

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Sähkötekniikan osasto
Sähkönkäyttötekniikan laboratorio

TELESKOOPPIMASTON SÄHKÖKÄYTTÖJEN

SUUNNITTELU JA KEHITTÄMINEN

Työn ohjaajana on toiminut DI Harri Karhapää ja tarkastajina ovat toimineet professori Juha Pyrhönen ja DI Harri Karhapää

Lappeenrannassa 01.08.2007

Mikko Pääkkönen
Punkkerikatu 2A 30
53850 Lappeenranta
Puh. +358503711328

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Sähkötekniikan osasto

Mikko Pääkkönen

Teleskooppimaston sähkökäyttöjen suunnittelu ja kehittäminen

Diplomityö

2007

78 sivua, 28 kuvaa, 4 taulukkoa ja 6 liitettä

Tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen
 DI Harri Karhapää

Hakusanat: teleskooppimasto, sähkökäyttö, vinssijärjestelmä, vääntö-
 momenttisäätö

Työssä kehitettiin kahdesta sähkökäytöstä ja erillisistä vinsseistä koostuva teleskooppimaston putkien nostamiseen ja laskemiseen tarkoitettu vinssijärjestelmä. Järjestelmällä voidaan korvata mekaanisesti monimutkainen ja painava yhdellä sähkökäytöllä toteutettu vinssijärjestelmä.

Järjestelmän sähkökäytöt käyttävät vinssien välityksellä mastoon kiinnitettyjä hihnoja. Toinen sähkökäyttöistä on säätämätön ja toinen vääntömomenttisäädetty. Säätämätön sähkökäyttö määrää maston nosto- ja laskunopeuden. Vääntömomenttisäädetty sähkökäyttö pitää mastoa käyttävät hihnat sopivalla kireydellä, jolloin maston nostaminen ja laskeminen voivat tapahtua hallitusti.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology

Department of Electrical Engineering

Mikko Pääkkönen

Design and development of an electric drive system for a telescopic mast

Master's thesis

2007

78 pages, 28 figures, 4 tables and 6 appendices

Examiners: Professor Juha Pyrhönen,
 M. Sc. Harri Karhapää

Keywords: telescopic mast, electric drives, winch system, torque control

In this thesis, a winch system that consists of two electric drives and two winches was developed. In a telescopic mast, the winch system is used to lift up and take down the mast sections, and it provides a substitute for the conventional complex and heavy mechanical winch system, which consists of only one electric drive.

The electric drives of the winch system operate the mast by winches and belts. One of the electric drives is non-adjustable, and it determines how fast the mast is raised and lowered. The other electric drive operates with torque control, and it adjusts the tension of the belts in the mast.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty yhteistyössä joensuulaisen Mastsystem Int'l Oy:n kanssa, joka toimi myös työn rahoittajana. Työ liittyy yrityksessä tehtävään tuotekehitysprojektiin.

Työn tarkastajana toimi professori Juha Pyrhönen, jota haluan kiittää työni aikana saamistani ohjeista ja neuvoista. Työn ohjaajana ja toisena tarkastajana toimi DI Harri Karhapää, jolle haluan antaa erikoiskiitoksen lukuisista rakentavista keskusteluista ja neuvoista, jotka edesauttoivat työn etenemistä. Käytännön työhön ja maston toimintaan liittyvissä ongelmissa asentaja Heikki Sykön apu oli minulle korvaamaton, siitä hänelle erikoiskiitokset. Lisäksi haluan kiittää koko Mastsystem Int'l Oy:n henkilökuntaa ja kaikkia muita tämän työn valmistumista edesauttaneita henkilöitä kannustavasta ilmapiiristä ja neuvoista.

Lappeenrannassa 1.8.2007

Mikko Pääkkönen

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET	8
1. JOHDANTO	11
1.1 Komposiittimaston rakenne.....	12
1.2 Tuotekehitysongelma	14
1.3 Työn taustat ja tavoite	18
1.4 Työn sisältö	20
2. MASTON SÄHKÖKÄYTÖN RAKENNE JA TOIMINTA.....	21
2.1 Moottori.....	22
2.1.1 Tasavirtamoottorin toimintaperiaate	23
2.2 Voimansiirto	24
2.2.1 Vaihde	25
2.2.2 Vinssi.....	26
3. TASAVIRTAMOOTTORIN OHJAUS- JA SÄÄTÖPERIAATTEET	28
3.1 Tasavirtamoottorin ohjaaminen.....	28
3.2 Sääntötekniikka tasavirtakäytön ohjauksessa.....	32
4. MASTOLLE SUORITETUT SIMULOINNIT.....	35
4.1 Simulointimalli mastoa nostettaessa.....	35
4.1.1 Mastoa nostava moottori	36
4.1.2 Nostavan käytön välityssuhde	38
4.1.3 Hihnojen siirtofunktiot	40
4.1.4 Mastoputkien massa ja kitka sekä latvakuorman vaikutus.....	41
4.1.5 Mastoa laskevan sähkökäytön toiminta.....	44
4.1.6 Simulointitulokset nostettaessa mastoa	45
4.2 Simulointimalli mastoa laskettaessa	47

4.2.1	Mastoa nostava moottori	48
4.2.2	Nostavan käytön välityssuhde	49
4.2.3	Hihnojen siirtofunktiot	50
4.2.4	Mastoputkien massa ja kitka sekä latvakuorman vaikutus.....	50
4.2.5	Mastoa laskevan sähkökäytön toiminta.....	50
4.2.6	Simulointitulokset laskettaessa mastoa	51
4.3	Yhteenvedo.....	53
5.	LOPULLINEN PROTOTYYPILAITTEISTO JA SEN RAKENNE	55
5.1	Laitteiston toimintaperiaate eri tilanteissa	55
5.1.1	Maston nostaminen	55
5.1.2	Maston laskeminen.....	56
5.1.3	Jumiutumistilanteen poistaminen.....	56
5.2	Sähkökäyttöjen ohjaus	57
5.2.1	Moottorinohjaimen toiminta ja sen soveltaminen vääntömomenttisäätöön	57
5.3	Moottorit ja voimansiirto	62
5.3.1	Moottorit.....	64
5.3.2	Vaihteet.....	64
5.3.3	Vinssit.....	64
5.3.4	Välityssuhteiden mitoittaminen	65
5.3.5	Muita järjestelmän käytössä huomioitavia tekijöitä.....	66
5.4	Sähkökäyttöjärjestelmän ylikuormitussuojaus	67
5.5	Kustannustarkastelu	67
5.6	Järjestelmän sähkömagneettinen yhteensopivuus	68
5.7	Laitteiston jatkokehitys	69
6.	ERI LAITTEISTOVERSIOILLE SUORITETUT TESTAUKSET JA MITTAUKSET	71
6.1	Mittaustulokset ja johtopäätökset	71
6.1.1	Tuplarumpuvinssijärjestelmä.....	71

6.1.2	Nopeussäädetty sähkökäyttöjärjestelmä.....	72
6.1.3	Vääntösäädetty sähkökäyttöjärjestelmä	73
7.	YHTEENVETO	75
	LÄHTEET	77
LIITE I:	M-tiedosto simulointeja varten	
LIITE II:	EM-115-moottorinohjaimen tekniset tiedot	
LIITE III:	Ohjauselektroniiikan kytkentäkaaviot	
LIITE IV:	Sähkökäyttöjärjestelmän käyttöönotto ja säätö	
LIITE V:	Prototyypin osaluettelo	
LIITE VI:	Tuloste välityssuhteiden laskentaan käytettävästä Excel-talukosta	

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

B	Moottorin kitkamomentti
B_m	Maston kitkavoima
C	Konevakio
D	Kytentäkerroin
d_{av}	Vinssirummun halkaisija simuloinnin puolivälissä
F_l	Laskuhihnan jännitys
F_n	Nostohihnan jännitys
g	painovoiman kiihtyvyys
I_a	Ankkurivirta
I_{teor}	Teoreettinen tyhjäkäyntivirta
I_{tod}	Todellinen tyhjäkäyntivirta
J	Moottorin hitausmomentti
J_m	Maston hitausmassa
k	Integraalin kulmakerroin
K_l	Laskuhihnan torsionaalinen jousivakio
k_m	Moottorista riippuva vakio
K_n	Nostohihnan torsionaalinen jousivakio
k_e	Moottorin jännitevakio
k_t	Moottorin vääntömomenttivakio
l	Integraalin alkuarvo
L_a	Ankkuripiirin induktanssi
n	Integraalin alkuarvo
n	Pyörimisnopeus
n_1	Nostavan käytön kokonaisvälityssuhde
n_2	Laskevan käytön kokonaisvälityssuhde
n_{vaihte}	Vaihteen välityssuhde
n_{vinssi}	Vinssin välityssuhde
P	Moottorin teho
R_a	Ankkuripiirin resistanssi

R_{SHUNTTI}	Shunttivastuksen resistanssi
r_l	Laskevan vinssin rummun säde
r_n	Nostavan vinssin rummun säde
u	Takaisinkytkentäkerroin moottorin ankkurivirrälle
T	Vääntömomentti
T_l	Laskevan moottorin vääntömomentti
T_m	Moottorin akselivääntömomentti
T_n	Nostavan moottorin vääntömomentti
T_r	Vinssin rummun akselivääntömomentti
T_v	Vaihteen toisiovääntömomentti
t	Aika
U_a	Ankkurijännite
U_{dc}	Tasajännitelähteen jännite
U_{OHJE}	Säätimen jänniteohje
U_{OLO}	Säätimen saama oloarvo
v_m	Maston nopeus
W_{nosto}	Maston nostamiseen kuluva työ

Kreikkalaiset aakkoset:

π	Pi:n likiarvo
Φ	Ilmavälivuo
φ	Akselin päiden välinen kiertymä
ω_m	Moottorin akselin kulmanopeus
ω_r	Vinssin akselin kulmanopeus
ω_v	Vaihteen toisioakselin kulmanopeus

Lyhenteet:

AC	Vaihtovirta (alternating current)
DC	Tasavirta (direct current)
EX	Mastsystem Int'l Oy:n valmistama mastoperhe
EXB	Mastsystem Int'l Oy:n valmistama mastoperhe
EXL	Mastsystem Int'l Oy:n valmistama mastoperhe
IP54	Kotelointiluokka
P	Vahvistava (proportional) säädin
PI	Vahvistava (proportional) ja integroiva (integral) säädin
PID	Vahvistava (proportional), integroiva (integral) ja derivoiva (derivative) säädin
PWM	Pulssinleveysmodulaatio (pulse wide modulation)
RPM	Kierrosta minuutissa (rotations per minute)
S	Puolijohdekytkin
S1	Jatkuva moottorin käyttötapa
S2	Lyhytaikainen moottorin käyttötapa
TM	Mastsystem Int'l Oy:n valmistama mastoperhe
TR	Mastsystem Int'l Oy:n valmistama mastoperhe
TX	Mastsystem Int'l Oy:n valmistama mastoperhe
WPU	Winch Power Unit, vinssiin asennettava sähkökäyttö

1. JOHDANTO

Työn toimeksiantaja, joensuulainen Mastsystem Int'l Oy (myöhemmin tekstissä Mastsystem) valmistaa kevyitä komposiittiteleskooppimastoja lähinnä viestintätarkoituksiin. Mastsystem on osa Iso-Britannialaista Cobham-konserniin kuuluvaa Racal Antennas -yritystä. Tuotevalikoima sisältää kuusi mastoperhettä (TM-, TR-, TX-, EX-, EXL- ja EXB-mastoperheet), joista yritys tekee sovelluksia asiakkaan toiveiden mukaan. /5/

Valtaosa komposiittimastoista menee kansainvälisen puolustusvälineteollisuuden käyttöön, sillä viestiliikenteen ja radiotiedustelun merkitys on keskeinen nykyaikaisessa sodankäynnissä. Kuvassa 1.1. nähdään sotilasajoneuvoon sijoitettu viestimasto.



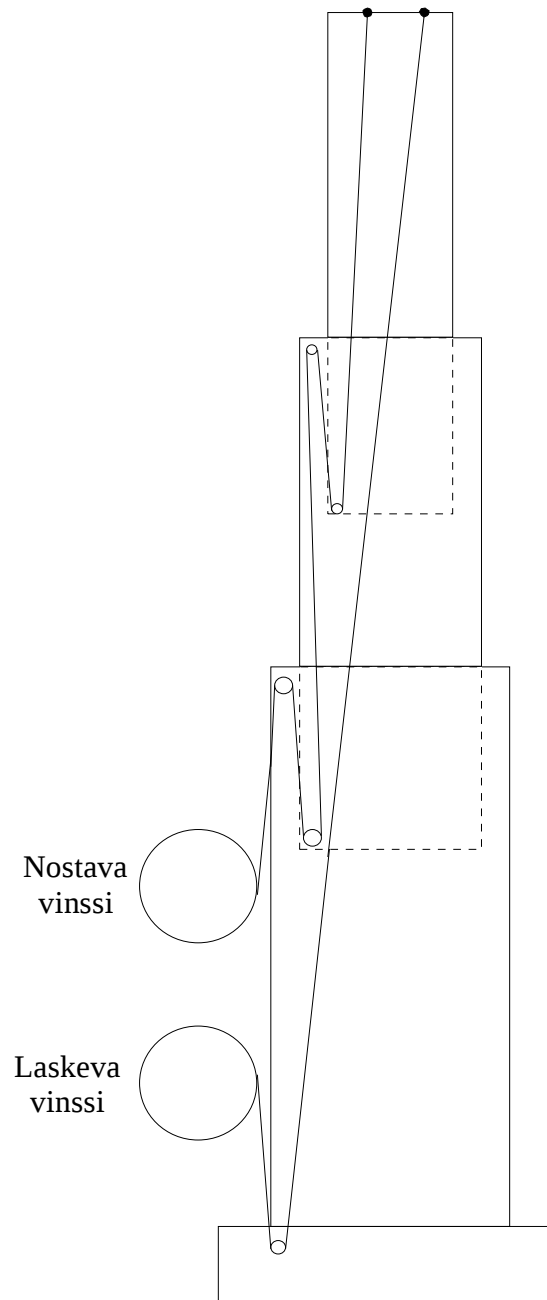
Kuva 1.1. EXB-masto sotilasajoneuvoon kiinnitettynä. (kuva: Mastsystem)

1.1 Komposiittimaston rakenne

Komposiittiteleskooppimasto koostuu sisäkkäisistä komposiittiputkista (sektioista). Putkien määrä ja pituus riippuvat maston mallista ja kokonaispituudesta. Uloin putki toimii maston runkona. Runkoputken sisällä olevat putket nousevat vuorollaan ylös mastoa nostettaessa ja laskeutuvat vastaavasti alas mastoa laskettaessa. Suurikokoisia teleskooppimastoja voidaan nostaa ja laskea vinssimekanismin avulla, jolloin vinssi käyttää hihnaa, joka kiinnitetään toisesta päästään mastoon. Hihnan kulkua ohjataan maston sisällä olevien laakeroitujen hihnarullien avulla. Vinssiä voidaan käyttää joko käsikammen tai sähkökäytön avulla. Nykyisin käytetään kuitenkin pääasiassa sähkökäyttöisiä vinssejä, sillä käsikammen käyttö on vähentynyt viime vuosina.

EXB-mastoissa käytetään yhden hihnan sijasta kahta hihnaa. Toinen hihna nostaa ja kannattaa mastoa ja toinen hihna vetää sitä alaspäin. Alaspäin vetävän hihnan tarkoituksena on varmistaa maston hallittu käyttäytyminen ja laskeutuminen kaikissa olosuhteissa. EXB-maston toimintaperiaate ja hihnan kulku selviävät kuvasta 1.3. EXB-mastojen korkeudet vaihtelevat kuudesta metristä aina 15 metriin saakka. Kahden hihnan mekanismia sovelletaan jatkossa myös EXL-mastoperheessä, jonka pisimmät mastot ovat jopa 50 metriä korkeita.

Tulevaisuudessa sähkökäyttöjen on arveltu yleistyvän edelleen mastoissa. Mastojen ohjausjärjestelmät ovat yhä pidemmälle automatisoituja ja helppokäyttöisempiä käyttäjän näkökulmasta. Sähkökäyttöjen suorituskyvylle asetetaan yhä suurempia vaatimuksia, kun mastojen latvakuormat sekä mastojen nosto- ja laskunopeudet kasvavat.



Kuva 1.3. EXB-maston hihnan kulku ja toimintaperiaate käytettäessä kahta vinssirumpua ja hihnaa. Molemmat hihnat on kiinnitetty maston latvaan ja ne kulkevat laakerirullien kautta vinsseille. Nostava vinssi kelaat hihnaa mastoa nostettaessa samalla, kun laskeva vinssi vapauttaa rummultaan hihnaa. Mastoa laskettaessa laskeva vinssi kelaat hihnaa samalla kun nostava vapauttaa sitä. Kuvaan on selkeyden vuoksi piirretty vain kolme putkisektiota, vaikka todellisuudessa sektioita on enemmän.

1.2 Tuotekehitysongelma

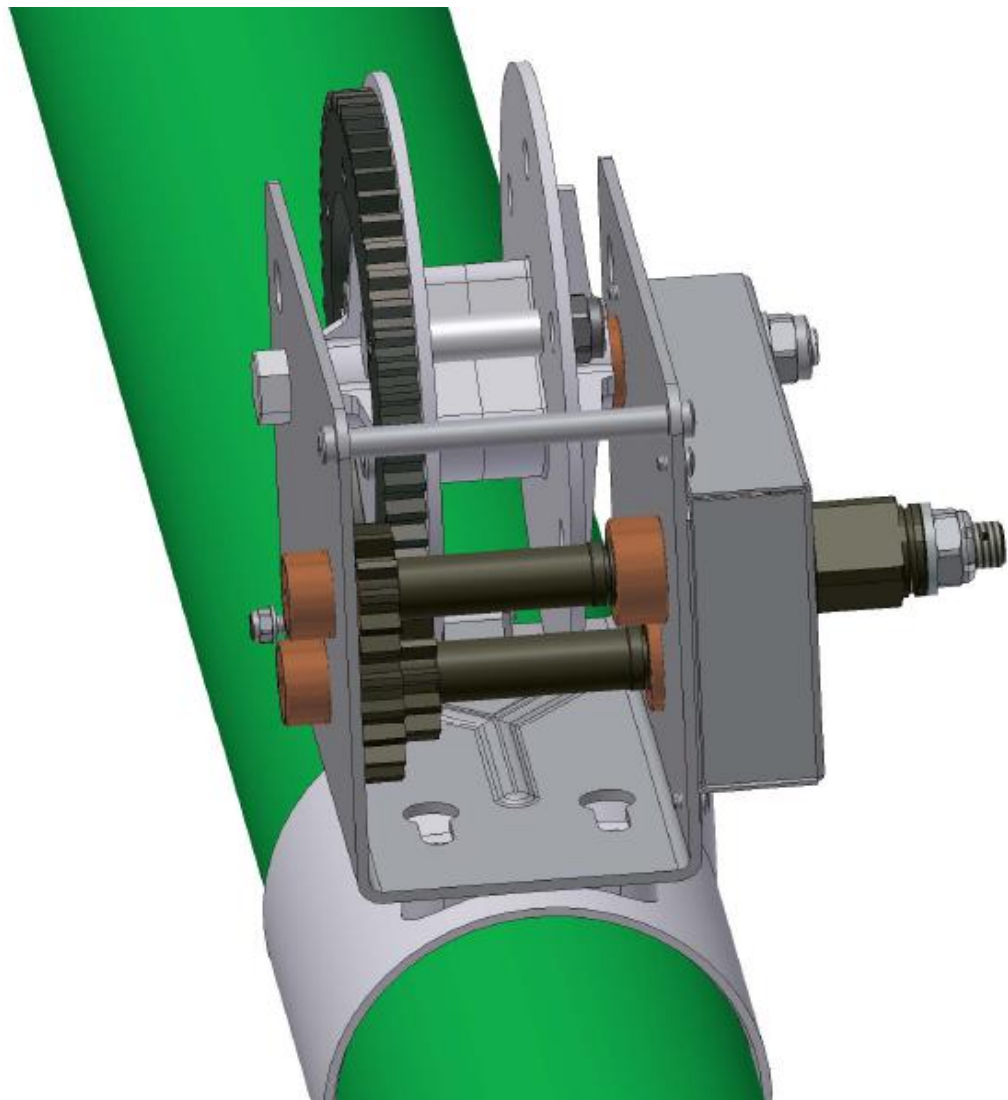
EXB-mastojen kahden hihnan järjestelmä on tähän saakka toteutettu yhdellä moottorilla ja vaihteistolla sekä tuplarumpuvinssillä, jossa kaksi rumpua on kytetty jousien ja hammaspyörien välityksellä vinssin akselille, kuva 1.4. Jousimekanismin tarkoitus on mahdollistaa rumpujen pyöräminen eri nopeuksilla. Pyörimisnopeusero aiheutuu rumpujen halkaisijoiden muuttumisesta sen mukaan, kuinka paljon rummuilla on hihnaa. Rummun pyörimisnopeus on kääntäen verrannollinen rummulla olevaan hihnämäärään verrattuna. Maston ollessa alhaalla mastoa alas vetävällä rummulla on enemmän hihnaa kuin nostavalla rummulla, ja vastavasti kun masto on ylhäällä, nostavalla rummulla on enemmän hihnaa.

Tuplarumpuvinssi on mekaaniselta rakenteeltaan monimutkainen ja hinnaltaan kallis. Lisäksi se on painava ja aiheuttaa mekaanista rasitusta hihnoille ja hihnanohjainrullille, sillä toimiakseen kunnolla tuplarumpuvinssin hihnät täytyy säätää varsin tiukalle. Ylimääräinen rasitus näkyy hihnojen ja hihnarullien laakereiden normaalia lyhyempänä käyttöikänä. Hihnojen venymisen vuoksi hihnoja joudutaan kiristämään säännöllisesti sopivan kireyden ylläpitämiseksi.



Kuva 1.4. Tuplarumpuvinssi EXB-mastoon kiinnitettynä. Molemmat rummut ovat yhteydessä mekaanisten jousten ja hammaspyörien välityksellä vinssin sisään menevälle akselille, joka näkyy vinssin oikealla sivulla. Hihnat eivät sisälly kuvaan. (kuva: Mastsystem)

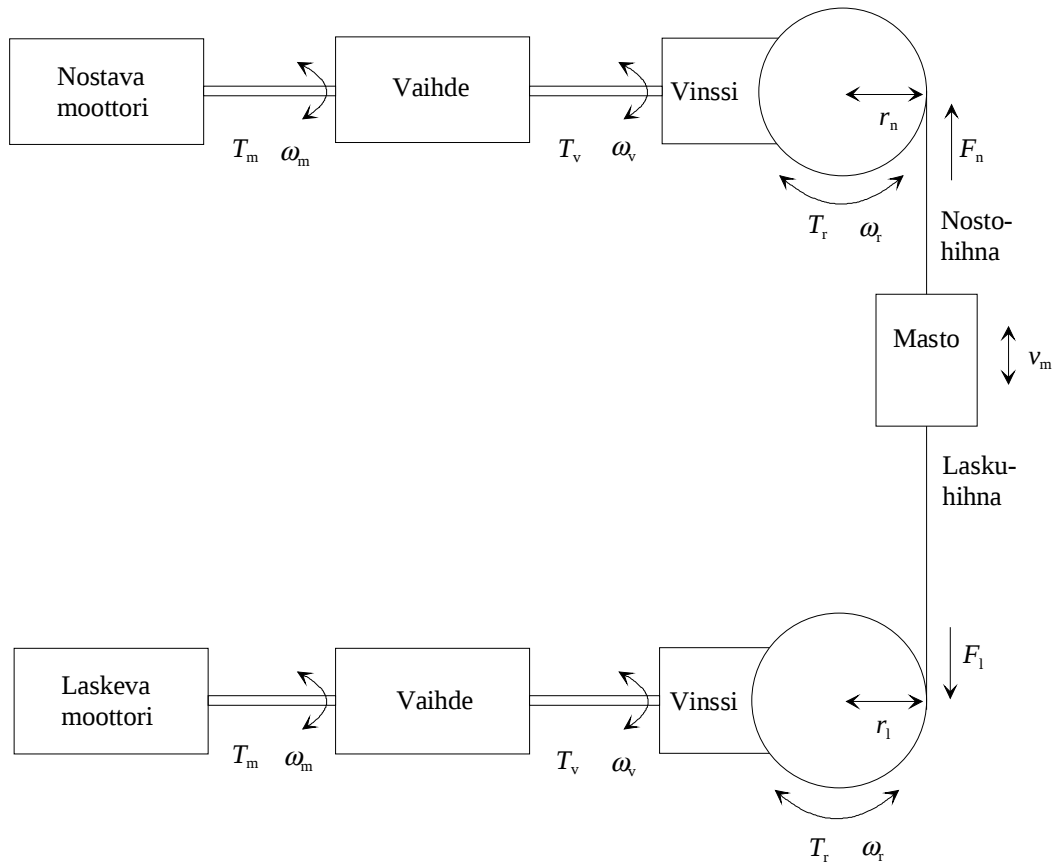
Edellä mainittujen syiden vuoksi tuplarumpuvinssi halutaan korvata kahdella tavallisella yksikelavinssillä ja kahdella sähkökäytöllä. Kuva 1.5 esittää tavallista yksikelavinssiä. Sähkökäyttöjen suunnittelun tärkeimpänä tavoitteena on toteuttaa järjestelmä niin, että mastoa nostava ja laskeva hihna ovat kaikissa tilanteissa sopivalla kireydellä, jolloin masto toimii parhaiten. Tällöin myös hihnoinhin ja hihnarullien laakerointiin kohdistuva mekaaninen rasitus pysyy kohtuullisena ja käyttöikä kasvaa.



Kuva 1.5. Tavallinen yksikelavinssi mastoon kiinnitettynä. Vinssi on rakenteeltaan yksinkertainen, kevyt ja varmatoiminen. (kuva Mastsystem)

Kahden sähkökäytön vinssijärjestelmään liittyvien lähinnä säätötekniisten haasteiden vuoksi työhön ryhdyttäessä ei tiedetty varmuudella, voidaanko tuplarumpuvinssi korvata taloudellisesti kannattavasti kahdella yksikelavinssillä ja sähkökäytöllä. Maston nostoon ja varsinkin laskuun liittyneiden värähtelyongelmien vuoksi työn alkuvaiheessa tehtiin oletus, jonka mukaan maston laskuvaiheen aikana tarvitaan sopivalla vääntömomentilla pyörivä sähkökäyttö pitämään hihnajärjestelmä tiukalla. Vääntösäädetyin sähkökäytön värähtelyalttius, joka voisi johtua hihnojen jousimaisesta venymisestä, oli kuitenkin kysymys, johon ei tiedetty vastausta.

Ongelmanratkaisun helpottamiseksi mastolle ja siihen kytketyille sähkökäyttöille tehdään mekaaninen malli, joka kuvaa maston toimintaan liittyvää mekaniikkaa. Mekaaninen malli on esitetty kuvassa 1.6. Mallissa hihnat ja maston liikkuvat putket kuvataan suoraviivaisesti liikkuvina kappaleina, kuten todellisessakin mastossa.



Kuva 1.6. Kahdella sähkökäytöllä varustetun vinssijärjestelmän mekaaninen malli. Vinssirumpujen säteet r_l ja r_n vaihtelevat rummuilla olevan hihnamäärän mukaan, minkä vuoksi moottorit eivät voi pyöriä samalla nopeudella. Lisäksi sekä nosto- että laskuhihnat venyvät kuormituksen mukaan ja kuormitus (maston paino ja kitka) vaihtelee. Nämä tekijät tekevät järjestelmän suunnittelusta haastavan.

Nosto- ja laskuhihnat venyvät lineaarisesti jännityksen funktiona. Tämä tekee mastojärjestelmästä hankalasti ennakoitavan ja monimutkaisen vinssikäyttöjen suunnittelun kannalta. Lisäksi järjestelmän monien parametrien, kuten kitkavoimien tai hitausmomenttien ja -massojen täsmällinen suuruuden määrittäminen on vaikeaa, joidenkin parametrien osalta jopa mahdotonta.

1.3 Työn taustat ja tavoite

Kahden sähkökäytön vinssijärjestelmää on tutkittu Mastsystemillä jo aiemmin. Lasse Vaittinen on tehnyt aiheesta opinnäytetyön opiskellessaan Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulussa. Työn tuloksena ei kuitenkaan saatu toimivaa vinssijärjestelmää. /16/ Tästä huolimatta Vaittisen opinnäytetyö antaa pohjatietoa siitä, mihin

suuntaan järjestelmää on kehitettävä. Nyt esillä työn tarkoituksena onkin kehittää järjestelmästä toimiva kaupallistettavissa oleva tuote.

Diplomityössä suunnitellaan ja mitoitetaan teleskooppimastoa nostavalle ja laskevalle vinssille erilliset sähkökäytöt. Erityinen painoarvo on sähkökäytön ohjaus- ja säätömenetelmien valinnalla. Teleskooppimaston sähkökäyttöjen tärkeimpänä tehtävänä on nostaa ja laskea masto hallitusti ja riittävän nopeasti. Maston sähkökäyttö koostuu tasavirtamoottorista, vaihteistosta, vinssistä sekä elektroniikasta ja ohjauslaitteista, joilla moottoria ohjataan. Kehitetty kahden sähkökäytön yhdistelmä on tarkoitettu EXB- ja tarvittaessa myös EXL-mastojen nostamiseen ja laskemiseen.

Suunniteltavalle vinssisähkökäytölle asetettiin työn alkaessa joukko vaatimuksia. Seuraavassa esitetään näistä vaatimuksista työn kannalta oleelliset.

- Kuusi metriä korkean maston nostaminen saa kestää enintään 3 minuuttia ja laskeminen enintään 2 minuuttia.
- Käyttöjännitteen nimellisarvo on 24 V (tasajännite) ja keskimääräinen virrankulutus enintään 25 A.
- Kotelointiluokitus vähintään IP54.
- Maston toiminnan on oltava jouhevaa (löysää hihnaa ei saa esiintyä) ja värähtelemätöntä.
- Uuden järjestelmän valmistuskustannukset eivät saa merkittävästi ylittää vanhan tuplarumpuvinssiin perustuvan järjestelmän valmistuskustannuksia.
- Järjestelmän tulee olla toimintavarma vaikeissakin olosuhteissa.

- Järjestelmän tulee soveltua myös EXB-mastoja korkeampiin EXL-mastoihin.

Työssä kehitettävä kahden sähkökäytön järjestelmä koostuu mastoa nostavasta päävinssikäytöstä ja mastoa laskevasta apuvinssikäytöstä. Mastoa nostava sähkökäyttö määrää maston nosto- ja laskunopeuden. Nosto- ja laskunopeuksien tulee olla riittävän suuria. Mastoa nostavan sähkökäytön tulee olla riittävän tehokas, jotta masto nousee myös latvakuorman kanssa riittävällä nopeudella ylös. Mastoa laskevan apuvinssikäytön tehtävänä on varmistaa maston laskeutuminen ja hallittu käyttäytyminen kaikissa tilanteissa, esimerkiksi maston jäätyessä tai muuten jumituessa. Lisäksi mastoa laskevan sähkökäytön täytyy pitää mastoa alas vetävä hihna jatkuvasti sopivalla kireydellä.

1.4 Työn sisältö

Työ koostuu teoriaosasta (luku 2), jossa kuvataan sähkökäytön rakenne ja toiminta pääkomponenteittain sekä kuvataan tuotekehitysongelman kannalta tärkeitä ilmiöitä ja teoriaa. Luvussa 3 kuvataan erikseen tasavirtamoottorin ohjausta ja säätötekniikkaa siinä mittakaavassa, joka on työn kannalta tarpeellista. Luvussa 4 esitellään mastojärjestelmälle suoritettuja simulointeja. Luku 5 käsittelee toteutettua ratkaisua ja sen ominaisuuksia. Suoritetut testaukset ja mittaukset esitellään ja analysoidaan luvussa 6.

2. MASTON SÄHKÖKÄYTÖN RAKENNE JA TOIMINTA

Maston sähkökäyttö koostuu tasavirtamoottorista, vaihteistosta, vinssistä sekä moottoria ohjaavasta elektroniikasta ja säätötekniikasta. Moottorin ohjaus- ja säätöperiaatteita käsitellään luvussa 3. Koteloa, joka sisältää moottorin ja vaihteiston sekä tarvittavat häiriönpoistokomponentit, kutsutaan WPU:ksi (Winch Power Unit). WPU on esitetty kuvassa 2.1.



Kuva 2.1 WPU (Winch Power Unit), joka sisältää kotelon lisäksi tasavirtamoottorin, vaihteiston, tarvittavat häiriönpoistokomponentit moottorille, sekä kiinnittimet, joilla WPU voidaan kiinnittää vinssiin. (kuva: Mastsystem)

2.1 Moottori

Mastojen sähkökäyttöjen moottorityyppi (tasa- tai vaihtovirta) ja nimellisjännite valitaan asiakaskohtaisesti saatavilla olevan käyttöjännitteen perusteella. Valtaosa mastoista toimitetaan 24 V tasavirtakäyttöillä varustettuna. Moottorina on käytetty hiiliharjallista Amer MP 80S/2 -kestomagneettitasavirtamoottoria, jonka nimellisteho on 600 W ja nimellisyörimisnopeus 4200 RPM. Moottori on ulkoisilta mitoiltaan kohtalaisen pieni ja hinnaltaan kilpailijoitaan edullisempi, joten moottorityypin vaihtoon ei ole perusteita, elleivät järjestelmän dynaamiset vaatimukset tai muu toiminnallisuus sitä vaadi.

Perinteinen hiiliharjallinen tasavirtamoottori on yleisesti käytetty moottorityyppi tarkkaa säätöä vaativissa käytöissä. Hyvien säätöominaisuuksien lisäksi tasavirtamoottorin etuna voidaan pitää hyvää hetkellistä kuormitettavuutta. Tasavirtamoottoria voidaan kuormittaa hetkellisesti jopa nimellisvääntömomenttiin verrattuna kolminkertaisella väännöllä. Sen huonona puolena on hiiliharjoista johtuva huollontarve sekä oikosulkumoottoria korkeampi hinta. Viimeksi mainittujen huonojen puolien ja AC-käyttöjen säätötapojen kehittymisen vuoksi säädetyt AC-käytöt ovat viime vuosina korvanneet monilla teollisuuden aloilla DC-käytön. /12/

Tasavirtamoottori voidaan magnetoida kestopagneettien tai magnetointikäämitysten avulla. Magnetointikäämityksien avulla magnetoidut tasavirtamoottorit voidaan jakaa eri luokkiin. Vierasmagnetoidun moottorin magnetointiteho otetaan eri lähteestä kuin ankkuripiirin teho, kun taas sarja- ja sivuvirtamoottorien magnetointiteho otetaan samasta lähteestä ankkuripiirin kanssa. Pienet ja keskikokoiset tasavirtamoottorit on kuitenkin usein järkevintä magnetoida kestopagneettien avulla, koska magnetointikäämin tarvitsema teho on pienissä moottoreissa merkittävä suhteessa moottorin nimellistehoon. Tämä näkyy huonompana hyötysuhteena, sillä magnetointiin kuluva teho ei tuota suoranaisesti vääntömomenttia ja on siten hukcatehoa. Lisäksi kestopagnetoitu tasavirtamoottorikäyttö on kompakti, kun magnetointiteholähde sekä magnetointipiirin johdotukset jäävät pois. Huonona puolena voidaan pitää ilmapäiviuon säädettävyyden puutetta, jolloin esimer-

kiksi kentänheikennysominaisuuksia ei voida lainkaan hyödyntää. Kentänheikennyksen puuttuminen täytyy ottaa huomioon mitoittamalla moottorin nimellisnopeus kaikkiin tilanteisiin riittäväksi. Magnetoinnin säädettävyyden puute tarkoittaa myös sitä, että ankkurivirran säätäminen on ainoa tapa säätää kestopagneettitasavirtamoottorin vääntömomenttia ja vastaavasti ankkurijännitteen säätäminen ainoa tapa säätää pyörimisnopeutta. /10/

2.1.1 Tasavirtamoottorin toimintaperiaate

Tasavirtamoottori muuntaa sähköisen energian pyöriväksi liikkeeksi. Moottorin ja kuorman liikeyhtälö on muotoa

$$T_m = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_k, \quad (2.1)$$

missä T_m on moottorin tuottama vääntömomentti, J käytön hitausmassa, B kitka ja T_k kuorman vääntömomentti.

Tasavirtamoottorin ankkuripiirin jännitteelle U_a pätee yhtälö

$$U_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + k_e n \Phi, \quad (2.2)$$

missä R_a on ankkuripiirin resistanssi, I_a ankkurivirta, L_a ankkuripiirin induktanssi, k_e moottorin jännitevakio, n pyörimisnopeus ja Φ ilmajälivuo. Koska tasavirtamoottorin ankkurivirta on staattisessa tilassa lähes vakio, ei ankkuripiirin induktanssista johtuvaa termiä $L_a \frac{dI_a}{dt}$ tarvitse ottaa huomioon. Yhtälön 2.2 viimeinen termi $k_e n \Phi$ kuvaa moottorin vastasähkömotorista voimaa. Tällöin staattisen tilan pyörimisnopeudelle n saadaan yhtälö

$$n = \frac{U_a - R_a I_a}{k_e \Phi}. \quad (2.3)$$

Tasavirtamoottorin pyörimisnopeus on siis suoraan verrannollinen ankkurijännitteeseen U_a ja kääntäen verrannollinen ilmaväliovuohon Φ . Mikäli moottorin ankkuripiirin resistanssi R_a on riittävän pieni, ei moottorin pyörimisnopeus juurikaan muutu kuormituksen funktiona. Tämän perusteella tasavirtamoottorin pyörimisnopeuden säätö on helppo toteuttaa ankkurijännitettä säätämällä. /1/

Tasavirtamoottorin tuottama vääntömomentti T_m noudattaa yhtälöä

$$T_m = C I_a \Phi, \quad (2.4)$$

missä C on moottorille ominainen konevakio. Tasavirtamoottorin tuottama vääntömomentti on siis suoraan verrannollinen moottorin ankkurivirtaan, kun ilmaväliuvo pidetään vakiona. /1/

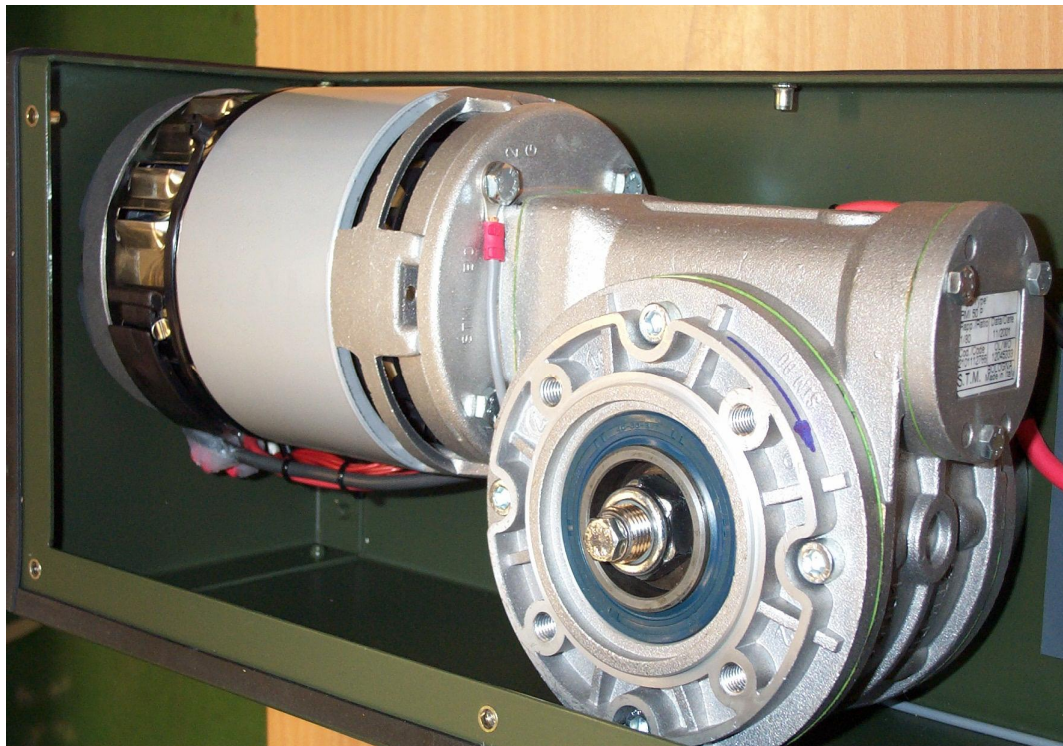
Kestomagneettitasavirtamoottorissa vuo pysyy melko hyvin vakiona, koska kestopomagneettinapojen reluktanssi on suuren tehollisen ilmavälin vuoksi korkea eikä poikittainen ankkurireaktio pääse merkittävästi vaikuttamaan ilmaväliovuohon. Ankkurireaktion pienuuden vuoksi kestopomagneettitasavirtakoneen vääntömomentti on suoraan verrannollinen ankkuripiirin virtaan. Tätä tulosta käytetään hyväksi, kun halutaan säätää tasavirtamoottorin tuottamaa vääntömomenttia ankkurivirtaa säätämällä. /1/ /10/

2.2 Voimansiirto

Vinssikäytön voimansiirto koostuu vaihteesta, vinssistä, hihnasta ja hihnaa ohjaavista laakerirullista, joilla moottorin tuottama vääntömomentti muutetaan maston liikkeeksi.

2.2.1 Vaihde

Vaihteen päätehtävänä on välittää moottorin tuottama akseliteho vinssille ja alentaa samalla pyörimisnopeus sopivaksi. Eri vaihdetyyppien ominaisuudet vaihtelevat jonkin verran. Käytetyin vaihdetyyppi pienissä sähkökäyttöissä on kierukkavaihde, joka näkyy tasavirtamoottoriin liitettynä kuvassa 2.2.



Kuva 2.2. Vinssikäytön tasavirtamoottori ja siihen liitetty kierukkavaihde. (kuva Mastsystem)

Mastsystem on käyttänyt mastojen vinssikäyttöissä kierukkavaihteita, joiden välityssuhteet vaihtelevat välillä 1:20–1:80. Kierukkavaihde on edullinen ja yksinkertainen vaihdetyyppi. Vaihteen hyötysuhde on varsin huono muihin vaihdetyyppeihin verrattuna vaihteessa esiintyvän suuren kitkan vuoksi. Lisäksi kierukkavaihde on tavanomaisilla välityssuhteilla toimittaessa itsepidättyvä. Itsepidättyvyys tarkoittaa sitä, ettei vaihde pyöri yritettäessä pyörittää sitä toisioakselista (vinssiin menevästä akselistä). Tämä estää kierukkavaihteen käytön, silloin kun sähkökäytön tulisi pyöriä hihnan jännityksen aiheuttamana, eli sähkökäytön toi-

miessa generaattorina tai vapaasti kuorman avulla pyörivänä. Kierukkavaihte so-pii tietyin poikkeuksin käytettäväksi maston sähkökäytössä. Matala hyötysuhde on kuitenkin rajoittava tekijä, sillä se suurentaa sähkökäytön virrankulutusta. Vaihte myös kuumenee käytössä sitä enemmän, mitä matalampi hyötysuhde sillä on. Vaihteen lämpenemistaipumuksen pienentämisellä on keskeinen rooli käytet-täessä olosuhteiden vaatimaa suljettua kotelointia.

Kierukkavaihteen tarjoamaa itsepidättyvyyttä voidaan käyttää hyödyksi mastoa nostavassa sähkökäytössä. Masto pysyy itsepidättyvän vaihteiston ansiosta ylhääl-lä, eikä laskeudu hallitsemattomasti, vaikka vinssijärjestelmä ei sisältäisikään muita jarruja. Vinsseissä on tosin erillinen mekaaninen jarru, jonka tehtävänä on varmistaa maston pysyminen ylhäällä esimerkiksi silloin, kun vinssiä pyöritetään sähkökäytön sijasta käsikammella. Mikäli mastoa alas vetävään käyttöön sovelle-taan vääntömomenttisäätöä, täytyy käytön vaihteen olla vapaasti rullaava (pyörii myös toision suunnasta pyöritettäessä), joten itsepidättyvää kierukkavaihteistoa ei voida käyttää. Mastoa nostettaessa hihnan jännitys saa momenttisäädön tapauk-sessa aikaan sähkökäytön pyörimisen. Vaihteeksi soveltuu tällaisessa tapauksessa parhaiten lieriökartiovaihteisto, jolla saadaan 90 asteen kulma voimansiirtolinjaan, kuten kierukkavaihteistollakin. Tällöin sähkökäytön ulkoiset mitat pysyvät mah-dollisimman pieninä. /15/

2.2.2 Vinssi

Maston nostaminen ja laskeminen toteutetaan vinssikäyttöisten hihnojen välityk-sellä. Masto sisältää kaksi hihnaa, jotka on kiinnitetty maston ohuimpaan putkeen (latvasektio). Nostavaa hihnaa käytetään varsinaisesti maston nostoon, mutta se määrää myös maston laskunopeuden. Laskeva hihna toimii lähinnä apuhihnana, jolla voidaan vakauttaa maston käyttäytymistä ja estetään maston jumiutuminen sitä laskettaessa.

Mastsystem on käyttänyt tähän saakka EXB -mastoissa kuvan 1.4 mukaista tupla-rumpuvinssiä, jonka käytöstä on tarkoitus luopua tämän työn myötä luvussa 1.2

kerrottujen tuplarumpuvinssiin liittyvien ongelmien vuoksi. Mastsystem käyttää mastoissaan useita erikokoisia yksikelavinssejä. Kaikki yrityksen vinssityypit, myös tähän saakka käytetty tuplarumpuvinssi, ovat Ahmotuote Oy:n valmistamia. Rumpuhalkaisijat vaihtelevat 150–300 mm välillä. Yksikelavinssi sisältää hammaspyörästön, joka alentaa vaihteistolta tulevan akselin pyörimisnopeuden rummulle sopivaksi. Joitakin vinssikokoja on saatavana kahdella eri välityssuhteella.

3. TASAVIRTAMOOTTORIN OHJAUS- JA SÄÄTÖPERIAATTEET

Seuraavassa käydään läpi työn kannalta tärkeimpiä tasavirtamoottorin ohjaamiseen ja säätöön liittyviä näkökohtia. Lähtökohtana mietittäessä eri ohjaus- ja säätötapoja vinssien sähkökäytölle on pyrkimys mahdollisimman yksinkertaiseen ja edulliseen, mutta silti toimivaan ratkaisuun.

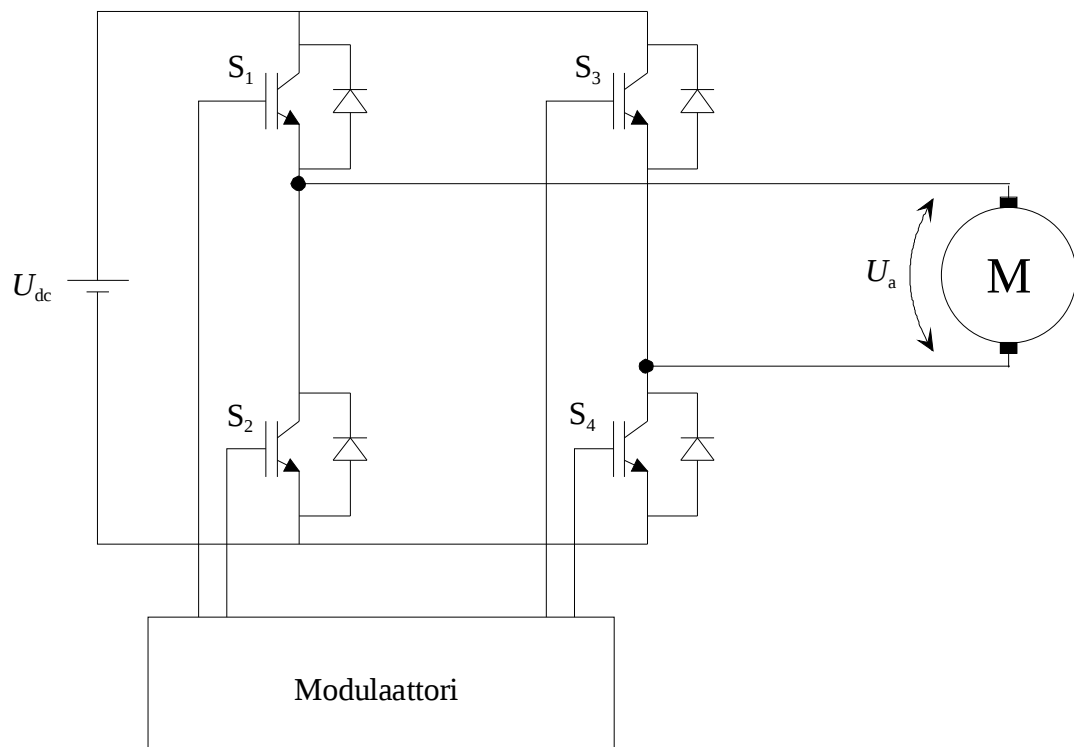
3.1 Tasavirtamoottorin ohjaaminen

Luvussa 2.1.1 todettiin, että kestmagnetoidun tasavirtamoottorin pyörimisnopeutta voidaan säätää säätämällä ankkuripiirin jännitettä U_a eli moottorin napajännitettä. Ankkurijännitteen säätö voidaan toteuttaa helposti esimerkiksi kokosiltahakkurin avulla, kuva 3.1. Kokosiltatasavirtahakkurin jännitettä voidaan säätää pulsinleveysmodulaatiolla (PWM, pulse-width modulation). Ankkurijännitteen U_a tehollisarvo riippuu tällöin suoraan hakkurin kytkentäkertoimen D ja toisaalta hakkurille tulevan tasajännitteen U_{dc} arvosta [6]

$$U_a = U_{dc} D. \quad (3.1)$$

Tasavirtamoottorin vääntömomentti on yhtälön 2.3 perusteella suoraan verrannollinen ankkuripiirissä kulkevaan virtaan I_a . Edellä mainitut periaatteet pitävät paikkaansa, mikäli koneen ilmavälivuo pysyy vakiona. Tämä oletus voidaan tehdä, sillä kestmagneettitasavirtamoottorin ankkurireaktio on suuren efektiivisen ilmavälin vuoksi varsin pieni.

Moottorin säätötavat voidaan luokitella säädettävän suureen perusteella. Säätösuureina käytetään useimmiten paikkaa (tai kulmaa), nopeutta tai moottorin tuottamaa vääntömomenttia. Mastoa alas vetävän vinssin sähkökäytön ohjaus on järkevintä toteuttaa vääntömomenttisäätönä, koska tällöin voidaan varmimmin taata hihnan kireänä pysyminen. Vääntömomentin ja hihnan jännitysvoiman suhde ei tosin ole vakio, sillä hihnan jännitysvoima on kääntäen verrannollinen rummulla olevan hihnan määrään, kun vääntömomentti pidetään vakiona.



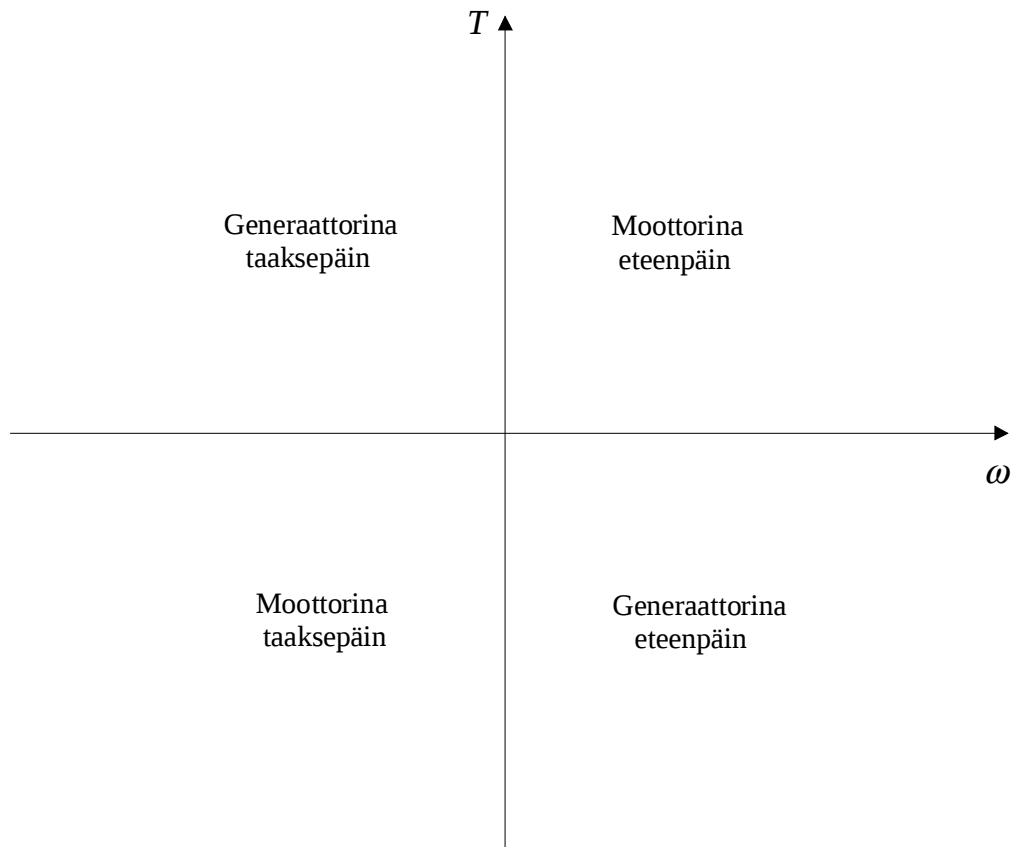
Kuva 3.1. Kestomagneettiasavirtamoottorin ohjaaminen kokosiltahakkurin avulla. Modulaattori ohjaa hakkurisillan puolijohdekytkimiä S_1 , S_2 , S_3 ja S_4 moottorin pyörimissuunnasta riippuen pulssinleveysmodulointiin perustuen siten, että nollajännite saavutetaan kytkemällä kytkimet S_1 ja S_3 tai S_2 ja S_4 johtaviksi. Jännitelähteen jännite kytketään ohjaamalla pyörimissuunnasta riippuen joko kytkimet S_1 ja S_4 tai S_3 ja S_2 johtaviksi. Moottorin ankkurijännitteen käyrämuoto on tällöin kanttiaaltomaista. /6/

Monissa markkinoilla olevissa moottorinohjainkorteissa on myös säätötekniisiä ominaisuuksia, mutta tällaiset ohjaimet ovat usein pienemmille moottoreille tarkoitettuja, joiden virrankestoisuus 24 V jännitteellä käytettäessä on tyypillisesti suurimmillaan noin 10 A, kun maston sähkökäytön tulisi kestää jopa 20–25 A virtoja.

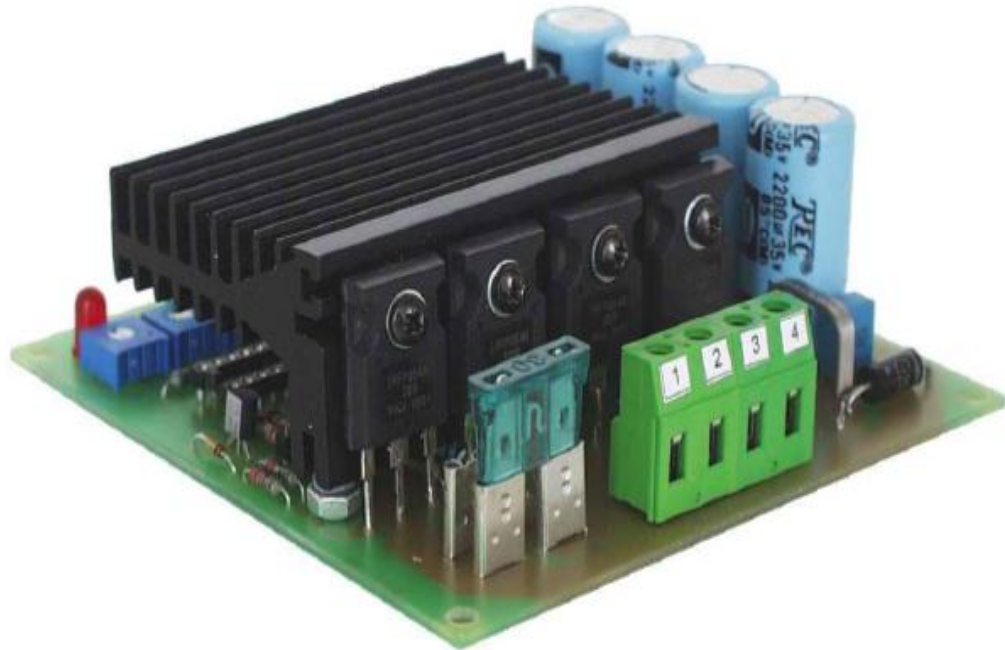
Ainoa kaupallinen moottorinohjain, joka löydettiin, ja joka soveltui käytettävään teholuokkaan, oli Electromen Oy:n valmistama EM-115-moottorinohjain (kuva

3.3). Moottorinohjaimen tekniset tiedot ovat liitteessä II. EM-115-moottorinohjain soveltuu 12–36 V kestopäinmoottoreille, ja sen virrankestoisuus on jatkuvassa käytössä 25 A, mutta ohjain kestää hetkellisesti huomattavasti suurempiakin virtoja käytetystä sulakekoosta riippuen. Moottoria voidaan ajaa EM-115-moottorinohjaimen avulla kumpaankin suuntaan. Tämän lisäksi moottorinohjaimen kautta ohjattu sähkökäyttö voi toimia sekä moottorina, että generaattorina, eli ohjainta voidaan kutsua 4-kvadranttiseksi moottorinohjaimeksi, kuva 3.2. /3/ /5/

EM-115-moottorinohjain ei sisällä varsinaista säädintä, jonka avulla pystytään suoraan toteuttamaan vääntömomentti- tai nopeussäätö. Nopeussäätö voidaan toteuttaa ulkoisen nopeusohjeen avulla, joka tuodaan ohjaimelle analogisena jännitesignaalinä. Signaali voidaan tuoda esimerkiksi potentiometriltä, tai kuten oikeaoppisen takaisinkytketyn nopeussäädön tapauksessa, säätimeltä. Myös vääntömomenttisäätö on mahdollista toteuttaa epäsuorasti siten, että säätimeltä tulee vääntöohjeen sijasta nopeusohje. Mitattava säätösuure on kuitenkin moottorin ankkurivirta. Toinen vaihtoehto on hyödyntää moottorin ohjaimen virranrajoitus-toimintoa. Vääntömomenttisäädön toteutukseen palataan myöhemmin tässä työssä. Digitaalinen PI(D)-säädin on ainakin teoriassa mahdollista integroida säätimen omalle ohjelmistolle, jolloin vältetään ulkoisen säätimen käytöltä.



Kuva 3.2. Sähkökäytön eri toimintamoodit. EM-115 pystyy toimimaan kaikissa neljässä eri toimintamoodissa eli sitä kutsutaan 4-kvadranttiseksi ohjaimeksi. ωT -koordinaatiston ylemmässä puolitasossa moottorin ankkurivirta kulkee positiiviseen suuntaan ja alemmassa vastaavasti negatiiviseen suuntaan. Oikeassa puolitasossa moottorin ankkuripiirin jännite on positiivinen ja vasemmassa puolitasossa negatiivinen. /3//5/



Kuva 3.3. EM-115-moottorinohjain. Kytkiminä toimivat transistorit (neljä kappaletta) on kiinnitetty suureen jäähdytyslementtiin. Ohjainkorttiin on kytketty myös neljä elektrolyyttikondensaattoria, joiden tehtävänä on suodattaa ohjaimelle tulevaa tasajännitettä. /3/

Moottorinohjaamiseen ja -säättämiseen voidaan käyttää myös niin sanottuja servo-ohjaimia, jotka mahdollistavat tasavirtakäytölle monipuoliset ja tarkat säätöominaisuudet. Servo-ohjaimilla voisikin helposti toteuttaa esimerkiksi nopeus- tai vääntömomenttisäädön tasavirtaservomoottorille. Servo-ohjaimien ja -moottoreiden negatiivisena puolena on niiden korkea hinta, jonka vuoksi niiden käyttäminen tulee vain kysymykseen, jos muut edullisemmat ratkaisut eivät täytä laitteistolle asetettuja toiminnallisia vaatimuksia.

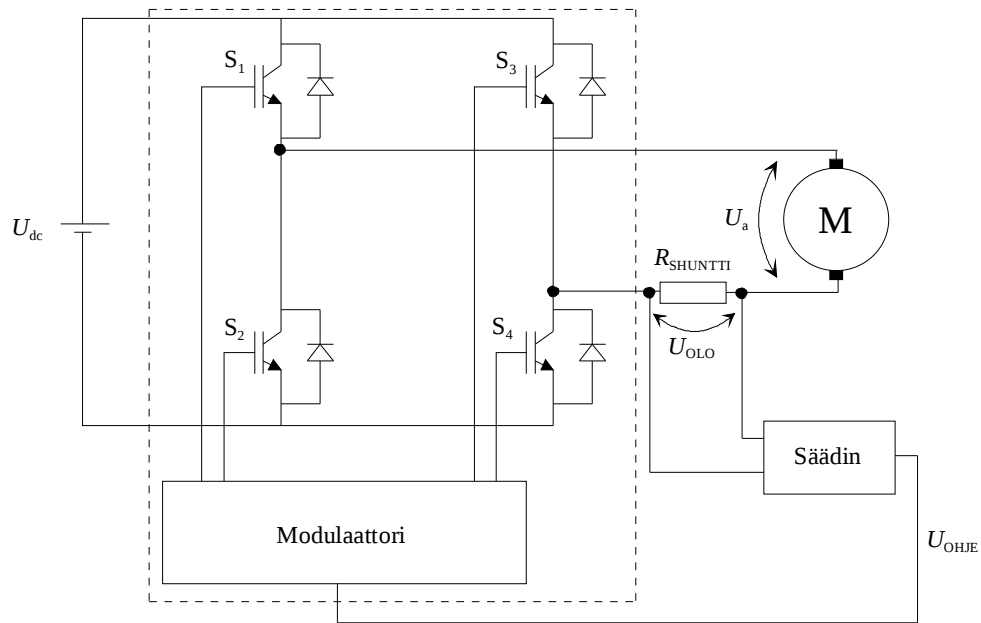
3.2 Säättötekniikka tasavirtakäytön ohjauksessa

Säädetyllä moottorikäytöllä, tarkoitetaan yleensä joko nopeus-, paikka- tai vääntömomenttisäädettyä käyttöä riippuen siitä, mitä parametria halutaan säädön avulla hallita. Kuten aiemmin mainittiin, hihnojen tiukkuuden hallinta vaatii jonkinlaisen vääntömomenttisäätöä toteuttavan menetelmän soveltamista vähintään toiseen

maston sähkökäyttöistä. Yksinkertaisin ratkaisu on sijoittaa säädetty käyttö käyttämään mastoa alaspäin vetävää hihnaa. Tällöin mastoa nostavaa hihnaa voidaan käyttää säätämättömällä, vakionopeudella pyörivällä sähkökäytöllä. Mastoa alaspäin vetävän sähkökäytön tärkein tehtävä on huolehtia hihnan riittävästä kireydestä ja sitä kautta taata maston jouheva käyttäytyminen myös vaikeissa olosuhteissa.

Säätöjärjestelmissä käytetään säätiminä P-, PI- ja PID-säätimiä. Säätimelle sisään menevänä suurena on järjestelmän säädettävä suure, vääntömomenttisäädön tapauksessa ankkurivirta. Säätimelle asetetusta ohjearvosta vähennetään säädettävän suureen arvo, jolloin saadaan erosuure, jota säädin varsinaisesti käsittelee. P-säätö vain vahvistaa erosuureta. PI-säädin sisältää vahvistuksen lisäksi integroivan termin, joka integroi erosuureta. Integroivan osan tarkoituksena on ensisijaisesti vähentää jatkuvuustilan virhettä. PID-säädin sisältää edellisen lisäksi myös derivoivan termin, joka derivoi erosuureta. Derivoiva termi nousee merkittäväksi lähinnä silloin kun säädettävä suure sisältää taajuudeltaan suuria häiriösignaaleja. /8/ Tasavirtamoottorin virtasäätöön soveltuu parhaiten PI-tyyppinen säädin, sillä derivoiva termi voi häiritä säätöä.

Vääntömomenttisäädön toteuttaminen tarkoittaa kestopagneettitasavirtamoottorin tapauksessa virtasäätöä, jossa ankkuripiirin virta on säädettävänä suurena. Oikeaoppinen säätöjärjestelmä sisältäisi tällöin ankkurivirran mittauksen, PI-säätimen, ja moottorinohjaimen, joka muuttaa moottorin ankkuripiirin jännitettä ja sitä kautta myös ankkurivirtaa ohjaimelta tulevan ohjeen mukaan (kuva 3.4).



Kuva 3.4. Vääntömomenttisäädön toteutus käytettäessä kokosiltahakkurilla (erotettu kuvassa katkoviivalla) syötettyä tasavirtamoottoria. Moottoriin ankkurivirran arvo mitataan shunttinvastuksen $R_{SHUNTTI}$ yli ja se menee jännitesignaalina U_{OLO} säätimelle, josta lähtevä jänniteohje U_{OHJE} ohjaa hakkurin modulaattorin toimintaa siten, että moottorin pyörimisnopeus asettuu arvoon, jossa haluttu ankkurivirta saavutetaan.

Erillisen prosessisäätimen käytöltä voidaan joissain tapauksissa välttyä toteuttamalla vääntömomentin rajoitus moottorinohjaimen virranrajoitustoiminnon avulla. Moottorinohjain sisältää trimmerillä asetettavan virranrajoittimen, jonka avulla moottorin ankkurivirta voidaan rajoittaa tiettyyn arvoon. Antamalla ohjaimelle riittävän suuren pyörimisnopeusohjeen, moottori käy jatkuvasti ohjaimen virtarajan sallimalla virran arvolla, eikä pyörimisnopeusohje koskaan rajoita moottorin pyörimisnopeutta. Tällä tavalla toteutettua vääntömomenttisäätöä ei oikeastaan voi kutsua säätöjärjestelmäksi, koska se ei sisällä minkäänlaista takaisinkytkentää. Se voi kuitenkin olla ominaisuuksiltaan riittävän hyvä, jolloin moottorin virta ja sitä kautta vääntömomentti saadaan rajoitetuksi haluttuun arvoon. Moottorinohjaimella olevan virranrajoitustrimmerin tilalle voidaan tarpeen mukaan kytkeä releiden avulla tarvittava määrä trimmereitä tai potentiometrejä. Tällöin moottorin akselilta saadaan erilaisia vääntömomentin arvoja tilanteesta ja tarpeesta riippuen.

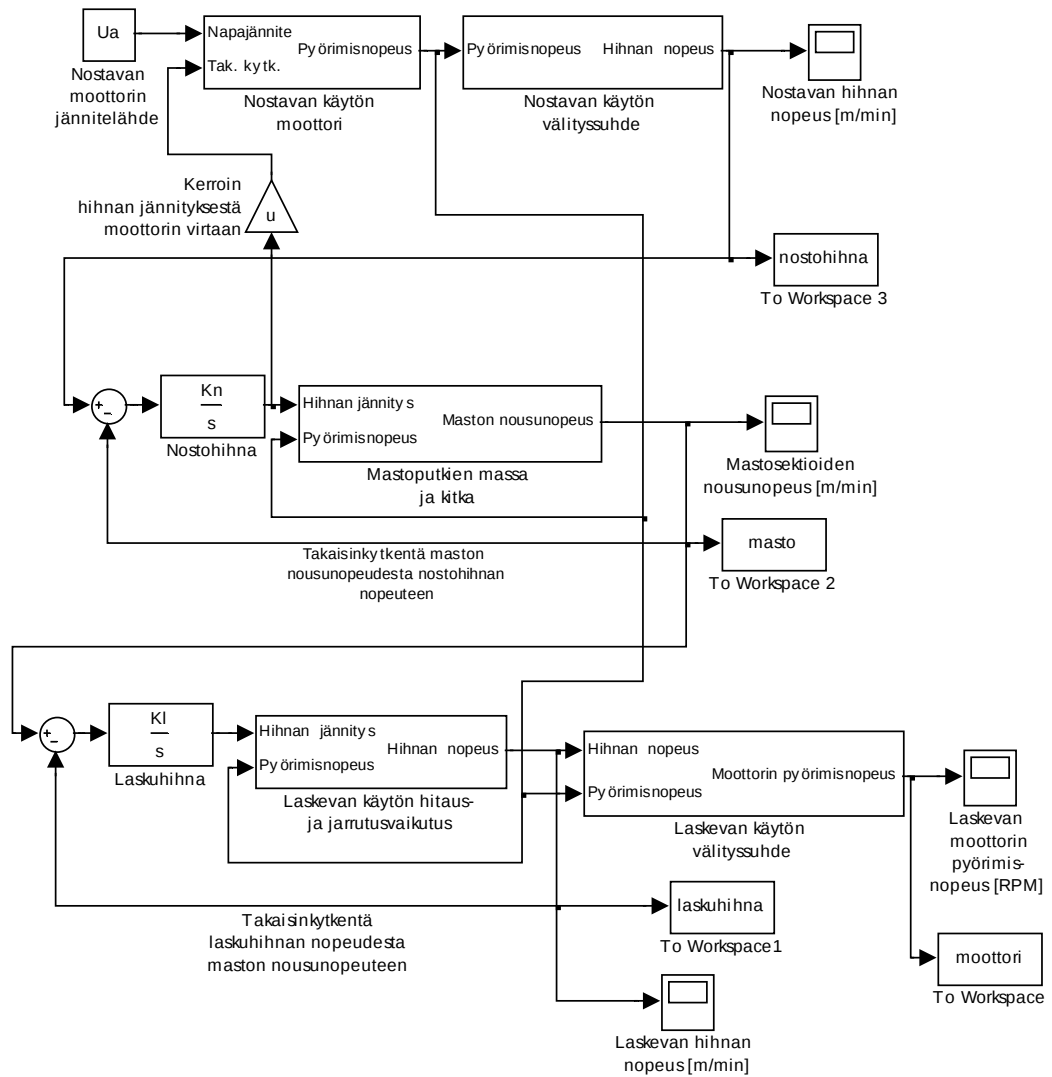
4. MASTOLLE SUORITETUT SIMULOINNIT

Kahden sähkökäytön ja venyvien hihnojen varassa liikkuva masto on värähtelytaipumuksensa vuoksi varsin monimutkainen mekaaninen systeemi ja sen käyttäytyminen on vaikeasti mielletävää. Värähtelytaipumuksen hallinta on keskeisessä roolissa sähkökäyttöjen suunnittelussa, joten on syytä tarkastella maston käyttäytymistä simulointimallien avulla. Kahdella sähkökäytöllä varustetusta mastosta laadittiin kaksi mallia Simulink-ohjelmistolla. Toinen malleista kuvaa maston nostamista ja toinen laskemista.

Ennen mallien laatimista täytyy tehdä oletus, kuinka maston sähkökäyttöjä säädetään. Lähtökohtana malleissa on se, että mastoa nostavaa käyttöä ohjataan vakiojännitteellä, jolloin käytön pyörimisnopeus muuttuu vain vähän kuormituksen funktiona. Mastoa laskeva käyttö oletetaan vääntömomenttisäädetyksi, jolloin sen tehtävä on pitää hihna riittävällä kireydellä. Simuloinneilla haetaan suuntaa antavaa tietoa vääntömomenttisäädetyksen sähkökäytön käyttäytymisestä ja värähtelyalttiudesta.

4.1 Simulointimalli mastoa nostettaessa

Maston nostamista kuvaava simulointimalli on kuvassa 4.1. Malli ottaa huomioon vaihteistojen ja vinssien välityssuhteet, hihnojen kulkunopeuksien muuttumisen vinssirummulla olevan hihnamäärän mukaan ja mastoputkien massan sekä mahdollisen latvakuorman vaikutuksen maston käyttäytymiseen. Sähkökäyttöjen ja mastoputkien kitkavoimat oletetaan vakioiksi. Mallin tärkeimmät siirtofunktiot ja alimallit sekä keskeisimpien parametrien määrittäminen käydään seuraavassa havainnollisuuden vuoksi läpi.

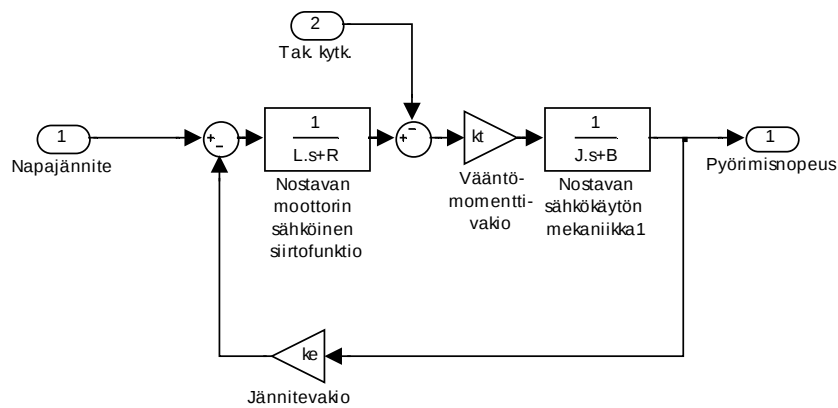


Kuva 4.1. Simulointimalli nostettaessa mastoa. Mallin avulla voidaan simuloida maston sekä hihnojen nopeuksia ja mastoa laskevan moottorin pyörimisnopeutta maston noston aikana.

4.1.1 Mastoa nostava moottori

Mastoa nostavan tasavirtamoottorin simulointimalli (kuva 4.2) koostuu sähköisestä siirtofunktiosta, vääntömomenttivakiosta, mekaanisesta siirtofunktiosta ja

moottorin jännitevakioista. Sähköinen siirtofunktio on muotoa $\frac{1}{L_a s + R_a}$. Sähköistä siirtofunktiota varten täytyy tietää moottorin ankkuripiirin induktanssi L_a , joka on määritetty testimoottorista mittaamalla, ja ankkuripiirin resistanssi R_a , jonka sähkökäytössä käytettävän moottorin valmistaja ilmoittaa datalehdessään.



Kuva 4.2. Mastoa nostavan moottorin simulointimalli.

Vääntömomenttivakio skaalaa moottorin ankkurivirran sähköiseksi vääntömomentiksi luvussa 2.1.1. esitetyn yhtälön 2.4 perusteella. Moottorin sähköinen vääntömomentti johdetaan sähkökäytön mekaniikkaa kuvaavaan siirtofunktioon, joka on muotoa $\frac{1}{J_s + B}$. Mekaanisen siirtofunktio muuttaa moottorin sähköisen

vääntömomentin pyörimisnopeudeksi. Hitausmomentin J arvoon on sisällytetty myös vaihteen ja vinssin hitausmomentti. Sähkökäytön hitausmomentin arvona käytetään kilpailevan moottorivalmistajan vastaavankokoiselle moottorille ilmoittamaa arvoa, johon on lisätty vaihteiston ja vinssin arvioidut hitausmomentin arvot. Vaimennusvakiolle B (sähkökäytön kitkamomentti) saadaan approksimaatio, kun tiedetään sähkökäytön todellinen tyhjäkäyntivirta ja moottorin teoreettinen tyhjäkäyntivirta, joka saadaan moottorin valmistajan ilmoittamasta ominaiskäyrästä. Teoreettinen tyhjäkäyntivirta on ankkurivirta, jolla moottori lähtisi ilman kitkamomentteja juuri ja juuri pyörimään. Koska moottorin pyörimisnopeus

on verrannollinen ankkurijännitteeseen, mallista ulos saatavasta pyörimisnopeudesta tehdään negatiivinen takaisinkytkentä moottorin ankkurijännitteeseen. Tasavirtamoottorin simulointimalliin tarvitaan vielä moottorissa induktiolain perusteella syntyvän vastasähkömotorisen voiman vuoksi takaisinkytkentä, jonka kertoimeksi asetetaan moottorin jännitevakio k_e . Induktiolain mukainen vastasähkömotorinen voima näkyy yhtälön 2.2 viimeisessä termissä. Nostohihnan jännitys vaikuttaa moottorin ankkurivirran suuruuteen. Tätä varten tarvitaan takaisinkytkentä ja sille sopiva kerroin u , joka määritetään hihnan jännitysvoiman ja sitä vastaavan ankkurivirran suhteena keksimääristä vinssirummun halkaisijaa käyttäen. Takaisinkytkennän vaikutus vääristyy tällöin hiukan noston alussa ja lopussa, mutta vaikutus simulointituloksiin jää vähäiseksi. Tasavirtamoottorin simulointimallissa käytetyt parametrit on koottu taulukkoon 4.1.

Taulukko 4.1. Parametrit simuloitaessa mastoa nostavan käytön tasavirtamoottoria.

Ankkurijännite	U_a	24 V
Ankkuriresistanssi	R_a	9,6 mΩ
Ankkuri-induktanssi	L_a	0,5 mH
Vääntömomenttivakio	k_t	0,15 Nm/A
Jännitevakio	k_e	0,0051 V/RPM
Kerroin virtatakaisinkytkennälle	u	85 N/A
Käytön hitausmassa	J	0,0015 kgm ²
Käytön kitka (vaimennus)	B	0,00085 Nm

Mastoa nostavaa tasavirtamoottoria syötetään suoraan jännitelähteestä saatavalla tasajännitteellä U_a , jonka suuruus on 24 V.

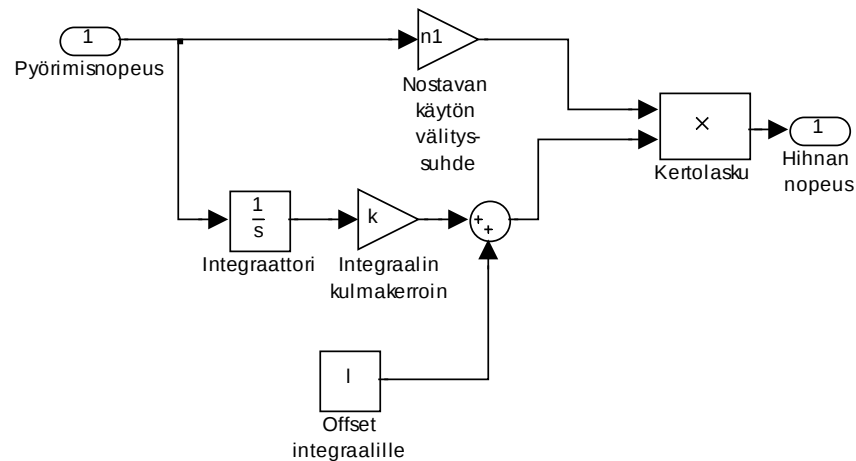
4.1.2 Nostavan käytön välityssuhde

Moottorin pyörimisnopeus pudotetaan sopivaksi vaihteen ja vinssin hammasvälitysten avulla. Mastoa nostavan käytön kokonaisvälityssuhde n_1 , joka määrittää moottorin pyörimisnopeuden ja nostohihnan keskimääräisen etenemisnopeuden suhteen, lasketaan

$$n_1 = n_{\text{vaihte}} n_{\text{vinssi}} d_{\text{av}} \pi, \quad (4.1)$$

missä $n_{\text{vaihte}} on vaihteen välityssuhde, n_{vinssi} on vinssin välityssuhde, d_{av} on vinssin rummun halkaisija noston puolella välissä ja π on piin likiarvo.$

Koska hihnan etenemisnopeus muuttuu rummulla olevan hihnamäärän muuttuessa, ei riitä, että kerromme rummun pyörimisnopeuden vakiolla, vaan malliin täytyy lisätä simuloinnin aikana muuttuva kerroin, jolla kerrotaan käytön kokonaisvälityssuhde n_1 . Tämä muuttuva kerroin on toteutettu moottorin pyörimisnopeuden integraalia hyväksikäyttäen. Pyörimisnopeuden integraali kuvaa tässä hihnan kulkemaa matkaa ja sitä kautta vinssirummun halkaisijaa. Simuloinnin aikana kasvava integraali kerrotaan vakiolla k ja siihen lisätään sopiva alkuarvo (offset) I kuvassa 4.3 olevan mallin mukaisesti.



Kuva 4.3. Nostavan käytön välitys, joka muuttaa moottorin akselin pyörimisnopeuden nostohihnan nopeudeksi. Hihnamäärä muuttuu vinssin rummulla, joten kokonaisvälityssuhde ei pysy vakiona, vaan kasvaa noston edetessä. Välityssuhde muutetaan pyörimisnopeuden integraalin avulla.

Vakiolle k pätee

$$k = \frac{1}{n_{\text{av}} t}, \quad (4.2)$$

missä n_{av} on nostavan moottorin pyörimisnopeus (kierrosta minuutissa) ja t on maston keskimääräinen nousuaika.

Muuttujalle l saadaan

$$l = 1 - \frac{kt}{2}, \quad (4.3)$$

missä t on maston nousuaika ja k integraalille edellä laskettu kulmakerroin. Integraalia muokataan siis kulmakertoimella k nousevaksi signaaliksi siten, että sen arvoksi noston puolella välillä saadaan yksi. Väliytysuhde n_1 on laskettu juuri noston puolivälin hihnanopeuteen perustuen, jolloin muokattu pyörimisnopeuden integraali korjaa väliytysuhteen oikeaksi simuloinnin kaikissa vaiheissa.

4.1.3 Hihnojen siirtofunktiot

Nosto- ja laskuhihnoja kuvataan mallissa integroivina siirtofunktioina, joilla on kerroin K_n tai K_l riippuen siitä, onko kyseessä nosto- vai laskuhihna. Kuvittelemalla venyvät hihnat päidensä suhteen kiertyväksi akseleiksi, voidaan kertoimet K_n ja K_l määritellä torsionaalisiksi jousivakioiksi eli vääntöjäykkyyshkerroimiksi. Vääntöjäykkyyshkerroimet K_n ja K_l määritellään

$$K_n = \frac{T_v}{\varphi_n} \quad (4.4)$$

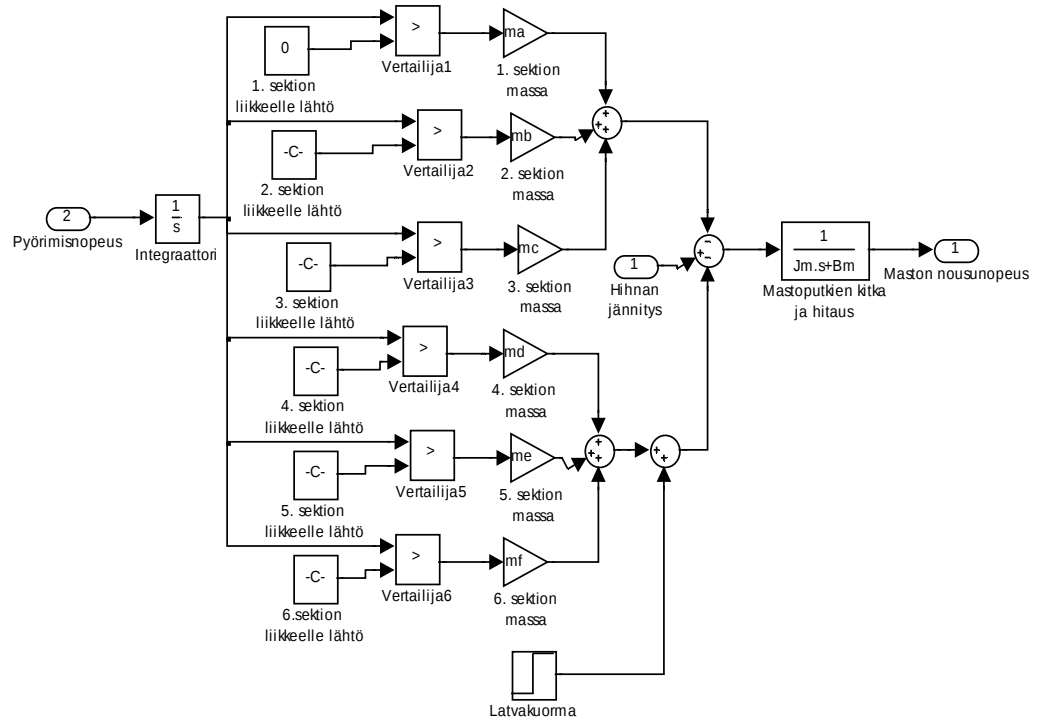
ja

$$K_l = \frac{T_l}{\varphi_l}, \quad (4.5)$$

missä T_v ja T_l ovat kuviteltujen akseleiden päiden välillä vaikuttava vääntömomentit ja φ_n ja φ_l vastaavien akseleiden päiden väliset kiertymät. /13/ Nyt masto on helppo mieltää kahden vinssin väliin sijoittuvaksi pyöriväksi systeemiksi. Korostettakoon kuitenkin, että simulointitulokset maston ja hihnojen osalta ovat suoraviivaisia etenemisnopeuksia. Vinssijärjestelmän tapauksessa vääntöjäykkyyshkertoimet lasketaan kätevimmin hihnojen lineaaristen jousivakioiden, hihnojen pituuden ja vinssin rummun keskimääräisen halkaisijan perusteella. Nostohihnalle $K_n = 0.96 \text{ Nm/rad}$ ja laskuhihnalle $K_l = 0.84 \text{ Nm/rad}$. Nostohihna on valmistettu vahvemmasta ja hiukan vähemmän venyvästä materiaalista kuin laskuhihna, mikä selittää kuviteltujen vääntöjäykkyyshkertoimien erot.

4.1.4 Mastoputkien massa ja kitka sekä latvakuorman vaikutus

Mastoputket nousevat mastoa nostettaessa ulointa putkea (maston runko) lukuun ottamatta. Ohuin ja samalla kevyin putki nousee ensin ja muut putket seuraavina putkien halkaisijoiden mukaisessa järjestyksessä. Mastoputkien massojen ja kitkan sekä mahdollisen latvakuorman vaikutus otetaan huomioon simulointimalliin sisältyvässä alimallissa, joka on esitetty kuvassa 4.4. Mastoputkien liikkeelle lähtö tapahtuu mastoa nostavan moottorin pyörimisnopeuden integraalin perusteella. Jokainen putki lähtee vuorollaan liikkeelle integraalin saavutettua tietyn arvon. Mallissa tämä on toteutettu vertaamalla integraalin arvoa jokaiselle sektiolle laskettuun vakioon. Vakiot asetetaan tässä niin, että mastoputket lähtevät liikkeelle kymmenen sekunnin välein.



Kuva 4.4. Mastosektioiden massojen, maston latvakuorman ja mastoputkien kitkan sekä hitauden vaikutus. Mastosektioita kuvaavat vääntömomenttiaskaaleet kytkeytyvät järjestelmään kukin yksitellen hihnan kuljettua tietyn matkan. Mastosektioiden kytkeytymishetki (liikkeelle lähtö) määräytyy mastoa nostavan moottorin pyörimisnopeuden integraalin arvon kasvamisen perusteella.

Hihnat voidaan ajatella simulointimallissa pyöriväksi akseliksi, jolloin hihnoihin kuormituksena liittyvät mastoputket ja mahdollinen latvapaino liittyvät hihnoihin vääntömomenteina, eikä painovoimina, kuten todellisuudessa. On kuitenkin muistettava, että edellä välityssuhteita tarkasteltaessa hihnojen liike skaalattiin kuvan 4.3 mallissa havainnollisuuden vuoksi lineaariseksi liikkeeksi. Kuormituksena olevien massojen m_{kuorma} ja niiden aiheuttaman vääntömomentin T_{kuorma} yhteys on

$$T_{\text{kuorma}} = m_{\text{kuorma}} g r_{\text{rumpu}} , \quad (4.6)$$

missä g on putoamiskiihtyvyys ja r_{rumppu} nostavan vinssin rummun säde kyseisellä hetkellä. Massan ja vääntömomentin suhde ei siis ole vakio, vaan muuttuu maston noston aikana. Tämä voidaan ottaa huomioon vääntömomenttien arvoja laskettaessa, kun tiedetään mastoputkien nousujärjestys noston aikana. Mastoputkien massojen vaikutukset nostavan vinssirummun vääntömomenttiin esitetään taulukossa 4.2.

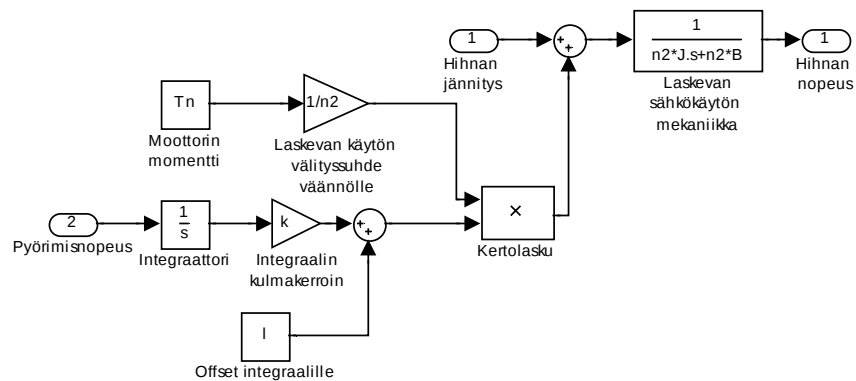
Taulukko 4.2. Mastoputkien massojen nostavalle vinssirummulle aiheuttamat vääntömomentit.

1. mastosektio	0,120 Nm
2. mastosektio	0,175 Nm
3. mastosektio	0,240 Nm
4. mastosektio	0,315 Nm
5. mastosektio	0,400 Nm
6. mastosektio	0,550 Nm

Mastoputkien ja latvakuorman massat vaikuttavat systeemin hitauteen. Hihnoihin vaikuttavan kokonaiskuorman massa ei pysy vakiona, vaan muuttuu riippuen siitä, kuinka monta mastosektiota mastosta on noussut ja kuinka suuri latvakuorma mastossa on. Massa kuitenkin esitetään simulointimallissa yksinkertaisuuden vuoksi vakiona. Mastoputkien kitkavoimista on olemassa suuntaa antavia mittaustuloksia. Näiden mittaustulosten luotettavuus on kyseenalainen, mutta niiden perusteella malliin voidaan lisätä hyvä approksimaatio kitkan vaikutuksesta. Myös kitka on mallissa kuvattu vakiona, mutta käytännössä kitkan suuruus vaihtelee hyvin paljon mastoputkien mittatarkkuuksien, mastolla tehtyjen nostokertojen, mahdollisen pystyasennosta kallistuksen ja käyttöolosuhteiden mukaan. Simulointimallia varten approksimaatiot maston kitkavoimasta ja massasta täytyy redusoida pyörivän systeemin suureiksi, hitausmomentiksi $J_m = 0,01 \text{ kgm}^2$ ja kitkamentiksi $B_m = 0,05 \text{ Nm}$.

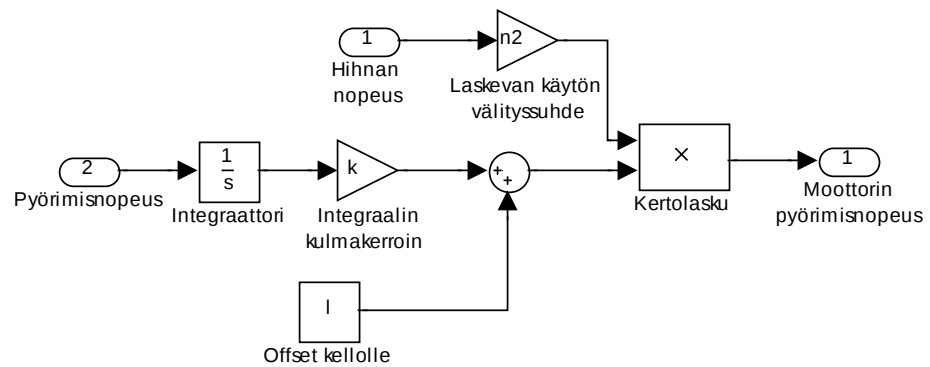
4.1.5 Mastoa laskevan sähkökäytön toiminta

Mastoa laskevan sähkökäytön tarkoituksena on tuottaa vakiovääntömomentti, joka tarvitaan hihnojen pysymiseksi tiukalla. Vakiovääntömomentti tarkoittaa kuitenkin lineaarisesti muuttuvaa laskuhihnan jännitystä, joka voidaan generoida taas pyörimisnopeuden integraalia muokkaamalla. Moottorin vääntömomentti muutetaan hihnaan vaikuttavaksi voimaksi kuvan 4.5 alimallissa. Lisäksi mallissa on huomioitu sähkökäytön mekaaninen siirtofunktio. Sähkökäytön kitka aiheuttaa riittävän jännityksen hihnaan noston ajaksi, joten moottorin tuottamaksi momentiksi T_n kannattaa asettaa nolla. Tämä vastaisi vapaana rullaavaa moottoria. Käytön kokonaisvälityssuhde n_2 lasketaan vastaavalla tavalla, mutta käännteislukuna verrattuna nostavan käytön kokonaisvälityssuhteeseen n_1 . Käännteinen välitys tarkoittaa nopeutta tarkasteltaessa välitystä hihnan suunnasta moottorin suuntaan. Vaihteiden erilaiset välityssuhteet on toki myös otettava huomioon.



Kuva 4.5. Laskevan käytön aikaansaaman jarruttavan vääntömomentin muodostuminen laskevalle hihnalle. Malliin on lisätty myös sähkökäytön mekaaninen siirtofunktio, joka huomioi sähkökäytön hitaus- ja kitkamomentin.

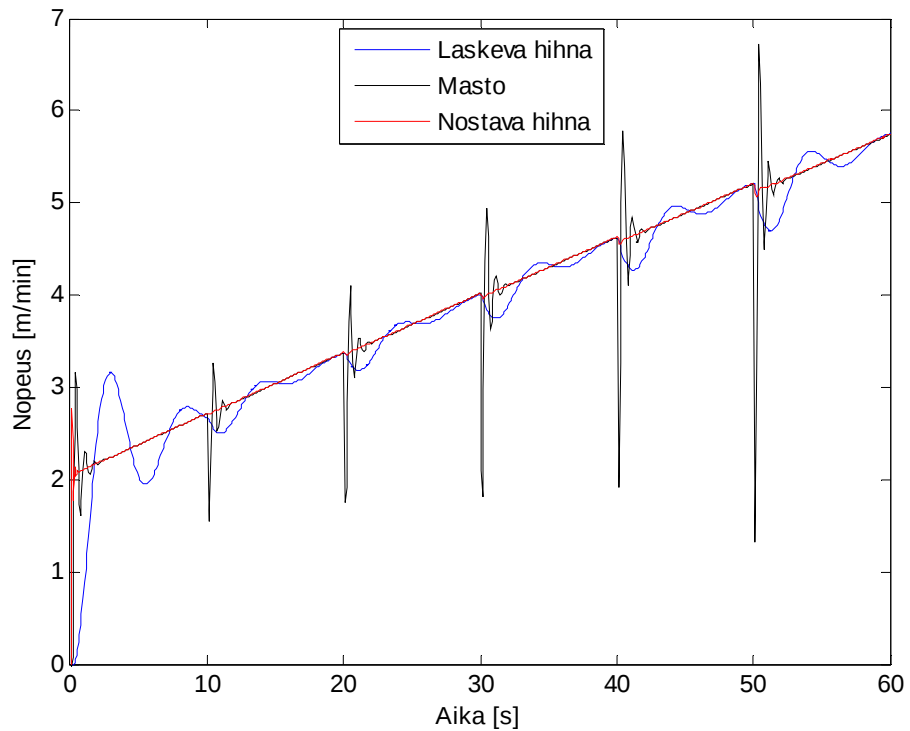
Kuvan 4.5 malli tuottaa vain sopivan jännityksen laskuhihnalle. Laskuhihnan nopeus on muutettava erikseen moottorin pyörimisnopeudeksi. Muunnosta varten simulointimalliin lisätään alimalli, kuva 4.6. Mallin toiminta muistuttaa kohdassa 4.1.2 esitetyn alimallin toimintaa.



Kuva 4.6. Mastoa laskevan käytön välityssuhde. Laskuhihnan nopeus muutetaan moottorin pyörimisnopeudeksi.

4.1.6 Simulointitulokset nostettaessa mastoa

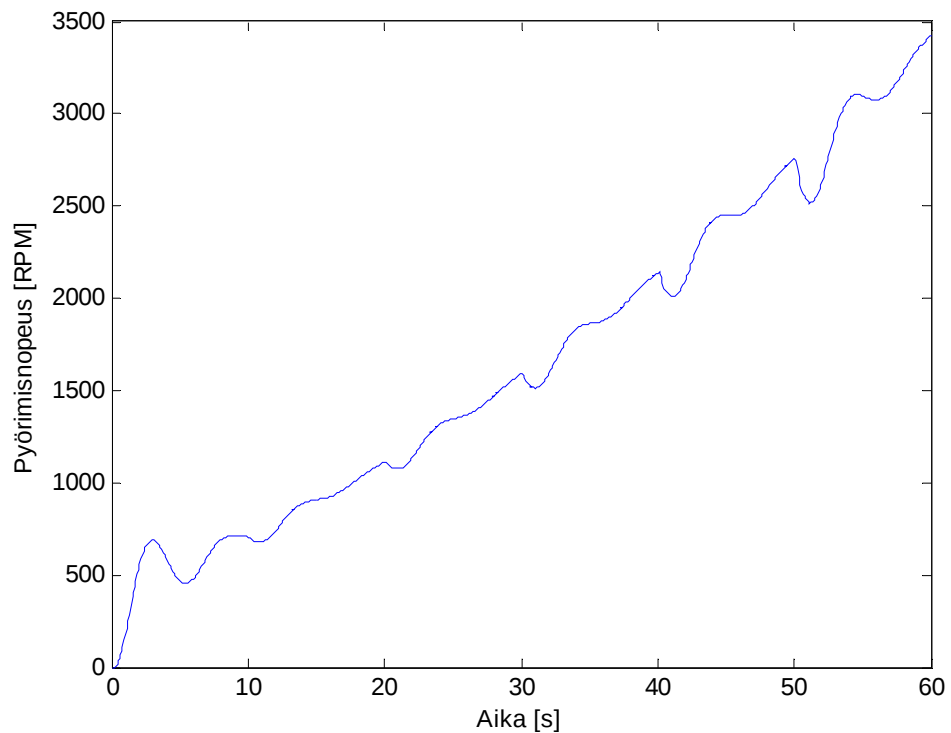
Maston nostoa simuloitaessa kiinnostavia asioita ovat maston ja molempien hihnojen nopeudet, jotka esitetään kuvassa 4.7. Simulointiaikana käytetään 60 sekuntia ja mastoputket lähtevät liikkeelle siten, että ensimmäinen putki lähtee liikkeelle simuloinnin alussa ja seuraavat viisi putkea kuljetun matkan perusteella tasaisin välein.



Kuva 4.7. Laskevan ja nostavan hihnan sekä maston nopeudet nostettaessa mastoa. Hihnojen nopeudet ovat vinssien rumpujen vieressä simuloituja nopeuksia.

Kuvasta 4.7 havaitaan, että nostavan hihnan nopeus vinssin vieressä kasvaa lineaarisesti noston aikana, eikä uuden mastosektion liikkeelle lähtö juuri vaikuta nostavan hihnan liikkeeseen, eikä täten nostavan sähkökäytön pyörimisnopeuteen. Sen sijaan maston nousunopeudessa nähdään selvä muutos uuden mastosektion lähtiessä liikkeelle. Tällöin nopeus ensin tipahtaa, kun nostava hihna venyy hiukan, jonka jälkeen hihnan kiristyminen aiheuttaa värähdyksen myös toiseen suuntaan. Värähdys vaimenee kuitenkin nopeasti section liikkeelle lähdettyä. Tätä maston värähtelyä ei voida poistaa sähkökäyttöjen säätötekniikan avulla, koska se johtuu hihnan venymistaipumuksesta. Laskevan hihnan nopeus vinssin vieressä värähtelee myös jonkin verran. Värähtely ei vaimene yhtä nopeasti kuin maston nousunopeuden tapauksessa alas vetävän sähkökäytön hitausmomentin vaikutuksesta. Laskuhihnan toisessa päässä on kuormana mastoa laskeva sähkökäyttö.

Mastoa laskevan moottorin pyörimisnopeus noston aikana nähdään kuvasta 4.8. Pyörimisnopeus on noston alussa varsin matala ja kasvaa maston noustessa ylemmäksi. Pyörimisnopeus kasvaa neliöllisesti, kun malli huomioi molempien käyttöjen lineaarisesti simuloinnin aikana kasvavat välitykset. Maston tai uuden mastosektion liikkeelle lähteminen näkyy värähdyksenä moottorin pyörimisessä. Tämä transienttitilanne tasoittuu kuitenkin nopeasti ja jatkuvassa tilassa ilman häiriöitä (uusien sektioden liikkeelle lähtemistä) laskeva moottori pyörisi varsin tasaisesti.



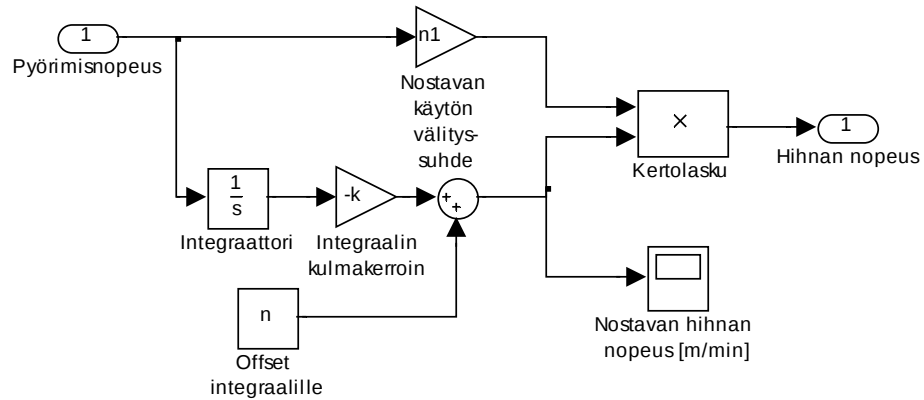
Kuva 4.8. Mastoa laskevan moottorin pyörimisnopeus mastoa nostettaessa. Maston ja uuden mastosektion liikkeelle lähtö (10 sekunnin välein) näkyy moottorin pyörimisnopeuden notkahduksena.

4.2 Simulointimalli mastoa laskettaessa

Maston nostamista simuloivaa mallia ei voida sellaisenaan käyttää suoraan maston laskemista simuloitaessa. Tämän vuoksi maston laskemista varten on kehitetty

4.2.2 Nostavan käytön välityssuhde

Mastoa nostavan moottorin pyörimisnopeuden ja nostohihnan etenemisnopeuden suhde muodostetaan kuvan 4.10. alimallissa



Kuva 4.10. Nostavan käytön välityssuhde mastoa laskettaessa. Integraalille tarvitaan erilaiset parametrit verrattuna maston nostotilanteeseen (kuva 4.3)

Nostavan käytön välityssuhde n_1 on mastoa laskettaessa luonnollisesti vaihteen ja vinssin osalta sama kuin nostettaessa. Mastoa nostavan vinssin rummun hihnamäärä käyttäytyy kuitenkin päinvastoin kuin mastoa nostettaessa. Integraalin kulmakertoimeksi täytyy nyt asettaa negatiivinen kerroin $-k$. Integraalin arvolle n simuloinnin alussa voidaan kirjoittaa

$$n = 1 + \frac{kt_1}{2}, \quad (4.7)$$

missä k on integraalille edellä laskettu kulmakerroin ja t_1 on maston laskuaika.

4.2.3 Hihnojen siirtofunktiot

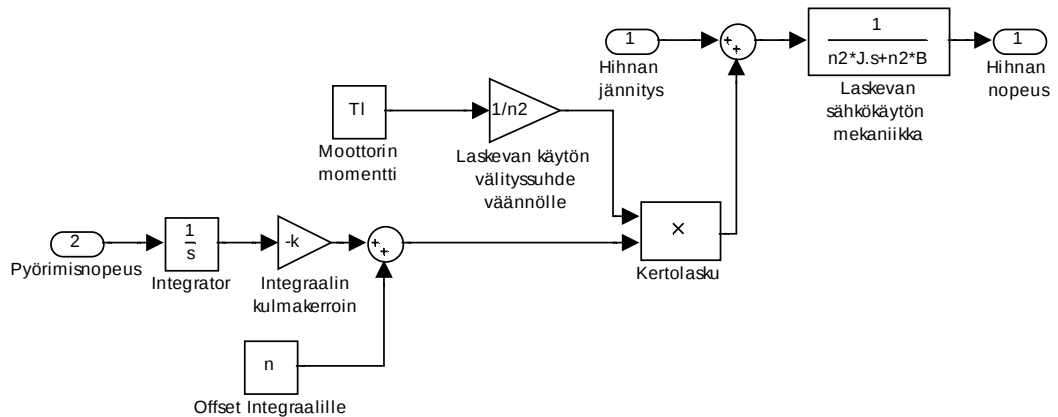
Hihnojen toiminta ei poikkea nosto- ja laskutilanteissa simuloinnin kannalta toisistaan, joten hihnoille nostotilanteessa määritetyt siirtofunktiot pätevät myös mastoa laskettaessa. Myös tässä mallissa hihnasysteemi ja hihnoiden kiinnitetyt massat voidaan kuvitella simulointimallin ymmärtämiseksi pyörivänä systeeminä, vaikka hihnojen moottorin pyörimisnopeudet muutetaankin kuvan 4.10. alimallisessa lineaarisesti liikkeeksi.

4.2.4 Mastoputkien massa ja kitka sekä latvakuorman vaikutus

Mastoputkien laskeutumisjärjestystä ei ole käytännön mastossa määrätty mekaanisilla lukoilla, kuten nousujärjestys. Käytännössä kuitenkin ohuin putki tulee ensin alas ja muut putket useimmiten halkaisijan mukaisessa järjestyksessä. Tämä näkyy simulointimallissa siten, että simuloinnin alkaessa kaikki mastosektiot ovat kuormana ja ne poistuvat yksitellen ohuimmasta alkaen. Muutoin malli ja sen parametrit ovat identtiset maston nostomalliin verrattuna. Latvakuorma sekä hitausmassa ja kitkavoima kytkeytyvät järjestelmään samalla tavalla kuin mastoa nostettaessa (kuva 4.4).

4.2.5 Mastoa laskevan sähkökäytön toiminta

Mastoa laskevan käytön tehtävänä on kelata hihnaa rummulle maston laskeutuksessa ja samalla huolehtia hihnan tiukkuudesta. Mastoa laskevaa käyttöä kuvataan vakiomomentilla, kuten maston noston yhteydessä. Nyt moottorin momentti T_1 ei voi kuitenkaan olla nolla kuten mastoa nostettaessa. Sopiva arvo simulointeja varten on $T_1 = 1 \text{ Nm}$. Tämä on hieman moottorin nimellisvääntömomenttia pienempi arvo, joten se on todennäköisesti lähellä vääntömomenttia, jolla moottori toimisi todellisessa tilanteessa mastoa laskettaessa. Sähkökäytön toimintaa kuvaava alimalli on kuvassa 4.11.

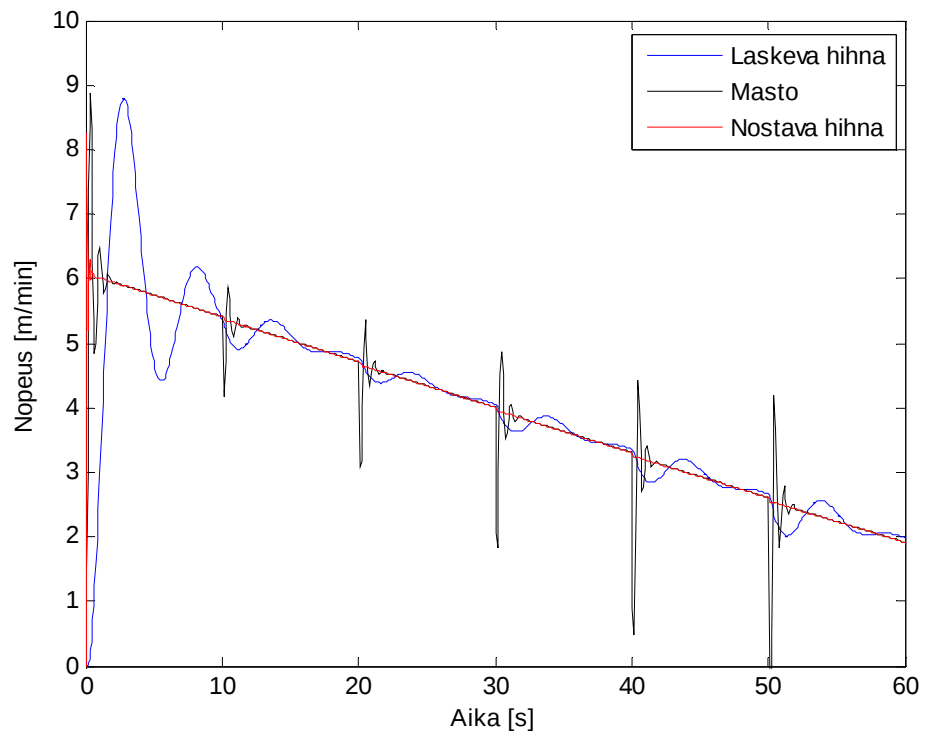


Kuva 4.11. Alimalli, joka kuvaa mastoa laskevan sähkökäytön toimintaa mastoa laskettaessa.

Koska mastoa laskevan moottorin pyörimisnopeus on kiinnostusta herättävä asia, simulointimalliin lisätään vielä välityssuhde, joka muuttaa hihnan liikkeen moottorin pyörimisnopeudeksi. Välityssuhteen alimalli on identtinen kuvassa 4.6. esitetyn mallin kanssa.

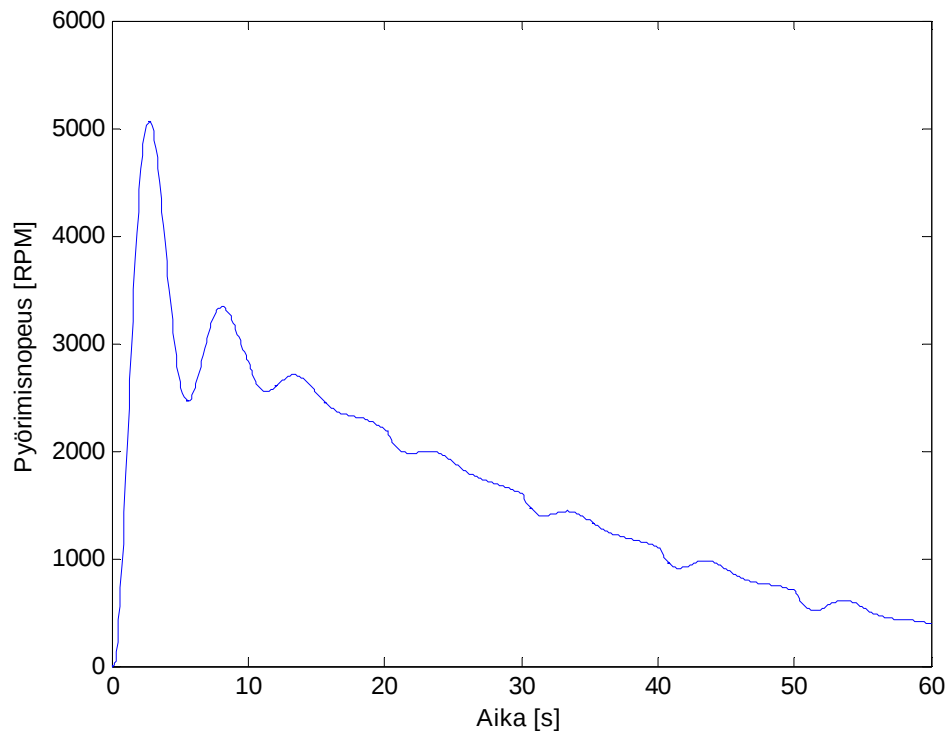
4.2.6 Simulointitulokset laskettaessa mastoa

Mastoa laskeutumista simuloitaessa selvitettiin samoja asioita kuin nostettaessa, hihnojen ja maston nopeuksia sekä laskevan käytön pyörimisnopeuksia. Kuvassa 4.12 esitetään molempien hihnojen ja maston nopeudet mastoa laskettaessa. Kuvan perusteella voidaan todeta maston laskeutuvan ensin nopeammin ja laskun hidastuvan maston tullessa alemmaksi. Tämä selittyy nostavan vinssirummun halkaisijan pienenemisellä laskeutumisen edetessä. Kuten mastoa nostettaessa, myös laskettaessa nostava hihna kulkee lineaarisella nopeudella. Mastosektioiden pysähtyminen ala-asentoon aiheuttaa maston laskunopeuteen samanlaisen värähdysten kuin nostettaessa mastoa. Myös tässä tapauksessa värähdys vaimenee nopeasti.



Kuva 4.12. Laskevan ja nostavan hihnan sekä maston nopeudet laskettaessa mastoa. Hihnojen nopeudet ovat vinssien rumpujen vieressä simuloituja nopeuksia. Mastosektio pysähtyy ala-asentoon aina kymmenen sekunnin välein.

Mastoa laskevan moottorin pyörimisnopeus laskun aikana nähdään kuvasta 4.13.



Kuva 4.13. Mastoa laskevan moottorin pyörimisnopeus mastoa laskettaessa. Maston liikkeelle lähtö näkyy moottorin käynnin suurena värähtelypiikkinä. Myös mastosektion pysähtyminen ala-asentoon näkyy moottorin pyörimisnopeudessa.

Silmiinpistävimpänä havaintona voidaan pitää laskun alkuvaiheessa ilmenevää moottorin pyörimisnopeuden värähtelyä. Värähtely vaimenee kuitenkin noin 10 sekunnin kuluessa simuloinnin alusta. Muutoin maston laskeutuminen sujuu kohtuullisesti, vaikka mastosektioiden pysähtyminen ala-asentoon aiheuttaakin pienen poikkeaman pyörimisnopeuteen.

4.3 Yhteenveto

Simuloinneilla haettiin tukea vääntömomenttisäädetyt käytön toiminnasta ja soveltamisesta mastoa alas vetävään käyttöön. Simulointitulosten valossa vääntömomenttisäädetty käyttö soveltuu käyttötarkoitukseen kohtuullisen hyvin. Pyörimisnopeuden värähtelyä esiintyy, mutta se ei ole voimakkuudeltaan haitallisen voimakasta. On muistettava, että simulointimallin eräiden parametrien, lähinnä

kitkaan sekä hitausmassoihin ja vääntömomentteihin liittyvien, määrittäminen on epätarkkaa. Nämä parametrit vaikuttavat ratkaisevasti simulointituloksiin. Tästä johtuen simulointituloksia on tarkasteltava erityisen kriittisesti.

5. LOPULLINEN PROTOTYYPPILAITTEISTO JA SEN RAKENNE

Työn tuloksena saatiin toimiva ja kaupallistettavissa oleva prototyyppi sähkökäyttöjärjestelmästä. Järjestelmä on testattu 6 metrin EXB-mastolla, mutta sitä voidaan käyttää myös korkeammissa mastoissa. Ennen kaupallistamista järjestelmän mekaaninen rakenne, lähinnä kotelointi ja tarvittavien rajakytkimien sijoittaminen mastoon, vaatii kuitenkin lisäsuunnittelua. Tätä mekaniikkasuunnittelua ei sisällytetty tähän työhön työn muodostuessa varsin laajaksi sähkökäyttötekniseltä osuudeltaan.

5.1 Laitteiston toimintaperiaate eri tilanteissa

Työn alkuvaiheessa selvitettiin, kuinka ja missä moodissa (moottori, generaattori tai vapaasti pyörivä) sähkökäyttöjen tulisi eri tilanteissa toimia, jotta maston hyvä käyttäytyminen saavutetaan. Maston sähkökäyttöjen toimintaa on tarkasteltu kolmessa eri tilanteessa, joita ovat maston nostaminen ja laskeminen sekä mahdollisen jumitilanteen poistaminen.

5.1.1 Maston nostaminen

Alkuoletus oli, että mastoa nostettaessa nostava käyttö toimii moottorina määräten maston nousunopeuden ja laskeva käyttö toimisi joko generaattorina (jarruna) tai vapaasti pyörivänä ilman tehonsyöttöä huolehtien tällä tavalla hihnan sopivasta kireydestä. Varsin nopeasti havaittiin, että molempia sähkökäyttöjä tulee kuitenkin käyttää moottorikäyttöinä noston aikana. Testien perusteella todettiin, että laskevan käytön sisäiset kitkamomentit ovat liian suuria sopivan hihnakireyden aikaansaamiseksi noston aikana, vaikka mastoa laskevan moottorin annettaisiin pyöriä vapaasti ilman tehonsyöttöä. Kitkavoimien suuri vaikutus voidaan selittää mastosta päin katsottuna nopealla vinssin ja vaihteen välityssuhteella. Laskevan käytön moottoriin pitää siis syöttää pieni moottorin pyörimistä edistävä virta mastoa nostettaessa. Sopivaksi virran suuruudeksi määritettiin hihnakireyttä tutkimalle noin 3–4 A. On huomattava, että virran on oltava ehdottomasti pienempi kuin

sähkökäytön tyhjäkäyntivirta. Muutenhan sähkökäyttö purkaisi noston aikana hihnaa vinssin rummulta, eikä hihna pysyisi tiukalla.

5.1.2 Maston laskeminen

Myös mastoa laskettaessa molemmat sähkökäytöt toimivat moottoreina. Mastoa nostava käyttö pyörii nimellispyörimissuuntaansa vastaan nimellisnopeudellaan ja määrää maston laskeutumisenopeuden. Mastoa laskevan sähkökäytön päätarkoitus on varmistaa maston hallittu laskeutuminen. Laskevan sähkökäytön ankkurivirran arvon tulee olla noin 11–13 A. Tällöin masto laskeutuu jouhevasti ja hihnojen kireydet pysyvät sopivina.

5.1.3 Jumiutumistilanteen poistaminen

Masto on saatava hallitusti alas, vaikka se jäätyisi tai jäisi muusta syystä jumiin. Jumiutumistilanteen poistoa varten moottoreiden on tarvittaessa kyettävä antamaan riittävän suuri hetkellinen vääntömomentti. Nostavan sähkökäytön vääntömomenttia rajoittavat ainoastaan järjestelmän sulake- ja lämpösuojauskomponentit sekä kierukkavaihteen levykytkin. Jumiutumistilannetta ei kuitenkaan aina saada laukeamaan mastoa nostamalla, sillä on mahdollista, että masto jumiutuu yläasentoonsa. Tällöin tilanne on pystyttävä laukaisemaan mastoa laskemalla. Tätä varten tarvitaan vielä kolmas moottorivirran raja, jossa alas vetävän moottorin virta on normaalia maston laskeutumistilannetta suurempi. Laskevan moottorin moottorivirran arvoksi voi asettaa jumilanteessa esimerkiksi 20 A, jolloin käyttö vetää mastoa alaspäin vinssin rummulla olevasta hihnamäärästä riippuen 1800–3600 N voimalla, kun vaihteen välityssuhde on 1:14 ja vinssinä käytetään 150 mm vakiovinssiä. Mastoa ei ole testattu todellisessa jumiutumistilanteessa, mutta voidaan olettaa edellä mainitun suuruisen impulssimaisen voiman olevan riittävän suuri laukaisemaan jumiutumistilanteen.

Järjestelmän tulee havaita maston jumiutuminen automaattisesti, sillä mastoa käyttävä henkilö ei välttämättä näe, laskeutuuko masto. Äänenkään perusteella jumiutumisesta ei välttämättä havaita, sillä mastoa nostava moottori voi pyöriä pur-

kaen hihnaa vinssin rummulta, vaikka masto ei laskeutuisi. Jumiutumistilanne voidaan havaita mastoa laskettaessa tarkkailemalla mastoa nostavan hihnan kireyttä. Tämän vuoksi mastoon on mahdollista lisätä rajakytkin, jolla hihnan mahdollinen löystyminen havaitaan. Rajakytkin katkaisee moottoreita ohjaavan jännitesignaalin havaitessaan hihnan löystyneen, jolloin molempien moottoreiden tehonsyöttö katkeaa.

Järjestelmään on lisätty erillinen kytkin, jolla voidaan kytkeä hetkellisesti mastoa alas vetävään moottoriin edellä mainittu suurempi virta jumiutumistilanteen laukaisemiseksi. Kytkeä on tehty niin, että suuremman virran kytkeminen onnistuu ainoastaan silloin, kun hihnan kireyttä tarkkaileva rajakytkin on tunnistanut hihnan olevan löysällä.

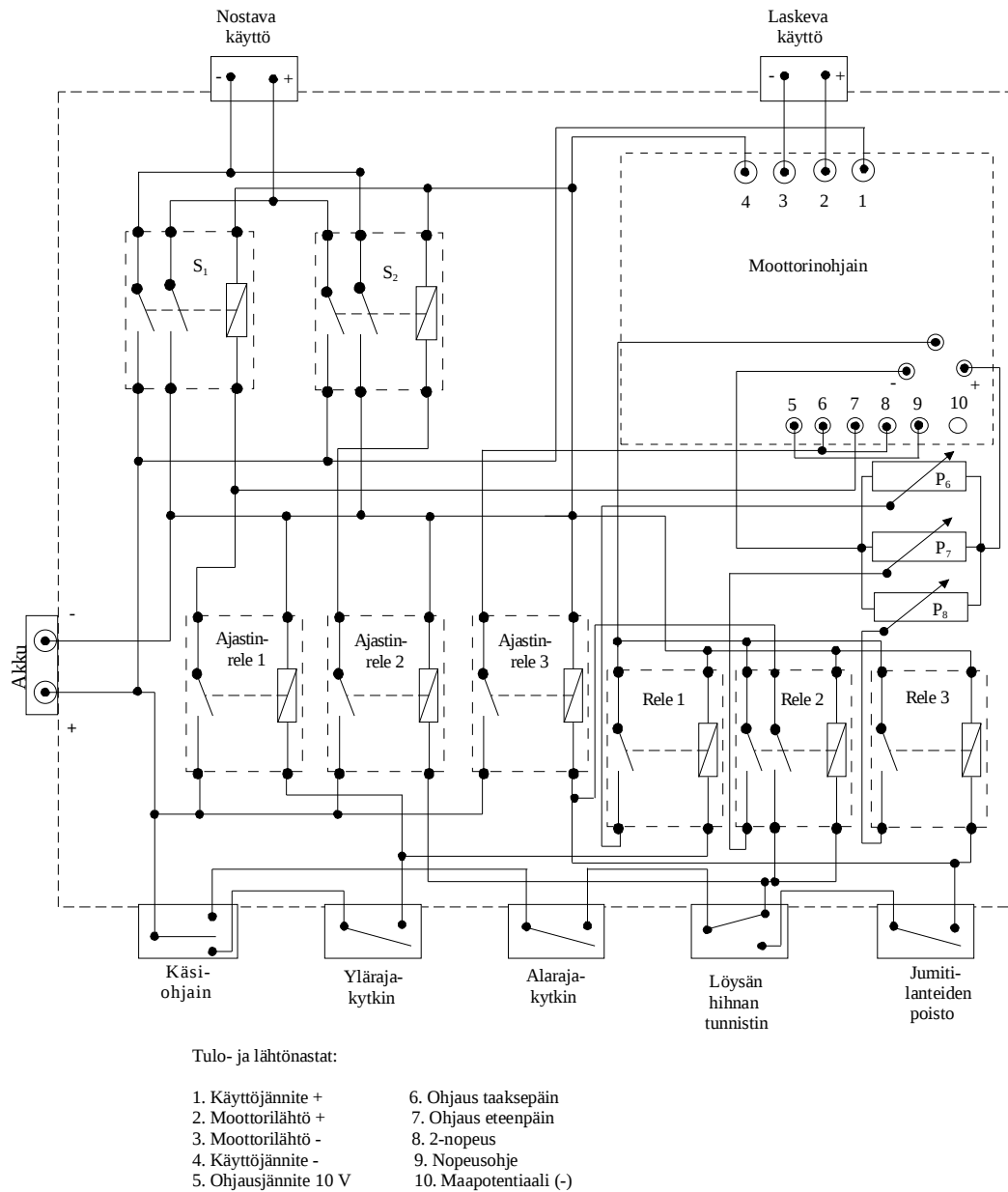
5.2 Sähkökäyttöjen ohjaus

Sähkökäyttöjen ohjausmenetelmiä vertailtaessa haettiin mahdollisimman yksinkertaista ja edullista, mutta kuitenkin käyttöominaisuuksiltaan tyydyttävää ratkaisua. Maston käyttöolosuhteet vaihtelevat kovasta pakkasesta helteeseen ja vesisaateeseen, joten ohjausjärjestelmän tulee toimia myös vaikeissa olosuhteissa. Lopullisen ohjausjärjestelmän pääperiaate on se, että mastoa nostavaa sähkökäyttöä ohjataan kontaktorien avulla. Tämä on mahdollista, koska nostavalta sähkökäytöltä ei vaadita säädettävyyttä. Mastoa alas vetävän sähkökäytön on oltava tällöin säädettävä, joten sitä täytyy syöttää moottorinohjainkortin kautta.

5.2.1 Moottorinohjaimen toiminta ja sen soveltaminen vääntömomenttisäätöön

EM-115-moottorinohjain on perusluonteeltaan nopeusohjain, eikä sitä ole tarkoitettu suoranaisten vääntömomenttisäädön toteuttamiseen. Vääntösäätö voidaan kuitenkin toteuttaa epäsuorasti ohjaimen avulla, kuten jo aiemmin luvussa 3.2 todettiin. Vääntösäädön toteuttamiseen on kaksi vaihtoehtoa, säätö voidaan toteuttaa EM-115-moottorinohjaimen avulla joko ulkoisen PI- tai PID-säätimen avulla tai

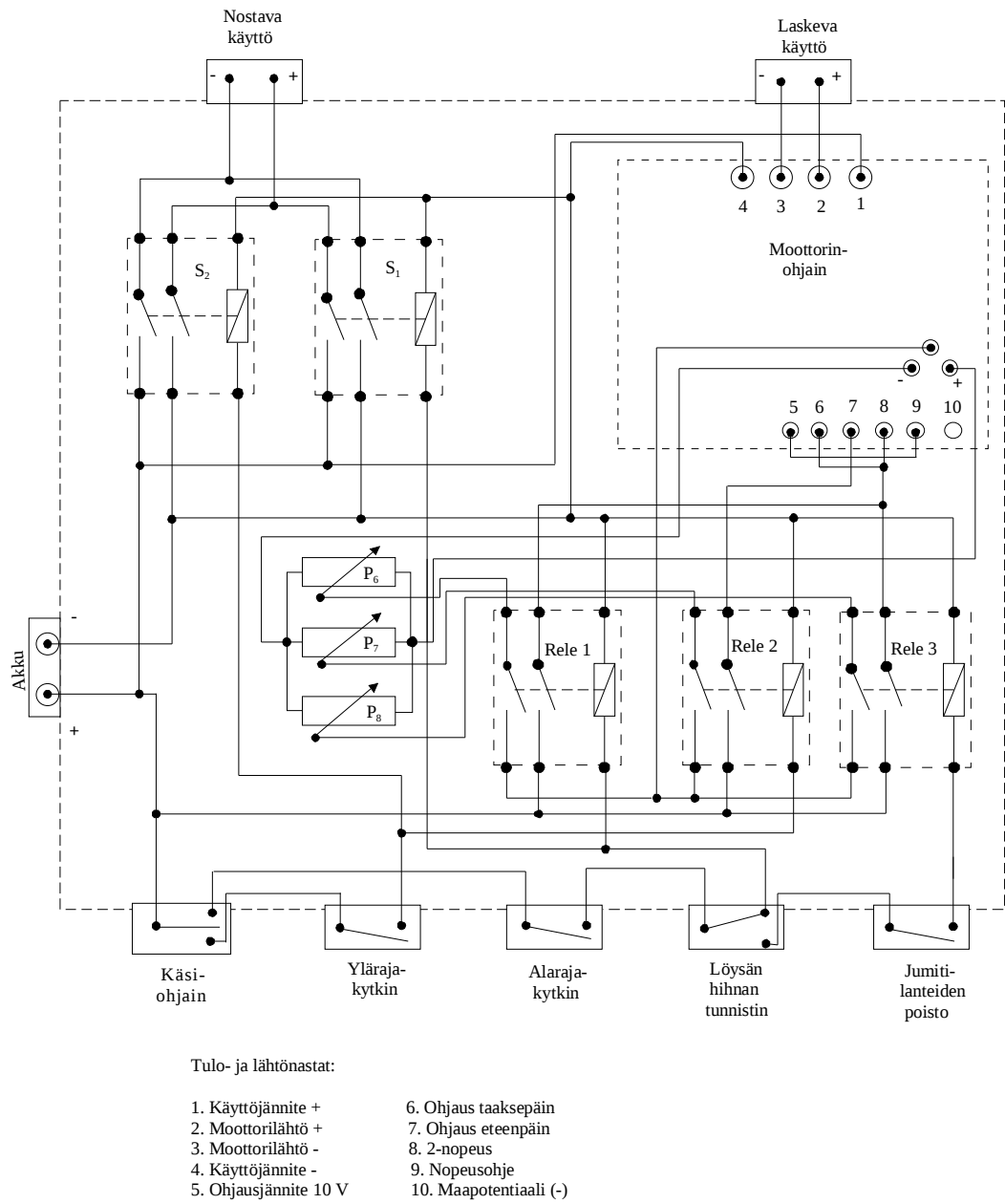
vaihtoehtoisesti moottorinohjaimen virranrajoitustoimintoa hyväksikäyttäen. Koska erillinen säädin lisäisi järjestelmän kompleksisuutta ja hintaa, vääntösäätö toteutettiin ohjaimen virranrajoitusta ja siihen liitettyjä ulkoisia potentiometrejä käyttäen. Potentiometrejä tarvitaan sama määrä kuin moottorinohjaimelta haluttujen virtatasojen (vääntömomenttiarvojen) määrä. Tässä tapauksessa halutaan siis kolme eri vääntömomentin arvoa (nosto-, lasku- ja jumiutumistilanteet), joten tarvitaan siis kolme erillistä virranrajoituspotentiometriä. Potentiometrit kytketään moottorinohjainkortin virranrajoitustrimmerin tilalle kytkentäkaavion mukaisesti, kuva 5.1. Kulloinkin käytettävä virranrajoituspotentiometrin välipotentiaali kytketään käsiohjaimen (painonappikytkin, jolla käyttäjä ohjaa mastoa) käyttämän releen avulla moottorinohjainkortille.



Kuva 5.1. Ohjauslektroniikan kytkentäkaavio käytettäessä prototyypin vakiomallista EM-115-moottorinohjainta. Kytkennässä tarvitaan ajastinreleitä, koska moottoreiden käynnistystä täytyy viivastaa hiukan, jotta moottorinohjain ehtii tunnistaa siihen kytketyn virtarajan.

Prototyypin ohjauskytkentään jouduttiin lisäämään lisäksi kolme ajastinrelettä, koska moottorinohjaimen ohjelmisto ei kykene tarkkailemaan ohjaimelle asetetun virtarajan muutosta riittävän nopeasti. Tavallisilla releillä toteutettu kytkentähän kytkisi virtarajan ohjaimelle ja käynnistäisi moottorin samanaikaisesti. Kytkentä-

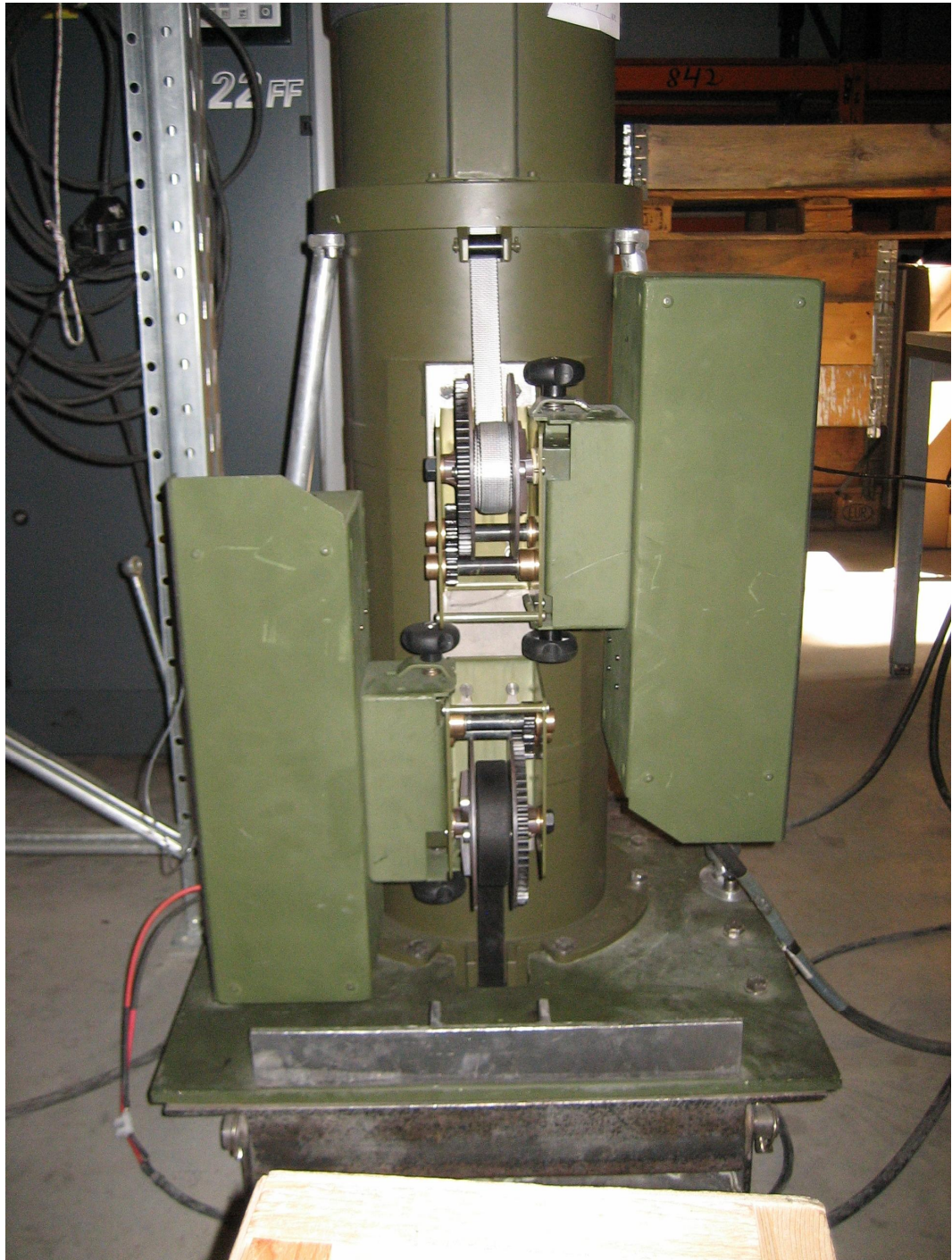
kaavio tästä tilanteesta on kuvassa 5.2. Mikäli ohjain ei kykene reagoimaan virtarajan olemassaoloon riittävän nopeasti, moottori ehtii pyöriä hetken ilman virranrajoitusta. Kun nimenomaan virranrajoitus on moottorin pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia rajoittava tekijä, mastoa laskeva moottori ryntää käynnistystilanteessa hetkellisesti. Moottorinohjaimen valmistajalta saadaan kuitenkin sarjatuotantomastoja varten päivitetty ohjelmistoversio, joka todennäköisesti ratkaisee tilanteen niin, ettei ajastinreleitä tarvita, vaan virranrajoituspotentiometri voidaan kytkeä samanaikaisesti moottorin käynnistymisen kanssa. Kytkentäkaavio yksinkertaistuu tällöin edellä mainitun kuvan 5.2 kaltaiseksi.



Kuva 5.2. Ohjauselektroniiikan kytkentäkaavio käytettäessä modifioitua moottorinohjaimen ohjelmistoa. Ajastinkytkentää ei tarvita, sillä moottorinohjain tunnistaa siihen kytketyn virtarajan riittävän nopeasti. Modifikaatio on kannattavaa tehdä, sillä kytkentä yksinkertaistuu huomattavasti, eikä kalliita ajastinreleitä tarvita.

5.3 Moottorit ja voimansiirto

Prototyypin moottorit ja vaihteistot on sijoitettu nykyisin tuotannossa olevaan WPU-koteloihin, jotka puolestaan kiinnitetään vinsseihin. Prototyypin rakenne näkyy kuvassa 5.3. Ennen kaupallista tuotantoa tehtävä mekaniikkasuunnittelu voi muuttaa tätä rakennetta huomattavasti. Mekaniikkasuunnittelun tarkoituksena on saada laitteistosta aiempaa kompaktimman kokoinen ja rakenteeltaan käyttäjäystävällisempi. Yksi ratkaisumalli olisi koteloida molemmat sähkökäytöt saman kotelon sisälle. Nykyiset erilliset kotelot ovat kömpelöitä käsitellä ja vievät paljon tilaa, jos ne asennetaan eri puolille mastoa. Mikäli sähkökäyttöjen kotelointiin tehdään muutoksia, kannattaa samalla miettiä, voisiko vinssien rakennetta ja kiinnitystapaa mastoon parantaa. Molempien sähkökäyttöjen sijoittaminen samalle puolelle vaatii joka tapauksessa jommankumman vinssin kätisyyden muuttamisen siten, että vinssin käyttöakseli on päinvastaisella puolella mastoa kuin nykyisin.



Kuva 5.3. Prototyypin maston vinssijärjestelmän rakenne. Mastoon on kiinnitetty kaksi erillisvinssiä, joihin WPU:t kiinnitetään. Rakenne kaipaa vielä mekaniikkasuunnittelua ennen järjestelmän lopullista kaupallistamista.

5.3.1 Moottorit

Prototyypin molempien käyttöjen moottorit ovat Amer MP80S/2-kestomagneettitasavirtamoottoreita. Moottorityyppiä käytetään kaikissa Mastsystemin valmistamissa 24 V sähkökäytöissä. Se on markkinoiden edullisimpia moottoreita teholuokassaan ja kooltaan kohtalaisen kompakti. Moottorin dynamiikka on riittävä myös vääntösäädettyyn käyttöön, joten esteitä moottorityypin käyttämiselle myös tässä sovelluksessa ei ole.

5.3.2 Vaihteet

Nostavan vinssin vaihteena käytetään myös muiden mastotyyppien sähkökäytöissä käytettyä STM RMI 50P -kierukkavaihdetta. Kierukkavaihte sisältää jousikuormitteisen levykytkimen, joka toimii ylikuormitussuojana. Levykytkimen suurinta läpi menevää momenttia voidaan säätää portaattomasti. Vaihteiden suurimmaksi toisiovääntömomentiksi on yleensä säädetty 70 Nm, ja se on sopiva arvo myös nostavan vinssin suurimmaksi toisiomomentiksi. On huomattava, että mekaaninen levykytkin tuottaa voimakkaasti lämpöä luistaessaan, joten se ei voi olla järjestelmän olla ainoa ylikuormitussuoja. Normaaileilla latvakuormilla välityssuhteena käytetään prototyypissäkin käytettyä 1:40, mutta myös 1:28 tulee kysymykseen, mikäli halutaan nopeuttaa maston nousemista ja laskeutumista.

Mastoa laskevan käytön vaihteena käytetään STM SM 25 -lieriökartiovaihdetta. Lieriökartiovaihte on ulkomitoiltaan hiukan kierukkavaihdetta suurempi ja painavampi. Paino- ja kokoerot eivät ole kuitenkaan merkittäviä. Lieriökartiovaihte ei sisällä minkäänlaista mekaanista ylikuormitussuojausta. Asia on otettava huomioon sähkökäyttöä ja sen suojausta suunniteltaessa. /14/

5.3.3 Vinssit

Prototyypissä käytetään 150 mm rummulla varustettuja vinssejä. Vinssejä on saatavissa kahdella eri välityssuhteella. Poikkeustapauksia lukuun ottamatta käytetään nopeampaa (vakiomalli) 1:8 välityssuhdetta. Mastoa nostavan käytön vinssi sisältää mekaanisen jarrun, joka on vakiovarusteena vinsseissä. Laskevasta käy-

töstä jarru on kuitenkin poistettu, koska se estäisi rummun ja samalla sähkökäytön pyörimisen noston aikana, eikä maston nostaminen olisi mahdollista. Kytettäessä vinssejä testimastoa korkeampiin mastoihin on muistettava tarkistaa, mahtuuko vinssin rummulle riittävä määrä hihnaa, vai pitääkö käyttää rumpukooltaan suurempaa vinssiä. Käytettävissä on 150 mm vinssin lisäksi 200, 240 ja 300 mm vinssit. Vinssien välityssuhteet hidastuvat rumpukoon kasvaessa.

5.3.4 Välityssuhteiden mitoittaminen

Vaihteistojen välityssuhteet on mitoittettava huolellisesti, sillä masto pitää kyetä nostamaan mahdollisimman lyhyessä ajassa ylös, mutta toisaalta virrankulutuksen on pysyttävä ennalta määritetyissä rajoissa. Ensin määritetään päävinssin välityssuhde. Tähän ei ole mitään laskennallista menetelmää, vaan päävinssin vaihteisto on valittava aikaisempien kokemusten ja testitulosten mukaan. Liian nopea vaihteisto nostaa järjestelmän virrankulutuksen liian korkeaksi maston noston aikana. Toisaalta vaihteisto ei saa olla liian hidas. Tällöin maston nousu- ja laskuajat muodostuvat liian pitkiksi, vaikka järjestelmän kokonaisvirrankulutus muodostuisikin hieman nopeammaksi mitoittettua vaihdetta pienemmäksi. Päävinssin sähkökäytössä käytetään yleisimmin välityssuhteeltaan joko 1:28 tai 1:40 kierukka-vaihteistoa.

Hihnan sopivasta kireydestä huolehtivan apuvinssin sähkökäytön vaihteeksi sopii parhaiten lieriökartiovaihde kokonsa ja vapaasti rullaavuutensa ansiosta. Vaihteen välityssuhde täytyy valita siten, että apuvinssin pienin laskennallinen hihnanopeus moottorin nimellisnopeudella on suurempi kuin päävinssin suurin laskennallinen hihnanopeus. Tämä on erittäin tärkeää järjestelmän toiminnan kannalta. Toisaalta apuvinssin vaihdetta ei kannata valita liian nopeaksi, sillä se pienentäisi apuvinssin hihnaan muodostaman voiman suuruutta mastoa laskettaessa. Tämä voisi olla ongelmallista, jos masto jäätyy tai putkien välinen kitka vaihtelee huomattavasti. Pienimmällä laskennallisella hihnanopeudella tarkoitetaan tässä yhteydessä hihnan nopeutta moottorin nimellipyörimisnopeudella silloin, kun vinssin rumpu on

tyhjä ja vastaavasti suurin hihnanopeus saavutetaan rummun hihnamäärän ollessa suurimmillaan.

Käytännössä riittää, kun tarkastellaan hihnanopeuksia maston ollessa lähellä yläasentoaan. Tällöin päävinssin rummulla oleva hihnamäärä on suurimmillaan ja apuvinssin rummulla on vähiten hihnaa. Hihnanopuksien laskentaa varten tarvitaan tiedot vinssien rumpujen halkaisijoista hihna mukaan lukien. Pienimmillään halkaisija voi olla käytännössä sama kuin tyhjän rummun halkaisija, joka on 60 mm. Se, mikä rummun halkaisija on suurimmillaan, riippuu käytetyn hihnan pak-suudesta ja maston korkeudesta (hihnan pituudesta). Kuusi metriä korkean EXB-maston tapauksessa vinssin rummun halkaisija on suurimmillaan noin 120 mm.

Välityssuhteiden laskennan havainnollistamiseksi tehtiin liitteessä VI esitetty taulukko, jolla havainnollistetaan hihnanopeuksien laskentaa. Käyttämällä vastaavaa sähköisessä muodossa olevaa Excel-tiedostoa, on mahdollista muutamalla sijoituksella todeta sopiva välityssuhde apuvinssin vaihteistolle.

5.3.5 Muita järjestelmän käytössä huomioitavia tekijöitä

Säädettävän moottorikäytön moottorinohjaimelle pitää tehdä tiettyjä lähinnä hihnojen kireyteen vaikuttavia säätöjä ennen järjestelmän käyttöönottoa. Nämä moottorinohjainkortille tehtävät säädöt tehdään monikierrospotentiometrien ja trimmerien avulla. Säädön suorittaminen on kuvattu yksityiskohtaisesti liitteessä IV. Peruseriaate on, ettei järjestelmää tarvitse säätää käyttöönoton jälkeen muutoin kuin poikkeustapauksissa, esimerkiksi silloin, kun ohjauslaitteet vaihdetaan mastosta toiseen, tai voimansiirron välityssuhteita muutetaan. Kun moottorinohjaimen säätöpotentiometrit ja -trimmerit ovat säädetty, kannattaa ne lukita sopivalla tavalla, ettei säätö muutu tärinän tai muun ulkoisen tekijän vuoksi.

Järjestelmää syöttävän tasajännitteen on oltava suodatettu siten, että sen aaltoisuus on korkeintaan 20 %. Puhtaasti akkusyöttöisissä käytöissä tämä ei ole ongelma, mutta on hyvä pitää mielessä käytettäessä tasasuuntaajaan perustuvaa tehölähdet-

tä. Esimerkiksi suodattamaton diodisillan tuottama jännite ei sovellu sellaisenaan järjestelmän jännitelähteeksi, vaan vaatii riittävän suuren suodatuskondensaattorin. Sähkökäyttöjen ohjauslaitteet kestävät hyvin tavanomaisia olosuhteita. Hiekka ja muut epäpuhtaudet eivät ole ongelma suljetun koteloratkaisun ansiosta. Ongelmia voi syntyä lähinnä poikkeuksellisen kuumissa olosuhteissa, jolloin ohjaus-elektroniikkaa sisältävän kotelon sisälämpötila voi nousta liian korkeaksi. Ohjaus-elektroniikka kestää vaurioitumatta hieman yli 50°C lämpötiloja.

5.4 Sähkökäyttöjärjestelmän ylikuormitussuojaus

Vinssien sähkökäytöt on suojattava ylikuormitustilanteiden varalta. Tasavirtamoottoreita ja moottorinohjainta voidaan hetkellisesti (korkeintaan muutamia sekunteja) ylikuormittaa, mutta pidempiaikainen ylikuormitus voi tuhota komponentteja termisesti. Mastoa nostavan käytön vaihde on varustettu mekaanisella ylikuormituskytkimellä, joka luistaa äärimmäisessä jumiutumistilanteessa, kun mastoa yritetään nostaa. Mastoa laskevassa käytössä ei ole vastaavaa mekaanista ylikuormituskytkintä. Molemmat sähkökäytöt varustetaan termisellä ylikuormitusreleellä. Mekaaninen ylikuormituskytkin ei ole riittävä suoja nostavaan käyttöön sillä se kuumenee voimakkaasti luistaessaan. Sähkökäyttöjen suojauksen lisäksi jännitelähteeltä ohjaus-elektronikalle tuleva syöttö suojataan kuitattavalla pääsulakkeella. Moottorinohjain on lisäksi suojattu ohjaimen valmistajan toimesta normaalilla 30 A:n lankasulakkeella.

5.5 Kustannustarkastelu

Uuden tuotteen, tässä tapauksessa vinssijärjestelmän, kaupallistamisessa tuotteen valmistuskustannukset vaikuttavat merkittävästi tuotteen kaupallistamismahdollisuuksiin. Kehitetyn vinssijärjestelmän tapauksessa vanha tuplarumpuvinssiin perustuva järjestelmä kilpailee puutteistaan huolimatta kehitetyn järjestelmän kanssa myös kustannusmielessä. Taulukosta 5.1 nähdään molempien vinssijärjestelmien valmistuskustannukset ja niiden muodostuminen. Kustannusten muodostumisen keskeinen ero vinssijärjestelmien välillä on siinä, että tuplarumpuvinssi on hinnal-

taan huomattavasti kahta erillisvinssiä kalliimpi, mutta toisaalta erillisvinssiratkaisuun tarvitaan kaksi WPU:ta. Kokonaiskustannukset ovat likimain samat, joten uusi vinssijärjestelmä kannattaa kaupallistaa parempien ominaisuuksiensa vuoksi.

Taulukko 5.1. Työssä kehitetyn erillisvinssijärjestelmän valmistuskustannukset verrattuna tuplarumpuvinssiin perustuvan järjestelmän kustannuksiin. Taulukosta nähdään, että kokonaiskustannukset muodostuvat likimain samoiksi kummallakin vinssijärjestelmällä.

Komponentit/työ	Tuplarumpuvinssikäyttö (€)	Uusi erillisvinssijärjestelmä (€)
WPU:t	625	2x625=1250
Vinssit	1200	2x200=400
Ohjauselektronikka	200	350
Käsiohjain	100	100
Muut osat (kaapelit ym.)	200	200
Alihankinta (arvio)	150	150
Yhteensä	2475	2450

Kustannustarkastelussa ei ole huomioitu järjestelmän jatkokehityksestä, lähinnä mekaniikkasuunnittelusta ja testauksesta aiheutuvia lisäkustannuksia. Näiden kustannusten vaikutus vinssijärjestelmän lopulliseen hintaan jäänee kuitenkin varsin pieneksi. Valmistuskustannuksia voidaan pienentää tilaamalla kerralla suurempia komponenttimääriä, mikäli mastojen myyntivolyymien koko ja varastointilogistiikka sallivat sen.

5.6 Järjestelmän sähkömagneettinen yhteensopivuus

Koska vinssien sähkökäyttöjärjestelmästä syntyy kaupallinen tuote, täytyy järjestelmän suunnittelussa ottaa huomioon myös järjestelmän sähkömagneettinen yhteensopivuus (EMC, Electromagnetic Compatibility). Sähkökäyttöjärjestelmä sisältää useita komponentteja, jotka toimivat sähkömagneettisen säteilyn lähteinä, suurimpia näistä häiriölähteistä ovat tasavirtamoottorit ja -hakkuri. Myös moottorinohjainkortin pienjännitesignaalit voivat tuottaa korkeataajuisia häiriöitä. Sähkömagneettiset häiriöt voidaan jakaa etenemistapansa perusteella säteileviin ja johtuviin häiriöihin. /13/

Sähkömagneettisten häiriöiden syntymistä on mahdotonta estää käytettäessä häiriöitä tuottavia komponentteja, kuten hakkureita, digitaalelektroniikkaa ja tasavirtamoottoreita. Häiriöiden syntymistä voisi toki vähentää komponenttien paremmalla suunnittelulla, mutta siihen ei aina voida vaikuttaa käytettäessä kaupallisia komponentteja. Häiriöiden leviämistä ympäristöön voidaan kuitenkin vähentää tehokkaasti oikeanlaisilla toimenpiteillä, joista tärkein on komponenttien oikeanlainen kotelointi ja metallivaipalla suojattujen johdotusten käyttäminen. Komponentit tulee koteloida umpinaisilla sähköä johtavilla kotelomateriaaleilla. /13/

Käytännössä kotelointi on toteutettu sijoittamalla kaikki moottorinohjauselektronikkakomponentit yhteen tiiviiseen alumiinikoteloon. Moottorista ja vaihteistosta koostuvat WPU:t on puolestaan koteloitu peltikoteloihin, jotka kiinnitetään vinsseihin. Lisäksi WPU-koteloihin on häiriöiden vähentämiseksi lisätty toroideja (kuristimia), jotka eliminoivat korkeataajuisia häiriöitä. Kaupallisten sarjatuotantomastojen sähköjohdotuksissa tullaan käyttämään metallivaipalla suojattuja johtimia. Liittiminä käytetään metalliliittimiä, joiden metallikuori yhdistetään johtimien suojavaippaan. Tällöin järjestelmästä ei pääse vuotamaan häiriösäteilyä ulkomailmaan.

5.7 Laitteiston jatkokehitys

Kuten aiemmin mainittiin, laitteistolle tehdään mekaniikkasuunnittelua ennen sen markkinointia. Mekaniikkasuunnittelun keskeisin tehtävä on miettiä, kuinka kahden WPU:n järjestelmästä saadaan helposti käsiteltävä ja kompakti. Joitakin asiaan liittyviä ideoita ja ratkaisuvaihtoehtoja on tullut esille jo tämän diplomityön edetessä. Järjestelmän toiminnallisuuden kannalta järjestelmän jatkokehitykselle ei ole tällä hetkellä tarvetta. On kuitenkin muistettava, ettei vinssijärjestelmää ole testattu kenttäolosuhteissa. Kenttäkokemus ja asiakkailta saatava palaute kertovat aikanaan lopullisen vastauksen järjestelmän toimivuudesta.

Tuotekehitysprojektin kuluessa nousi esiin kysymys siitä, voisiko sähkökäytöt mitoittaa nykyistä pienemmäksi ja siten mahdollisesti hinnaltaan edullisemmaksi. Seuraavassa laskuesimerkissä on havainnollistettu, kuinka paljon mekaanista tehoa todella tarvitaan maston (ja latvakuorman), jonka massa on 150 kg, nostamiseen viiden metrin korkeuteen minuutin kuluessa.

Tarvittava mekaaninen teho P_{nosto} mastoa nostettaessa on

$$P_{\text{nosto}} = \frac{W_{\text{nosto}}}{t_{\text{nosto}}} = \frac{m_{\text{kuorma}} gh}{t_{\text{nosto}}} = \frac{150\text{kg} \cdot 9,81\text{m/s}^2 \cdot 5\text{m}}{60\text{s}} = 122,6\text{W}, \quad (5.1)$$

missä W_{nosto} on maston nostoon tarvittavan työn määrä, m_{kuorma} on nostettava massa, t_{nosto} on nostoon kuluva aika, h maston nostokorkeus ja g putoamiskiihtyvyys.

Jos teemme varovaisen oletuksen, että voimansiirron kokonaishyötysuhde olisi 40 %, riittäisi maston nostamiseen hieman yli 300 W:n akseliteho. Mastossa käytetty moottori on nimellisteholtaan 600 W S1 -käyttötavan mukaan (jatkuva käyttö), joten tätä pienemmän moottorin käyttö voisi olla teoriassa mahdollista. Maston käyttö on usein enemmän tai vähemmän jaksottaista, joten moottori voidaan mitoittaa maston käyttösykleistä riippuen esimerkiksi S2 -käyttötavan mukaan. On kuitenkin huomattava, että käytetty moottorityyppi on hinnaltaan edullinen, eikä sen korvaaminen pienemmällä moottorilla merkittävästi pienennä vinssijärjestelmän kokonaiskustannuksia. Moottorin ylirajoitus voi olla perusteltua, sillä emme tiedä, millainen voimansiirron hyötysuhde todella on, ja kuinka suuria latvapainoja mastoissa tulevaisuudessa käytetään.

6. ERI LAITTEISTOVERSIOILLE SUORITETUT TESTAUKSET JA MITTAUKSET

Työn alkaessa, ennen varsinaisen tuotekehitysprosessin alkamista tutustuttiin tuplarumpuvinssikäytön rakenteeseen ja toimintaan ja mitattiin järjestelmän tärkeimmät testitulokset. Lisäksi testattiin Lasse Vaittisen kehittämä nopeussäädetty konfiguraatio sekä tässä työssä kehitetty vääntösäädetty versio.

6.1 Mittaustulokset ja johtopäätökset

Kaikkien testattujen sähkökäyttöversioiden mittaustulokset on esitetty taulukossa 6.1. Testeissä mitattiin nousu- ja laskuajat, järjestelmän kokonaisvirrankulutukset nostettaessa ja laskettaessa sekä akun napajännite ajon aikana. Hihnojen kireyttä tarkkailtiin ajon aikana ja maston käyttäytymisestä tehtiin silmävaraisia havaintoja.

Taulukko 6.1 Eri sähkökäyttöversioille tehtyt mittaukset. Mittaustulokset ovat laskettu viiden noston ja laskun keskiarvona 50 kg latvapainoa käyttäen täysin pystysuoralle mastolle.

Mitattu suure	Tuplarumpuvinssikäyttö	Nopeussäädetty käyttö	Vääntösäädetty käyttö
Nostoaika	2 min 24 s	1 min 33 s	1 min 20 s
Virrankulutus nostettaessa	24-26 A	22-25 A	21-23 A
Laskuaika	2 min 13 s	1 min 23 s	1 min 13 s
Virrankulutus laskettaessa	20-23 A	18-21 A	18-20 A
Akun napajännite	26.0 V	26.0 V	26.0 V
Hihnojen kireys	Tiukka	Vaihtelee	Sopiva
Maston käyttäytyminen	Tyydyttävä	Huono	Hyvä

6.1.1 Tuplarumpuvinssijärjestelmä

Tuplarumpuvinssikäyttöä on käytetty tähän saakka tuotannossa olleissa EXB-mastoissa, ja siitä on vuosien kenttäkokemus. Testattu masto oli varustettu vakio-moottorilla ja 1:80 kierukkavaihteella. Tuplarumpuvinssikäytöllä varustettu masto on selkeästi hitain testatuista konfiguraatioista nosto- ja laskuajojen perusteella tarkasteltuna. Hitaudesta ei kuitenkaan seuraa muita konfiguraatioita matalampaa virrankulutusta, vaikka niin voisi helposti olettaa. Tämä johtunee tuplarumpuvin-

sin mekaanisesti monimutkaisesta rakenteesta, joka pienentää käytön kokonaishyötysuhdetta. Tuplarumpuvinssikäyttöinen masto toimii kohtuullisen hyvin testiolosuhteissa. Aikaisempien kenttäkokemuksien perusteella ongelmaksi muodostuvat jumiutumistilanteet mastoa laskettaessa. Tällöin tuplarumpuvinssin alas vetävän rummun jousi kiertyy tiukemmalle tiukaten alas vetävää hihnaa. Samalla nostava hihna löystyy. Kun tilanne laukeaa, masto putoaa hieman alaspäin, kunnes nostava hihna taas tiukkenee. Jumiutumistilanteiden lisäksi ongelmana on se, että maston tyydyttävän toiminnan varmistamiseksi hihnat joudutaan pitämään varsin tiukalla. Tämä rasittaa hihnoja sekä mastossa olevia laakerirullia, jotka ohjaavat hihnan kulkua. Käytännön olosuhteissa hihnoja sekä laakereita joudutaan tästä johtuen vaihtamaan varsin usein. Lisäksi hihnat venyvät tiukkuudesta johtuen jatkuvasti, jolloin niitä joudutaan tiukkaamaan säännöllisesti.

6.1.2 Nopeussäädetty sähkökäyttöjärjestelmä

Työn alkuvaiheessa testattiin Lasse Vaittisen opinnäytetyössään rakentama laiteisto, jonka perusajatuksena oli toteuttaa kahden sähkökäytön järjestelmä nopeussäädettynä siten, että toinen moottoreista pyörii vakionopeudella ja toisen moottorin ohjainkortille annetaan nopeusohje vinssin akselille kytketyn potentiometrin avulla. Potentiometri muuttaa nopeusohjetta vinssin pyöriessä ja rummun halkaisijan muuttuessa. /16/

Vaittisen rakentamalle laitteistolle tehtiin suorituskykytesti, jossa mitattiin ja arvioitiin samat parametrit, kuin tuplarumpuvinssikäytön ja momenttisäädetyn järjestelmän tapauksessa. Testilaitteiston sähkökäytöt varustettiin vakio moottoreilla ja 1:40 kierukkavaihteilla. Vinsseinä käytettiin 200 mm vakiovinssijä, joiden rummuille asetettiin muovikorokkeet. Muovikorokkeiden avulla vinssin rummun sisähalkaisijaa kasvatettiin 170 mm asti. Tämä on tehty vinssien pyörimisnopeusvaihdelun pienentämiseksi. /16/ Mittaustulosten perusteella nopeussäädetty järjestelmä toimii tuplarumpukäyttöä nopeammin, ja sen virrankulutus on hiukan pienempi.

Järjestelmän muu toiminnallisuus ei kuitenkaan vastaa odotuksia. Toimiakseen hyvin nopeussäädetyin järjestelmän nopeusohjeen tulisi olla erittäin tarkka, sillä pienikin virhe nopeusohjeessa integroituu nopeasti ja näkyy hihnan liiallisena kiihtymisenä tai löystymisenä. Potentiometrin nopeusohjeen epätarkkuuden lisäksi moottorinohjaimen trimmeriltä asetettava maksiminopeuden arvo täytyisi saada tarkalleen oikeaksi, mikä on käytännön olosuhteissa vaikeaa. Varsin nopeasti selvisi, ettei potentiometrin avulla nopeussäädetty vinssijärjestelmä toimi riittävän tarkasti tämän tyyppisessä sovelluksessa. Järjestelmän toimintaa voisi parantaa takaisinkytkennällä, jossa nopeussäädetyin moottorin nopeusohjeeseen vaikuttaa potentiometrin lisäksi myös hihnojen kireydet. Tämäkään ei välttämättä takaa laitteistolle riittävän hyvää toimintaa. Tämän vuoksi järjestelmän jatkokehitystä ei ole katsottu tarkoituksenmukaiseksi.

6.1.3 Vääntösäädetty sähkökäyttöjärjestelmä

Tässä työssä kehitettiin kahden sähkökäytön järjestelmä, joiden sähkökäytöistä toinen on vääntömomenttisäädetty. Järjestelmä rakenne ja toiminta on kuvattu tarkemmin luvussa 5, eikä siihen puututa enää tarkemmin tässä yhteydessä. Järjestelmä toimii nopeasti ja jouhevasti. Myös virrankulutus on kohtalaisen matala. Järjestelmän käyttöönotto ja säätäminen on yksinkertaista. Tärkeimmät maston käyttäytymiseen vaikuttavat säätöparametrit ovat laskevan moottorin moottorivirrät eri toimintatilanteissa. Moottorivirtojen säätö tapahtuu monikierrospotentiometrien avulla.

Masto toimii jouhevasti, ainoastaan mastoa laskettaessa alas vetävän käytön pyörimisnopeus vaihtelee hiukan. Tämä ei kuitenkaan vaikuta merkittävästi maston toimintaan. Myös jumiutumistilanteiden hallinta onnistuu hyvin hihnan kireyttä tarkkailevan anturin ansiosta. Jumiutumistilanne voidaan laukaista tarpeen vaatiessa laskevalta käytöltä saatavan tavallista suuremman vääntömomentin avulla. Testitulosten ja silmämääräisten arvioiden perusteella vääntösäädetty järjestelmä oli toiminnaltaan paras testatuista järjestelmistä. Simulointitulokset ennakoivat mastoa alas vetävän käytön pyörimisnopeuden värähtelystä dynaamisissa tilan-

teissa, erityisesti mastoa laskettaessa. Värähtelyä esiintyy myös prototyyppimas-tossa, mutta värähtely on niin pientä, ettei sillä ole käytännön vaikutusta maston toimintaan. Mastosektion pysähtyminen mastoa laskettaessa vaikuttaa myös hiu-kan laskevan käytön pyörimisnopeuteen.

7. YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli kehittää kahdesta sähkökäytöstä ja kahdesta yksittäisvinsistä koostuva teleskooppimastojen nostamiseen ja laskemiseen tarkoitettu vinssi-järjestelmä. Vinssit käyttävät mastoa hihnojen välityksellä. Toinen hihnoista nostaa mastoa ylöspäin ja toinen vetää sitä alaspäin. Kehitettävällä järjestelmällä on tarkoitus korvata mekaaniselta rakenteeltaan monimutkainen ja painava yhdestä sähkökäytöstä ja tuplarumpuvinsistä koostuva järjestelmä.

Työhön liittyi monia lähinnä sähkömoottoreiden ohjaukseen ja säätöön sekä mastojärjestelmän mekaaniseen mallintamiseen liittyviä haasteita. Vähintään toisen sähkökäytöistä pitää olla säädetty, sillä sähkökäyttöjä ei voida ajaa samalla nopeudella mastoa käytettäessä, koska vinssien rumpujen halkaisijat muuttuvat hihnamäärän mukaan.

Mastoa nostava sähkökäyttö toteutettiin säätämättömänä ja sitä ohjataan kontaktorien avulla. Mastoa laskevaan käyttöön sovellettiin vääntösäätöä. Vääntösäätö toteutettiin EM-115-moottorinohjaimen avulla. Vääntösäädön toteuttamiseen käytettiin moottorinohjaimen virranrajoitustoimintoa, joka rajoittaa moottorin ankkurivirran kuhunkin tilanteeseen sopivaksi asetettuun arvoon. Virranrajoitustoiminto on toteutettu moottorinohjainkorttiin liitetyillä monikierrospotentiometreillä, joilla voidaan asettaa moottorinohjaimelle kolme eri virtarajaa. Ohjaussignaalien käsittely ja virranrajoituspotentiometrien kytkeminen tehdään releiden avulla. Mikäli käytetään moottorinohjainta, joka tunnistaa virranrajoituspotentiometrin viiveellä, tarvitaan kytkentään vielä ajastinreleet (kuva 5.1), jotta järjestelmä toimisi oikein. Tulevaisuudessa kuitenkin käytetään moottorinohjainta, joka tunnistaa virranrajoituspotentiometrin riittävän nopeasti ja voidaan käyttää yksinkertaisempaa kytkentää, kuva 5.2.

Työn tuloksena saatiin toimiva prototyyppi sähkökäyttöjärjestelmästä, joka voidaan kaupallistaa lyhyen mekaniikkasuunnitteluprosessin jälkeen. Masto käyttäy-

tyy erinomaisesti nostettaessa sitä, ja myös maston laskeminen sujuu käyttäjän näkökulmasta riittävän tasaisesti. Lisäksi järjestelmä kykenee selviytymään maston jumiutumisesta, esimerkiksi maston jäätymisistä. Maston nousu- ja laskunopeudet ovat huomattavasti suurempia ja järjestelmän kokonaisvirrankulutus on pienempi verrattuna tuplarumpuvinssillä toteutettuun järjestelmään. Kehitetyn järjestelmän kokonaiskustannukset ilman tuotekehityskustannuksia muodostuvat likimain yhtä suureksi tai jopa hiukan edullisemmiksi kuin tuplarumpuvinssikäytön hinta riippuen tulevan mekaniikkasuunnittelun tuomista lisäkustannuksista.

Työtä voidaan pitää varsin onnistuneena ja asetetut tavoitteet saavutettiin. On kuitenkin muistettava, että järjestelmän testaukset tehtiin sisätiloissa, joten testausympäristö ei asettanut järjestelmälle kovinkaan suuria vaatimuksia. Lopullisesti järjestelmän toimivuus ja vahvuudet nähdään vasta käytettäessä sitä todellisessa käyttöympäristössä.

LÄHTEET

- /1/ Aura Lauri, Tonteri Antti J. 1986. Sähkömiehen käsikirja, osa 2: Sähkökoneet. Porvoo: WSOY. 373 s. ISBN 951-0-13479-1
- /2/ Aura Lauri, Tonteri Antti J. 1986. Sähkömiehen käsikirja, osa 3: Tehoelektroniikka ja sähkökoneiden käyttö. Porvoo: WSOY. 246 s. ISBN 951-0-13473-2
- /3/ Electromen EM-115 –moottorinohjaimen datalehti. Saatavilla [www -muodossa](#):
- /4/ Ikonen Jarmo. 2003. Vinssin sähkökäytön tuotannon kehitys. Opinnäytetyö, Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu. 33 s.
- /5/ Mastsystem Int'l Oy, tuote-esite: Mastsystem Products. Saatavilla [www -muodossa](#) <http://www.mastsystem.com/products.html>. Viitattu 11.6.2007.
- /6/ Mohan Ned. 2001. Advanced electric drives: analysis, control and modeling using Simulink. Minneapolis (MN): MNPERE 162 s. ISBN 0-9715292-0-5
- /7/ Mohan Ned, Undeland Tore M., Robbins William P. 2003. Power Electronics: converter, applications and design, Third Edition. Hoboken (NJ): Wiley. 802 s. ISBN 0-471-42908-2.
- /8/ Nihtilä Markku, Oksanen Timo, Eriksson Lasse. P-, PI- ja PID –säätö. Opetusmoniste. Teknillinen korkeakoulu. 21 s. Saatavilla [www -muodossa](#) <http://www.control.hut.fi/Kurssit/AS-0.2230/tyo11/Ohje.pdf>. Viitattu 20.7.2007
- /9/ Niiranen Jouko. Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus. 2000. Helsinki: Otatieto. 381 s. ISBN 951-672-300-4
- /10/ Paavola Martti, Lehtinen Pekka. 1991. Sähkötekniikan oppikirja. 16. painos. Helsinki: WSOY 427 s. ISBN 951-0-15903-4
- /11/ Pyrhönen Juha. Pyörivän sähkökoneen suunnitteleminen. 1995. Opetusmoniste. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 279 s. ISBN 951-763-868-X

- /12/ Pyrhönen Juha. Sähkökäytöt luentomateriaalia 2005-2006. Opetusmoniste. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 280 s.
- /13/ Reitmaa Ilpo, Gustafsson Jouni. 2001. Varma digitaalielektroniikka. EMC-, vianehkäisy- ja häiriötorjuntatekniikkaa. Helsinki: Hakapaino Oy. 178 s. ISBN 951-672-311-X.
- /14/ Sarén Hannu. 2001. DTC-ohjatun tahtikonekäytön pyörimisnopeussäädön analyysi integroidun simulointimallin avulla. Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. 71 s.
- /15/ STM-Finland Oy. 2006. Tuoteluettelo.
- /16/ Vaittinen Lasse. 2004. Vinssin sähkömoottorikäytön ohjaus. Opinnäytetyö, Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu. 65 s.

M-tiedosto simulointeja varten

```
%Kahdella tasavirtakäytöllä varustetun maston simulointi
```

```
%Moottorien parametrit
```

```
Ua=24;           %Nostavan moottorin ankkurijännite
L=500e-6;        %Nostavan moottorin ankkuripiirin induktanssi
                  %(mitattu Mastsystemillä)
R=0.0096;        %Nostavan moottorin ankkuripiirin resistanssi
                  %(moottorin valmistajan ilmoittama)
kt=0.15;         %Nostavan moottorin vääntömomenttivakio
                  %(ankkurivirran vääntömomentin suhde)
ke=0.0051;       %Nostavan moottorin jännitevakio
                  %(ankkurijännitteen ja kierrosluvun suhde)
T=0;             %Laskevan moottorin momentti mastoa nostettaessa
T=1;             %Laskevan moottorin momentti mastoa laskettaessa
J=0.0015;        %Käyttöjen hitausmomentit
B=0.00085;       %Käyttöjen kitkavoimat
u=85;            %Takaisinkytkentä kuormitukselta moottorin
                  %ankkurivirralla
```

```
%Välityssuhteet
```

```
n1=7.8e-4;       %Nostavan käytön välityssuhde
                  %moottorin akselilta vinssin rummulle
```

```
n2=448;          %Laskevan käytön välityssuhde
                  %vinssin rummulta moottorin akselille
```

```
k=0.0167;        %Integraalin kulmakerroin nostettaessa mastoa.
                  %(60 sekunnin noston aikana rummun
                  %halkaisija kaksinkertaistuu)
```

```
l=0.67;          %Offset integraalille siten, että kellosignaali
                  %on 1 noston puolivälissä
```

```
n=1.67;          %Offset integraalille siten, että kellosignaali
                  %on 1 laskun puolivälissä
```

```
%Hihnojen jousivakiot (kuvitellut vääntöjäykkyykskertoimet)
```

```
Kn=0.96;         %Nostava hihna
Kl=0.84;         %Laskeva hihna
```

```
Jm=0.01;        %Maston hitausmassa
Bm=0.05;        %Maston kitka
```

```

%Mastosektioiden massojen
%vaikutukset nostavan vinssirummun momentteihin
ma=0.120;          %1. mastosektio
mb=0.175;          %2. mastosektio
mc=0.240;          %3. mastosektio
md=0.315;          %4. mastosektio
me=0.400;          %5. mastosektio
mf=0.550;          %6. mastosektio


%Kuvien piirtäminen
%Laskevan moottorin pyörimisnopeus
%laskettaessa mastoa
figure
x=plot (tout, lasku)
AXIS ([0 60 0 8000])
YLABEL('Pyörimisnopeus [RPM]')
XLABEL('Aika [s]')


%Laskevan moottorin pyörimisnopeus
%nostettaessa mastoa
figure
x=plot (tout, nosto)
AXIS ([0 60 0 5000])
YLABEL('Pyörimisnopeus [RPM]')
XLABEL('Aika [s]')


%Hihnojen ja maston kulkunopeudet
%nostettaessa mastoa
figure
y=plot (tout, nosto1, 'b-', tout, nosto2, 'k', tout, nosto3,
'r')
legend([y], 'Laskeva hihna', 'Masto', 'Nostava hihna')
AXIS ([0 60 0 8])
YLABEL('Nopeus [m/min]')
XLABEL('Aika [s]')


%Hihnojen ja maston kulkunopeudet
%laskettaessa mastoa
figure
z=plot (tout, lasku1, 'b-', tout, lasku2, 'k', tout, lasku3,
'r')
legend([z], 'Laskeva hihna', 'Masto', 'Nostava hihna')
AXIS ([0 60 0 15])
YLABEL('Nopeus [m/min]')
XLABEL('Aika [s]')

```

EM-115 moottorinohjaimen tekniset tiedot

EM-115 DC-MOOTTORISÄÄDIN 12-36V 25A 4-QUAD.



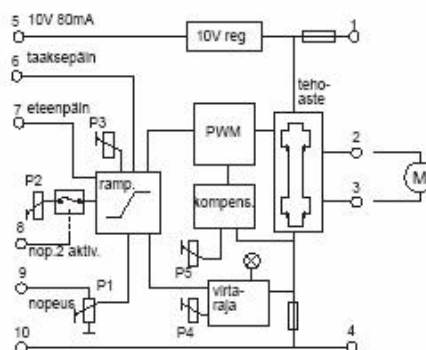
OMINAISUUDET:

- Pieni koko
- Neljä ohjausquadranttia
- Hyvä hyötysuhde >92%
- Moottoreille 50-500W
- Sopii kiskoasennuspohjaan
- Säädettävä virtaraja
- Säädettävä ramppi

EM-115A on moottorisäädin isoille kestopagneetti DC-moottoreille. Tehoa säädetään pulssisuhdemenetelmällä (PWM), jolla saavutetaan hyvä hyötysuhde. Korkean kytkentätaajuuden ansiosta ohjain on hiljainen. Käyttöjännitelähteeksi sopii esimerkiksi akku tai suodatettu tasavirtalähde. Laitteen antama maksimiteho on riippuvainen asennuksesta. Liikuttaessa tehoalueen yläpäässä on asennuksessa huolehdittava riittävästä tuuleutuksesta. Laitte on ns. neliquadranttiohjain, eli siinä on ajo ja jarrutus samaan suuntaan, jarrutus on luonteeltaan regeneratiivinen eli laite syöttää jarruenergiaa moottorin sisävastukseen. Lähtötehoa voidaan säätää potentiometrillä, jänniteviestillä tai laitteen omalla trimmillä. Virtaraja voidaan asettaa laitteen omalla trimmillä. Virtarajan toimintaa indikoi punainen led-valo. Kiihdytysramppi asetetaan ohjaimen omalla trimmillä. Kompensointi-trimmillä voidaan eliminoida kuorman vaikutusta moottorin pyörimisnopeuteen. Tehoaste on suojattu jännitepiikeiltä, ylikuormalta ja hetkelliseltä oikosululta. Vääränapainen kytkentäkään ei vahingoita laitetta jos sulakesuositusta noudatetaan.

TEKNISET TIEDOT:

Käyttöjännite	12...36 Vdc
Tyhjälähtövirta	< 50mA
Sulakesuositus	5-30A
Ohjauspotentiometri	1k...50k
Kuormitettavuus	25A jatkuva 50A hetkellinen (5s) 0-30V
Lähtöjännite	0-6V tai 0-10V
Ohjausalue	<1V kun Im=25A
Jännitehäviö	4...50A
Virtaraja	n. 21kHz
Toimintataajuus	0.3...10s
Ramppiaika	>4V "on"
Eteempain ohjaus	<1V "off"
Tuloimpedanssi	pinnit 6,7 ja 8 = 10kohm pinni 9 = 100kohm
Hyötysuhde	>92%
Käyttölämpötila	-10...50 °C
Mitat	107*107*45 mm
Paino	n. 270 g



EM-115 KÄYTTÖÖNOTTO

TÄRKEÄÄ !!

Käyttöjännite suodatettu tasajännite (aaltomuoto <20%) 12-36Vdc. Varmista napaisuus ennen kuin kytket!

Kun moottorivirrat suuremmat kuin 20A jatkuvasti on huolehdittava, että ympäristön lämpötila ei nouse yli 50°C:een.

SÄÄDÖT

P1-maksimitaso.
Tällä säädöllä voidaan asettaa maksimitaso. Kaksinopeusajossa tällä säädöllä asetetaan 1-nopeus.

P2-kaksoisnopeuden asetus.
Kaksinopeusajossa tällä trimmillä asetetaan 2-nopeus.

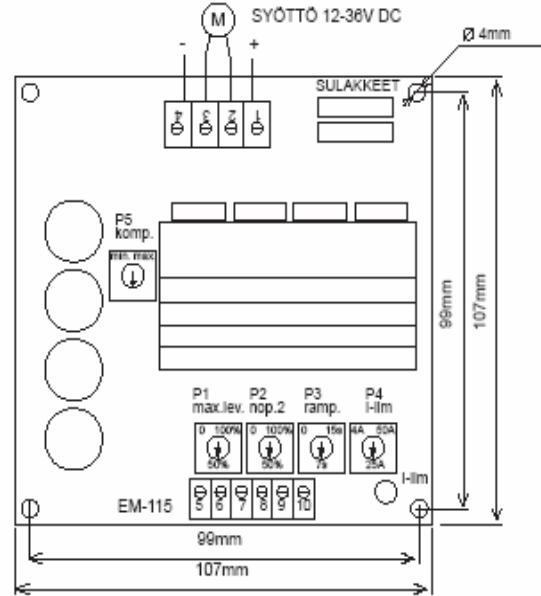
P3-kiihdytys/hidastusramppi.
Rampin nopeudella voidaan välttää liikkeellelähtönykäyksiä ja virtapiikit, oikea arvo löytyy kokeilemalla.

P4-virtaraja
Virtarajan toimintaa indikoi trimmin vieressä oleva punainen ledi. Virtarajalla voidaan rajoittaa moottorin ottamaa maksimivirtaa, eli maksimi momenttia.

P5-kompensointi
Tällä trimmillä voidaan kompensoida kuorman vaikutusta moottorin pyörimisnopeuteen. Säädä pyörimisnopeudeksi n. 50%, kierrä trimmiä vastapäivään kunnes moottori alkaa nykiä, kierrä trimmiä hitaasti takaisin kunnes nykyinen loppuu.

SULAKKEET

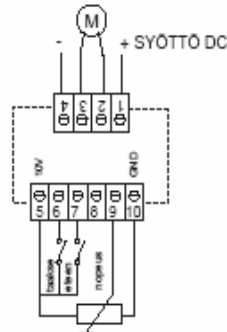
Sulakkeet on kytketty rinnakkain, eli virta-avot summataan. Sulaketyyppi "ATO". Pienillä tehoilla <20A voidaan käyttää vain yhtä sulaketta.



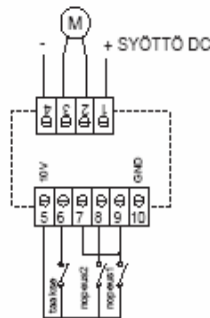
TERMINAALIT

1. Käyttöjännite 12-36V
2. Moottorilähtö +
3. Moottorilähtö -
4. Käyttöjännite 0V gnd
5. Ohjausjännite n. 10V 80mA
6. Taaksepäin (master)
7. Eteenpäin
8. 2-nopeuden aktivointi
9. Nopeustulo/ potentiometritulo
10. 0V gnd

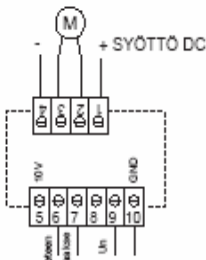
Portaaton pyörimisnopeussäätö, potentiometriohjauksella, potentiometrin säätöalue sovitetaan trimmillä P1. Eteenpäin kytkimellä. Suunnanvaihto kytkimellä.



Kaksinopeusajo (siirtyminen / paikoitus) nopeudet aktivoidaan kuten kuvassa. Nopeudet säädetään trimmeillä P1 ja P2.



Portaaton pyörimisnopeudensäätö jänniteohjauksella, säätöalue voidaan sovitaa trimmillä P1. Taaksepäin ja eteenpäin ohjaukset TTL, CMOS tai 0-24V tason signaaleilla.



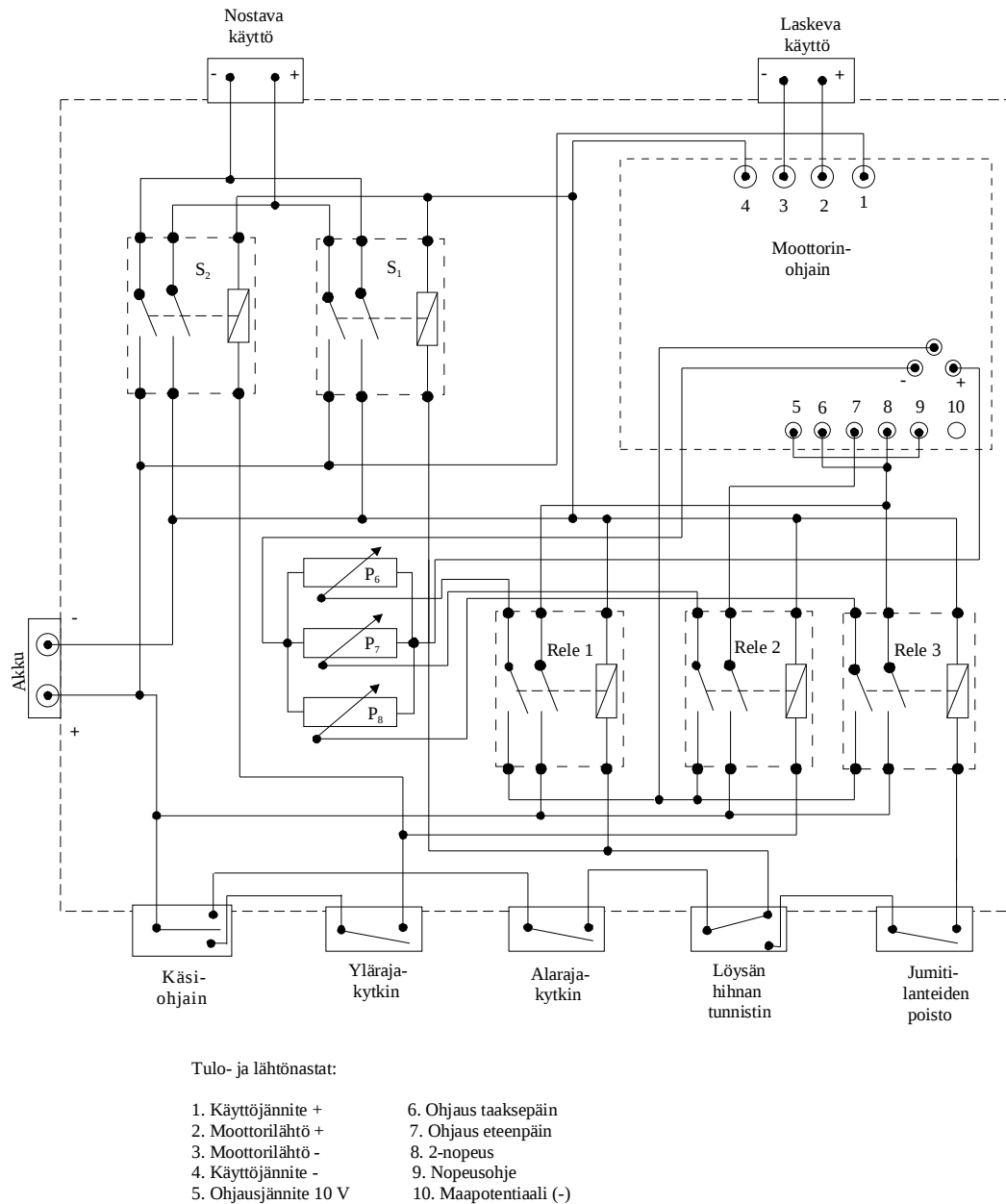
Taaksepäin, OFF 0-1V, ON 4-30V
Eteenpäin, OFF 0-1V, ON 4-30V
Nopeus (Un) 0-5V tai 0-10V vastaa 0-100%



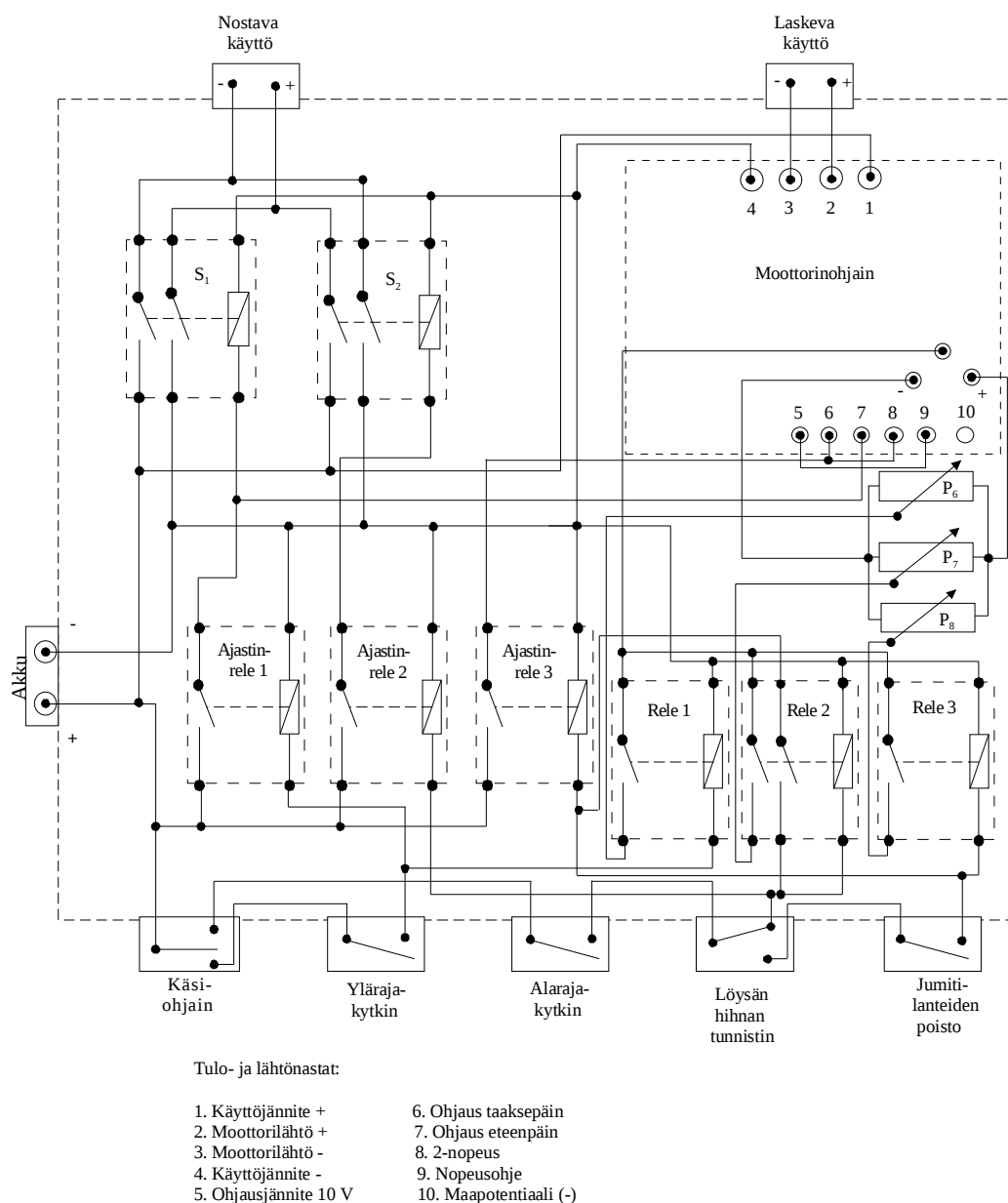
ELECTROMEN Oy

Vähäheijokiäntie 56B, 20810 Turku, FINLAND Tel. +358-2-4698050 Fax. +358-2-4698052

Ohjauselektroniikan kytkentäkaaviot



Kuva 1. Ohjauselektroniikan kytkentäkaavio käytettäessä moottorinohjainkortin päivitettyä ohjelmistoversiota. Tällöin kytkennässä ei tarvita ajastinreleitä, vaan kytkennät tehdään tavallisilla releillä. Rele 1 ja kontaktori S_2 kytkeytyvät kiinni mastoa laskettaessa ja vastaavasti Rele 2 ja kontaktori S_1 mastoa nostettaessa. Rele 3 ohjaa moottorinohjainkorttia maston jumiutuessa.



Kuva 2. Ilman ohjelmistopäivityksellä varustettua moottorinohjainkorttia joudutaan ohjaamaan viivereiden avulla, sillä moottorinohjainkortti tunnistaa siihen releellä kytketyn virranrajoituspotentiometrin noin puolen sekunnin viiveellä. Ajastinreleet asetetaan sen vuoksi toimimaan noin puolen sekunnin viiveellä. Ajastinrelettä 1 käytetään mastoa nostettaessa. Tällöin myös kontaktori S_1 kytkeytyy kiinni. Ajastinrele 2 kytkeytyy mastoa laskettaessa kytkien samalla kontaktorin S_2 kiinni. Ajastinrele 3 ohjaa moottorinohjainkorttia maston jumitilanteessa. Releet 1, 2 ja 3 kytkevät kulloinkin tarvittavan virranrajoituspotentiometrin ohjainkortille.

Sähkökäyttöjärjestelmän käyttöönotto ja säätö

**Vinssisähkökäyttö,
käyttöönotto ja säätö**D.No. 102683
Page 1(4)

2007-06-12 MP

Seuraavassa kuvataan kahdella sähkökäytöllä varustetun vinssijärjestelmän käyttöönotto- ja säätöohjeet. Ohjauelektronikan kaikki kytkennät on tehty valmiiksi alihankkijan toimesta, joten niihin ei yleensä ole tarvetta puuttua. Käyttöönotossa on erikoisesti huomioitava säädettävän sähkökäytön virtarajojen asettaminen monikierrospotentiometrien avulla. Lisäksi pitää huolehtia siitä, että moottorinohjainkortilla olevat trimmerit asetetaan oikein.

Järjestelmän käyttöönoton ensimmäisessä vaiheessa kytketään tarvittavat liitinkaapelit akulta tulevaa virtakaapelia lukuunottamatta ohjauskotelon ja maston välille kytkentäkaavion mukaan. Tarvittavia liitinkaapeleita ovat moottoreiden syöttökaapelit (2 kpl), rajakytkinten, löysän hihnan tunnistimen sekä käsiolhjaimen kaapelit. Vinssisähkökäytön ohjausjärjestelmän kytkentäkaavio on esitetty kuvassa 2.

Seuraavaksi asetetaan moottorinohjainkortin trimmerit oikeisiin arvoihinsa. Trimmereiden sijoittelua kortille havainnollistetaan kuvassa 1. On huomattava, että trimmeri P4 on poistettu ja korvattu kytkennällä, joka sisältää kolme monikierrospotentiometriä (P6, P7 ja P8). Kierretään trimmerit P1 ja P2 maksimiarvoihinsa (vastapäivään) ja trimmerit P3 ja P5 minimiarvoihinsa (myötäpäivään).

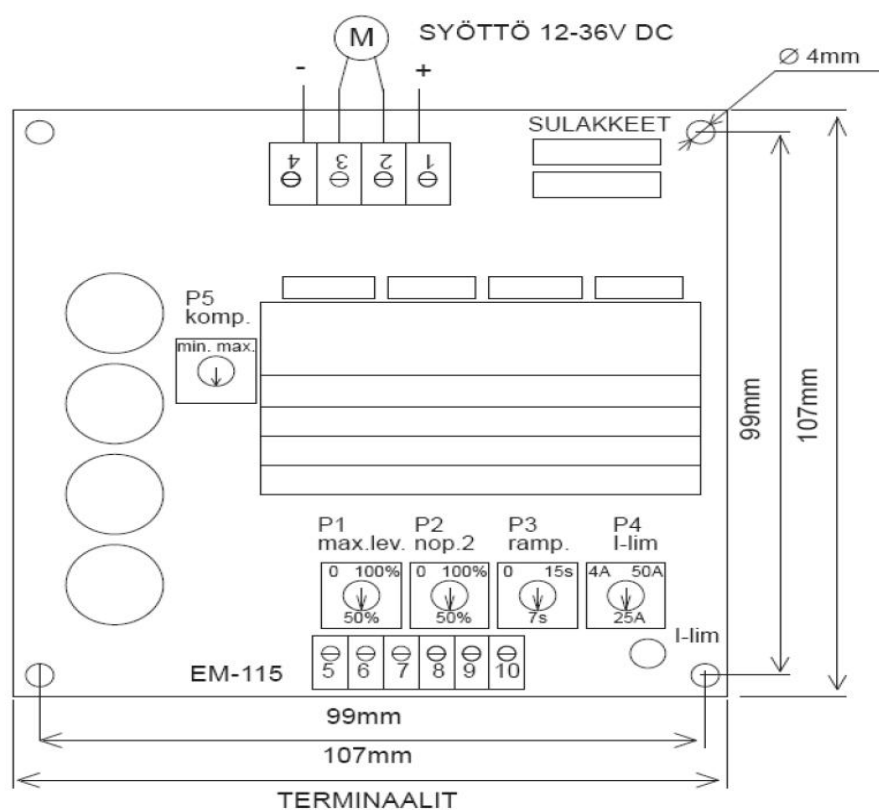
Tämän jälkeen asetetaan monikierrospotentiometrien avulla säädettävän moottorikäytön virtarajat. monikierrospotentiometri P6 asettaa moottorin virran mastoa laskettaessa, monikierrospotentiometri P7 mastoa nostettaessa ja monikierrospotentiometrin P8 tehtävänä on toimia virranrajoittimena jumi-tilanteissa.



**Vinssisähkökäyttö,
käyttöönotto ja säätö**

D.No. 102683
Page 2(4)
2007-06-20 MP

Kierretään kaikki potentiometrit minimiasentoon (vastapäivään). Kierretään tämän jälkeen potentiometriä P6 3/4 kierrosta, P7 2 ja potentiometriä P8 2½ kierrosta myötäpäivään.



Kuva 1. EM-115 –moottorinohjaimen trimmeripotentiometrit sekä tulo- ja lähtönastojen sijoittelu. On huomattava, että trimmerin P4 tilalle on kytketty tätä sovellusta varten releiden välityksellä kolme tarkkuuspotentiometriä.

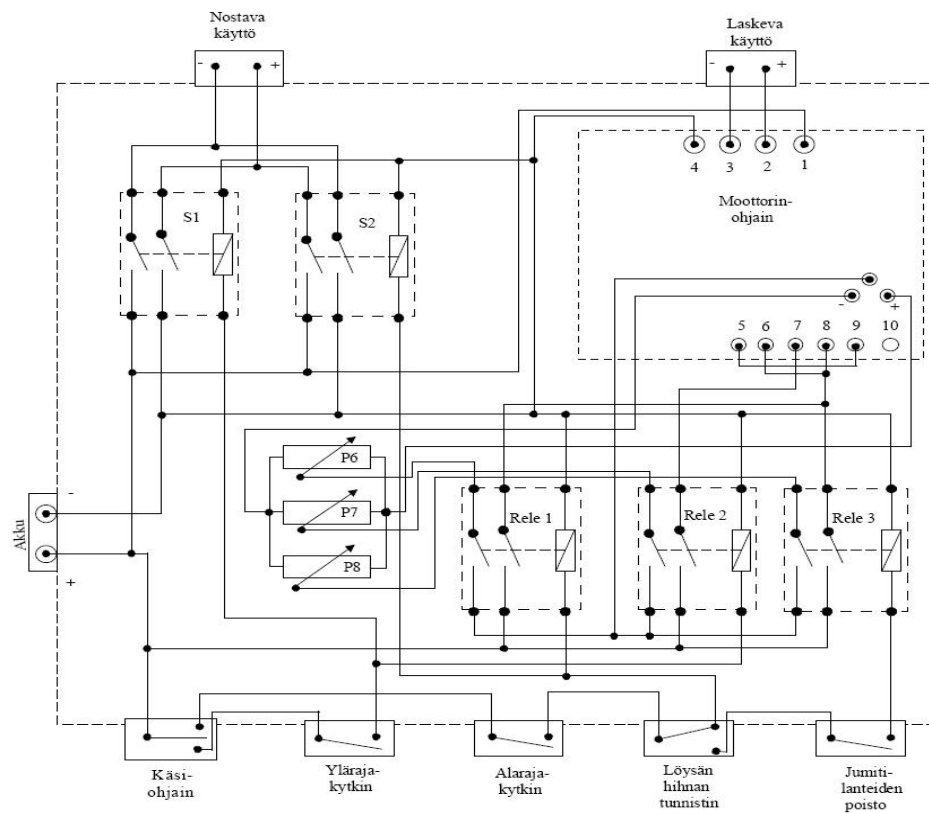


**Vinssisähkökäyttö,
käyttöönotto ja säätö**

D.No. 102683
Page 3(4)

2007-06-20 MP

Tarkistetaan kytkentä silmämääräisesti mahdollisten kytkentävirheiden ja oikosulkujen varalta. Kytketään akulta tuleva liitinkaapeli paikoilleen. Ennen varsinaista säätöä tarkistetaan, että moottorien pyörimissuunnat ovat oikein (toisen vinssin purkaessa hihmaa toinen kela sitä rummulle) ajamalla mastoa hiukan ylös ja alas.



Kuva 2. Moottorinohjauselektronikan kytkentäkaavio. Laskevan käytön moottorivirrät asetetaan potentiometreillä P6, P7 ja P8. Moottorinohjaimena käytetään ohjainta, jonka ohjelmisto on päivitetty tarkoitukseen soveltuvaksi.



**Vinssisähkökäyttö,
käyttöönotto ja säätö**

D.No.	102683
Page	4(4)
2007-06-20	MP

Mikäli moottorit pyörivät keskenään ristikkäisiin suuntiin, vaihdetaan väärään suuntaan pyörivän moottorin napaisuus toisin päin. Kytetään pihtivirtamittari laskevan (moottorinohjaimen kytketyn) moottorin virtakaapeliin (tasavirran mitta-alue!), jonka jälkeen voidaan tehdä lopullinen moottorivirtojen säätö. Ajetaan mastoa ylös ja tarkkaillaan laskevan moottorin virtaa. Kiertämällä tarvittaessa monikierrospotentimetriä P7 säädetään moottorivirraksi noston aikana 3-5 A. Tarkistetaan samalla, että mastoa alas vetävän hihnan kireys on sopiva noston aikana.

Vastaavalla tavalla tarkistetaan moottorivirran arvo ja alas vetävän hihnan kireys mastoa laskettaessa. Sopiva moottorivirta mastoa laskettaessa on noin 11-13A. Mahdollisesti tarvittava säätö tehdään monikierrospotentimetrin P6 avulla. Lasketaan masto alas pohjalevyä tai sopivaa estettä vasten siten, mastoa nostavaan hihnaan syntyy löysää (hihnan kireyttä tarkkaileva anturi havaitsee löysän hihnan), jolloin voidaan tarkistaa jumitilanteen poistamiseen tarvittavan moottorivirran suuruus. Painetaan käsiohjaimen kytkimestä ja löysän hihnan poistokytkimestä yhtä aikaa ja säädetään alas vetävän moottorin virraksi monikierrospotentimetrin P8 avulla noin 20A. Mastoa alas vetävän hihnan tulee tällöin olla varsin kireällä.

Kun moottorivirtojen asettaminen on suoritettu, lukitaan trimmeri- ja monikierrospotentimetrit liimalla tai muulla sopivalla tavalla ja suljetaan ohjauselektronikkakotelon kansi. Lopuksi testataan vielä maston toiminta ajamalla masto muutamia kertoja ylös ja alas.

Prototyypin osaluettelo

- WPU, Amer MP80S/2 -moottorilla ja STM RMI 50P -kierukkavaihteella (välityssuhde 1:40), 1 kpl
- WPU, Amer MP80S/2 -moottorilla ja STM -lieriökartiovaihteella (välityssuhde 1:14), 1 kpl
- EXB -maston käsiohjain (painonapein varustettu kytkin, jolla mastoa nostetaan ja lasketaan), 1 kpl
- Kotelo ohjauselektronikalle, 1 kpl
- Kontaktori Albright SW82-3 24VDC, 2 kpl
- Moottorinohjain Electromen EM-115, 1 kpl
- Ajastinrele Finder 8021-0024-0000 (3 kpl)
- Rele Finder 5533-9-024-0000 (3 kpl)
- Potentiometri (10 k Ω , 10 kierrosta), 3 kpl
- Rajakytkin, 3 kpl
- Asennuskiskoa DIN 35 mm releiden kiinnitykseen.
- Johtimia (tehoa kuljettavat johtimet 2,5 mm², ohjaussignaalia kuljettavat ohuempia)
- MIL-C standardin mukaisia liittimiä
- KytKentärimaa ym. osia

LIITE VI

Tuloste välityssuhteiden laskentaan käytettävästä Excel-talukosta

Nostava käyttö																			
Moottori				Vaihteisto				Vinski				Hihna				Masto			
				Välityssuhde 1: Hyötysuhde				Välityssuhde 1: Hyötysuhde											

