä ja pyörimisnopeutta saadaan lisättyä kasvattamalla pulssinleveyttä yhtälöiden 4.7 ja 4.8 mukaisesti. Oman säätimen tapauksessa pyörimisnopeus pidetään vakiona, joten vääntöä kasvatetaan lisäämällä jännitteen amplitudia. Molemmissa tapauksissa käyttöjännite saadaan lähelle nimellistä.

7. YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli tarkastella, onko sähköavusteiselle polkupyörälle mahdollista tehdä ohjausyksikkö, joka hyödyntää jotain muuta menetelmää kuin pulssinleveysmodulointia. Työssä päädyttiin käyttämään amplitudimodulaatiota. Vääntömomenttisäädin suunniteltiin ensin teoriapohjalta, jonka jälkeen suunniteltiin simulointimalli ja lopuksi säädintä testattiin laboratoriossa.

Teorian ja simuloinnin perusteella säädin toimii juuri niin kuin pitääkin, mutta laboratoriossa ongelmaksi muodostui tarvittavien komponenttien puute. Tästä syystä säädin syöttää aina positiivista jännitettä jokaiseen vaiheeseen, joten vaiheet vastustavat toinen toisiaan. Pienellä ulkoisella avustuksella moottori hieman ylläpitää liikettä, mutta riittävän virran puutteessa liike on hidastuvaa. Varsinkin moottorin käynnistäminen paikaltaan on käytetyillä komponenteilla mahdottomuus. Säädin ei siis käytetyillä komponenteilla sovellu tarkoitukseen, mutta paremmilla komponenteilla se toimisi.

Seuraavaksi tutkimusta jatketaan tilaamalla valmistajilla mahdollisimman hyvin simulointimallissa käytettyjä komponentteja vastaavat komponentit. Lisäksi kappaleessa 4.1 esitelty piirilevy on tilauksessa.

LÄHTEET

- Aura, L., Tonteri, A., 1986. *Sähkömiehen käsikirja. 2, Sähkökoneet*. Porvoo: WSOY
- Aura, L., Tonteri, A., 1986. *Sähkömiehen käsikirja. 3, Tehoelektroniikka ja sähkökoneiden käyttö*. Porvoo: WSOY
- Electro-Craft Corp, 1980. *DC MOTORS SPEED CONTROL SERVO SYSTEMS*, 5. painos, Hopkins: Electro-Craft Corp.
- Euroopan parlamentti ja neuvosto, 2002, *Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2002/24/EY, annettu 18 päivänä maaliskuuta 2002, kaksi- ja kolmipyöräisten moottoriajoneuvojen tyyppihyväksynnästä ja neuvoston direktiivin 92/61/ETY kumoamisesta (ETA:n kannalta merkityksellinen teksti)*, Saatavilla: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32002L0024:FI:NOT>
- Floyd, T., 2007. *Electronics Fundamentals: Circuits, Devices, and Applications*, 7. painos
- Hsu, R.C., 2012. *A Reinforcement-Learning-Based Assisted Power Management With QoR Provisioning for Human-Electric Hybrid Bicycle*, Julkaistu: IEEE Transactions On Industrial Electronics. Saatavilla: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5746522 [Viitattu 13.6.2012]
- Kenjo, T., Nagamori, S., 1985. *Permanent-Magnet and Brushless DC Motors*, 1. painos. Oxford: Clarendon Press
- Khabbal, J., 2012. Kandidaatintyö, *Sähköavusteisen polkupyörän energian talteenotto lineaarigeneraattorilla*, Julkaistaan LUTPub:ssa
- Niiranen, J., 2000. *Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus*. s.247-258. Helsinki: Otatieto
- Pietro, P., 2000, *Cycling on Earth, in Space, on the Moon*, European Journal of Applied Physiology.
- Ramsden, E., 2006. *Hall-effect sensors – Theory and applications*, 2. painos, Eletroninen aineisto: http://www.knovel.com/web/portal/basic_search/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=1653 [viitattu 26.3.2012]
- Rudwick, L., A., 1981. *Motor and Pedal Driven Bicycles*, United States Patents, Patentti nro. 4,280,581

Starschich, E, 2007. *Comparison of the Performances of Different Geared Brushless-DC Motor Drives for Electric Bicycles*, Julkaistu: Electric Machines & Drives Conference. Saatavilla: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04270629> [Viitattu 18.5.2012]

Suomen Laki, 2011, *Ajoneuvolaki 11.12.2002/1090*, Helsinki: Talentum

Suomen Tulli, 2010. *Tavaratilastoja; Vuosi 2010* [Verkkajulkaisu]. Saatavilla http://www.tulli.fi/fi/suomen_tulli/ulkomaankauppatilastot/tilastoja/tavaratilastoja/vuodet/index.jsp [Viitattu 17.4.2012]

Swizzbee, 2004. *First Fast Pedelec Legal in the EU*, saatavilla: <http://extraenergy.org/main.php?language=en&category=information&subcateg=39&id=754> [Viitattu 29.12.2011]

Taponen, S., *Sähköfillari on kallis kesähitti*, Taloussanomien 22.3.2008, [Verkkajulkaisu]. Saatavilla: <http://www.taloussanomien.fi/kauppa/2008/03/22/sahkofillari-on-kallis-kesahitti/20088161/12> [Viitattu 16.3.2012]

Valokuva polkupyörästä



Voimalaskuissa käytetty MatLab –koodi

```
m=100;
g=9.81;
Crr=0.005;
n=0.7;
valityys=2.3;
roo=1.293;
C=0.7;
v=20/3.6;
A=0.9;
a=0:0.01:12*pi/180;
N=m*g*cos(a);
Fv=Crr*N;
Fg=m*g*sin(a);
Fi=0.5*roo*v^2*A*C;
kok=(Fv+Fi+Fg)/n*valityys*0.3;
plot(a*180/pi,kok)
hold on
v2=15/3.6;
Fi2=0.5*roo*v2^2*A*C;
kok2=(Fv+Fi2+Fg)/n*valityys*0.3;
plot(a*180/pi,kok2,'r')
v3=10/3.6;
Fi3=0.5*roo*v3^2*A*C;
kok3=(Fv+Fi3+Fg)/n*valityys*0.3;
plot(a*180/pi,kok3,'k')
```