

Reima Keinänen

# Kelanpurkulaitteen pyörityksen oikosulkumoottorikäyttöinen nopeussäätö

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Automaatiotekniikka

Insinöörityö

25.3.2015

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Reima Keinänen Kelanpurkulaitteen pyöriksen oikosulkumoottorikäyttöinen nopeussäätö 35 sivua + 1 liitettä 25.3.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Automaatiotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Kappaletavara-automaatio
Ohjaaja(t)	Tuote- ja palvelujohtaja Mika Virtanen Lehtori Kai Virta
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoitus on toteuttaa muutos, jossa vanha hydraulimoottorikäyttöinen kelanpurkulaitteen pyöritys tullaan muuttamaan sähkömoottorikäyttöiseksi. Myös kelanpurkulaitteen sekä oikaisulaitteen välinen nopeussäätö on tarkoitus saada synkronoitu.</p> <p>Työhön kuului sähkökäytönmitoitus, etäisyysanturoinnin suunnittelu, hieman mekaanista suunnittelua sekä automaatiologiikan toteutus. Työ toteutettiin Pivatic Oy:lle kehitysprojektina.</p> <p>Työn alussa kerrotaan hieman Pivatic Oy:stä sekä sen historiasta. Tämän jälkeen kuvailaan hieman aiempaa toteutusta sekä tavoiteltua toteutusta. Sähkökäytön mitoituksessa perehdyn niin moottorin mitoittamiseen, vaihteen käyttötarpeeseen kuin taajuusmuuttajan sekä etäisyysanturin valintaan. Pääpaino opinnäytetyössä kuitenkin painottuu asioihin, joita tulee ottaa huomioon sähkökäyttöä mitoittaessa. Työn lopussa nopeussäätö suunnitellaan sekä luodaan itse logiikkaohjelma, joka kyseisen nopeussäädön tulee jatkossa hoitamaan.</p> <p>Työn lopputuloksena voidaan suurella todennäköisyydellä todeta, että projekti on onnistunut ja tulevaisuudessa varmasti asiakkaita miellyttävä. Mahdollisuudet täysin automatisoituun kelan käsittelyyn tulevat olemaan huomattavasti suuremmat.</p>	
Avainsanat	sähkömoottori, hydraulimoottori, mitoitus, nopeussäätö

Author(s) Title	Reima Keinänen Induction motor driven speed adjustment of decoiler's rotation
Number of Pages Date	35 pages + 1 appendices 25 March 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automation Engineering
Specialisation option	Manufacturing Automation
Instructor(s)	Mika Virtanen, Director of Products and Services Kai Virta, Lecturer
<p>The purpose of this thesis is to execute a replacement of a decoiler device's old hydraulic motor drive for an electric driven one. Also variable speed adjustment between the decoiler and straightener device is expected to be synchronized. The project will be performed as a development project for Pivatic Oy.</p> <p>My work consisted of the electric drive design, some mechanical designing, distance sensor selection and programming of automation logic program.</p> <p>This study begins with some information about Pivatic Oy and its history. After that, it presents the previous solution along with the desired one. The study focuses on elements of electric drive design such as the sizing of induction motor, the need to use gear as well as distance sensor selection.</p> <p>This thesis focuses on issues that should be taken into account when designing of the use of electric drives. At the end of the study, issues such as variable-speed adjustment as well as creating a programmable logic control program which will perform speed adjustment in the future are discussed.</p> <p>As a conclusion it can be stated that the project was successful and will certainly be appreciated in the future. The possibilities for fully automated coil handling system will be much better.</p>	
Keywords	hydraulic motor, electric drive, sizing, variable-speed adjustment

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Pivatic Oy yritysesittely	2
3	Toteutus ennen	3
3.1	Kelanpurkulaite	3
3.2	Oikaisulaite	3
3.3	Kelanpurkulaitteen pääakselin pyöritys	4
3.4	Pneumaattinen jarru	5
3.5	Pääakselin pyörityksen ohjaus	6
3.6	Turvallisuus	7
4	Tavoiteltu toteutus	8
5	Sähkökäytön mitoitus	8
6	Oikosulkumoottori	15
6.1	Toimintaperiaate	15
6.2	Moottorin mitoitus	17
7	Hammassvaihde	22
8	Taajuusmuuttaja	22
8.1	Taajuusmuuttajan ohjaus	23
8.1.1	Taajuussäätö	24
8.1.2	Vuovektorisäätö	24
8.1.3	Suora momenttisäätö	24
8.2	Taajuusmuuttajan valinta	25
9	Kelan halkaisijan mittaus	25
10	Säädön perusteita	26
11	Synkronointi	28
11.1	Kelanpurkulaitteen nopeussäätö	28
11.2	Lisäpainaja	29

12	Ohjelmitavalogiikka	31
13	Johtopäätökset	32
	Lähteet	34
	Liitteet	

Liite 1. Oikaisulaitteen taajuusmuuttajan Data Block

## Lyhenteet

CNC	Computerized Numerical Control
PLC	Programmable Logic Controller
FC	Function
DB	Data Block
STL	Statement List programming language
PWM	Pulse-Width Modulation

## 1 Johdanto

Energian hinta on kokoajan nousussa, joten on viisasta kiinnittää huomiota energian kulutukseen. Siksi myös Pivatic Oy:ssä panostetaan vihreämpään ja energiatehokkaampaan tuotteeseen. Pivatic Oy:n valmistamissa lävistyslinjoissa sekä taivutuslinjoissa työstettävä materiaali tulee kelalta, jolloin kela täytyy purkaa sekä oikaista ennen sen työstämistä. Tähän tarvitaan kelanpurkulaite sekä oikaisulaite, joka telojen avulla oikaisee materiaalin.

Tämän kehitysprojektin yhtenä tavoitteena on luopua jatkossa hydraulikäyttöisestä kelanpurkulaitteen pyöryksestä ja korvata se sähkökäytöllä. Nykypäivänä asiakkaat haluavat yhä enemmän ja enemmän automatisoituja linjastoja, joten työn ideana oli myös ottaa yksi askel lähemmäs automatisoitua kelanvaihtoa. Kelan halkaisijaa tulisi tarkastelemaan, jolloin tiedetään, kuinka paljon kela on vielä jäljellä. Myös kelan takaisin-kelaus tulisi olemaan helpommin hallittavissa, mikä myös on ehtona kelanvaihtoa automatisoitaessa.

Pää tavoite työssä on synkronoida kelanpurkulaitteella pyöritettävän kelan nopeus oikaisulaitteen syöttönopeuteen, joka tällä hetkellä on oikosulkumoottorikäyttöinen ja jota ohjataan taajuusmuuttajalla. Tämä ominaisuus parantaisi kykyä ajaa erittäin herkkiä ja ohuita materiaaleja, joita ennen on ollut lähes mahdotonta ajaa ilman ongelmia. Kyseinen ominaisuus myös lisäisi ominaisuuksia Pivaticin materiaalin käsittelyyn, mahdollistaisi uusia sovellutuksia ja näin ollen lisäisi hallittavuutta.

Työn tärkein osuus onnistuneen nopeussäädön kannalta on ohjelmointi, oikea anturointi sekä taajuusmuuttajan oikea valinta ja parametointi. Kyseiset osa-alueet ovat loppujen lopuksi ne, joilla mahdollisimman pehmeä synkronointi sekä nopeussäätö tullaan toteuttamaan.

## 2 Pivatic Oy yritysesittely

Pivatic Oy on kotimainen työstökonevalmistaja, joka valmistaa pitkälle automatisoitua tuotantotekniikkaa ohutlevyteollisuuden parissa toimiville asiakkaille ympäri maailmaa. Noin 90 % tuotannosta menee vientiin. Suunnittelu, osavalmistus, kokoonpano sekä käyttöönotto kuuluvat kaikki Pivatic Oy:n toiminnan alle. Asiakaspalvelu on keskeinen osa Pivaticin toimintaa. Toimitilat sijaitsevat Itä-Uudellamaalla Hyvinkäällä.

Pivatic Oy valmistaa monipuolisia ratkaisuja eri teollisuuden aloille, kuten esimerkiksi, LVI-, kodinkone-, televiestintä-, elektroniikka- sekä autoteollisuuteen. Näin ollen Pivaticilla valmistettuja osia löytää lukemattomista arkipäivän sovelluksista sekä esineistä, kuten valaisimista, jääkaapeista, teollisuusrakenteista tai vaikka sähkömoottoreista.

Pivatic kuuluu Ursviken Groupiin, joka on ohutlevyalalla toimiva Pohjoismainen asiakaslähtöinen yhtiö. Yhtiö tuottaa myös huoltopalveluita yrityksille. Yritykset muodostavat globaalin liiketoiminnan verkoston tuotannon, myynnin ja palveluiden osalta, jossa tavoitteena on palvella asiakkaan tarpeita ja vaatimuksia. Ursviken Groupin omistaa Suomalainen pääomasijoittaja Sentic Partners Oy.

Pivatic Oy:n virstanpylväät:

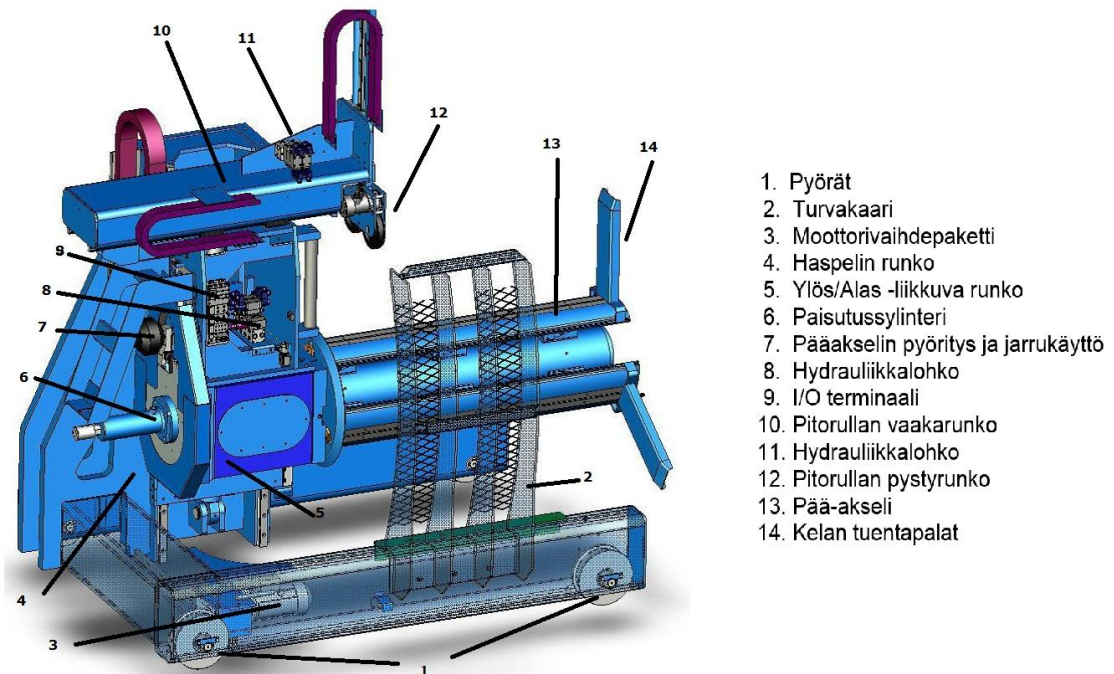
<b>1975</b>	Toolsystem Ky perustettiin. Tehokkaaseen tuotantoon tarkoitettu paikoitusjärjestelmä lävistystyökaluille julkaistiin.
<b>1976</b>	Hydrauliset puristimet ja nopea työkalun vaihto kiinnitys - Pivat - kehitettiin.
<b>1977</b>	Pivat + Automatic = Pivatic.
<b>1979</b>	Ensimmäinen CNC lävistyslinja toimitettiin.
<b>1982</b>	Ensimmäinen neljän sivun taivutuslinja toimitettiin.
<b>1983</b>	Ensimmäinen CNC lävistyskeskus jossa liikkuvat kasettiyksiköt toimitettiin.
<b>1987</b>	Ensimmäinen taivutus linja ylös/alas taivutuksella toimitettiin.
<b>2000</b>	Uuden sukupolven lävistysasema keloille julkaistiin. Uudet toimitilat valmistuivat.
<b>2007</b>	Ursviken Group perustettiin.
<b>2008</b>	Sähköinen lävistysasema keloille julkaistiin.
<b>2012</b>	Uuden sukupolven lävistysasema keloille sekä arkeille julkaistiin.
<b>2013</b>	PivaBend taivutusasema 1,5 mm ruostumattomalle teräkselle toimitettiin.



### 3 Toteutus ennen

#### 3.1 Kelanpurkulaite

Pivatic Oy:n valmistamissa lävistyslinjoissa on lähes aina sekä Pivaticin valmistama kelanpurkulaite (kuva 1) että oikaisulaite. Kelanpurkulaite on suunniteltu kelamateriaalin purkamista varten linjalle. Kelanpurkulaitteen päätoiminnot perustuvat kelapussiohjaukseen, kelan vaihtamiseen sekä vetämiseen jarrua vasten, jolloin kelamateriaali saadaan pidettyä tiukalla.



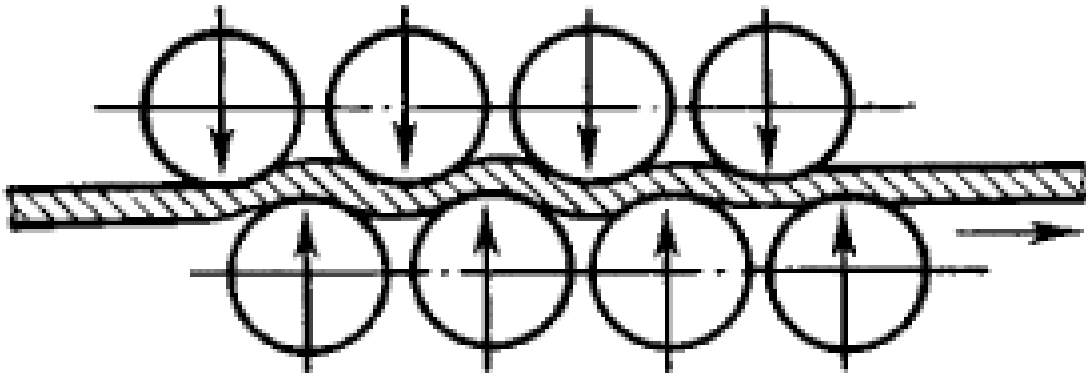
1. Pyörät
2. Turvakaari
3. Moottorivaihepaketti
4. Haspelin runko
5. Ylös/Alas -liikkuva runko
6. Paisutussyliinteri
7. Pääakselin pyöritys ja jarrukäyttö
8. Hydraulikkalohko
9. I/O terminaali
10. Pitorullan vaakarunko
11. Hydraulikkalohko
12. Pitorullan pystyrunko
13. Pää-akseli
14. Kelan tuentapalat

Kuva 1 Kelanpurkulaite

#### 3.2 Oikaisulaite

Oikaisulaitteen tehtävänä on poistaa kelajännityksiä ja näin oikaista kelalta tuleva materiaali suoraksi jatkokäsittelyä varten. Oikaisu tapahtuu oikaisutelojen välissä (kuva 2),

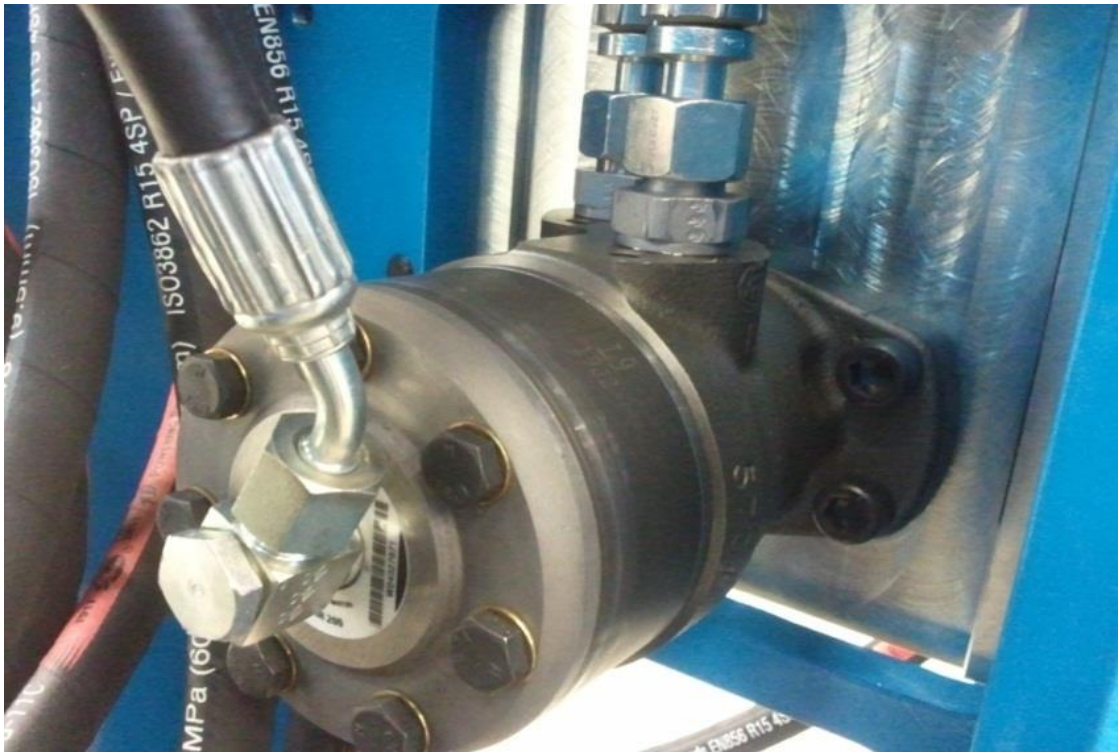
jossa ensimmäiset telat tekevät niin sanotun raaka-oikaisun, kun taas viimeisimmät telat hoitavat hieno-oikaisun. Näin ollen voidaan todeta, että mitä paksumpi materiaali on kyseessä, sitä enemmän se vaatii oikaisemista.



Kuva 2 Oikaisulaitteen telat

### 3.3 Kelanpurkulaitteen pääakselin pyöritys

Kelanpurkulaitteen pyöritys toteutetaan nykyisin Danfossin hydraulimoottoria (kuva 3) hyväksi käyttäen. Moottoria ohjataan hydraulisella suuntaventtiilillä. Pyöritys on ketjuveitoinen, jossa vetävä eli pyöritysmoottorin päässä oleva hammaspyörä on 12 hampainen. Kelaa kannattelevan pääakselin päässä olevan hammaspyörän hammasluku on 60, jolloin välityssuhteeksi saadaan 1:5. Nopeus säädetään vastusvastaventtiilin avulla ja käyttöpainetta paineenalennusventtiilin avulla. Sen lisäksi moottorin perässä on ylivuotoletku yhdistettynä tankkiin linjaan vastaventtiilin kautta. Hydraulimoottoreiden tiivisteratkaisujen voidaan todeta olevan hyvin herkkiä painepiikeille.



Kuva 3 Danfossin hydraulinen pyöritysmoottori

### 3.4 Pneumaattinen jarru

Pneumaattisen jarrun (kuva 4) tehtävänä on jarruttaa kelanpurkulaitteen pääakselin pyöriminen. Toinen käyttötarkoitus jarrulla on hidastaa hieman pääakselin vapaata pyörimistä ajettaessa herkkiä materiaaleja, kuten maalattua alumiinia. Tässä tapauksessa paineen säätimestä säädetään paine hyvin pienelle, jotta jarru ikään kuin laahaa jatkuvasti hammaspyörää vasten ja näin ollen luo kitkaa, pääakselin vapaan pyörimisen estämiseksi. Tämä estää pussin syntymisen syklisessä käytössä.



Kuva 4 Paineensäädin sekä pneumaattinen jarru

### 3.5 Pääakselin pyöriksen ohjaus

Kelanpurkulaitteen pääakselin nopeusohjaus on todettu haasteelliseksi yritettäessä synkronoida kelansyöttöä oikaisulaitteen vetäessä materiaalia nopeilla kiihtyvyyksillä. Ongelma ilmenee pääosin ajettaessa sekä herkkää että ohutta materiaalia. Materiaalin on oltava tiukalla, jottei kelalle pääsisi syntymään yhtään pussia (kuva 5), eikä materiaalin pohja näin ollen pääsisi naarmuttamaan herkkää pintaa.

Kelanpurkulaitteen laakeroinnin ja jarrun tuottaman kitkan sekä kelan aiheuttaman inertiaan vuoksi pyörimisliikkeen savuttamiseksi vaaditaan suhteellisen suuri momentti. Näin ollen herkkää sekä ohutta materiaalia ei voida vetää kelanpurkulaitteen jarrua vasten. Ajettaessa todella ohutta materiaalia (0.5 mm) on materiaalin vaatima oikaisu hyvin vähäistä (kuva 2). Tällöin materiaalin pintaan kohdistuva paine on hyvin vähäinen. Tästä johtuen oikaisulaitteen muokkaavien telojen aiheuttama kitka ei riitä syrjäyttämään kelan pyörimiseen vaadittavaa momenttia. Tämä johtaa tilanteeseen, jossa vetävät oikaisutelat rupeavat sutimaan tyhjää ja täten naarmuttavat materiaalin pintaa.

Tähän asti nopeusohjaus on ollut hankala toteuttaa edellä mainitusta syystä. Tämän lisäksi ongelmaa on tuottanut hydraulisesta pyöritysmoottorista johtuva viive. Tiedon kulku laitteiden välillä toimi käytännössä seuraavasti. Oikaisulaite lähettää logiikalle tietoa oikaisulaitteen pyörimisnopeudesta, logiikka päivittää tilatiedot ja tämän jälkeen lo-

giikalta lähtee käsky kelanpurkulaitteelle. Saapuva käsky ohjaa sähköohjattua suunta-venttiiliä, joka päästää paineen pyöritysmoottorille. Samalla myös pneumaattinen jarru aukeaa. Tämä koko paluuviestiketju vie sen verran aikaa, että oikaisulaitteen telat ehtivät sutaista tyhjää.

### 3.6 Turvallisuus

Hydraulikäytöt kuten pääakselin pyöritys on estetty tilanteessa, jossa valoverho katkaistaan. Näissä tilanteissa toimilaitteita ohjaavilta venttiileiltä katkaistaan syöttö. Pneumaattisella jarrulla on myös tärkeä tehtävä turvallisuuden kannalta. Kelanpurkulaitteen pyörittäessä 10 000 kg:n kelaa täydellä vauhdilla ja samalla jonkun aktivoitessa lähellä kulkeva valoverho, on kyseisen massan pysäyttäminen turvallisessa ajassa lähes mahdotonta. Tästä syystä jarru on välttämätön osa kelanpurkulaitteen toimintaa. Ilman jarrua olisi myös CE-merkin saaminen kyseiselle laitteelle todella haastavaa.



Kuva 5 Kelanpurkulaitteen pussi

#### 4 Tavoiteltu toteutus

Säädetyt sähkömoottorikäytöt ovat järjestelmiä, joiden avulla sähköistä energiaa muutetaan mekaaniseksi energiaksi hallitusti annettuja ohjearvoja noudattaen. Säädettyjen järjestelmien voidaan olettaa lisääntyvän sähköverkossa ja syrjäyttävän vastaavia säätämättömiä käyttöjä. Synä edelliseen on säädettyjen käyttöjen antamat tekniset mahdollisuudet ohjata kuormalaitetta, saavutettavat energiasäästöominaisuudet ja taloudellinen kannattavuus.[1, s. 1]

Yrityksessä oli havaittu tarve siirtyä Hydraulikäyttöisestä pyöritysmoottorista sähkökäyttöiseen pyöritykseen. Muutos päätettiin toteuttaa kehitysprojektina, jossa saisin olla mukana suunnittelemassa yhdessä suunnittelijoiden kanssa sekä toteuttamassa itse ohjelmointia. Kelanpurkulaitteen pyöritys tultaisiin toteuttamaan taajuusmuuttajaohjatulla oikosulkumoottorilla sekä hammasvaihteella. Kelan ulkohalkaisijaa olisi myös tarpeellista tutkia, jotta tätä tietoa voitaisiin käyttää laskiessa tarvittavaa pyörimisnopeutta, jonka pääakseli kulloinkin tarvitsee. Aloitin projektin suunnittelemalla miten automaattinen syöttö olisi mahdollista toteuttaa.

#### 5 Sähkökäytön mitoitus

Sähkökäytön mitoitus tulee tehdä huolella, jotta lopputulos olisi mahdollisimman hyvä. Perusteellisesti tehdyn mitoituksen myötä voidaan saavuttaa huomattavia kustannussäästöjä.

Kelan sekä pääkselin aiheuttama inertia eli hitausmomentti tulee laskea. Lieriömäisten kappaleiden kuten kelan sekä pää-akseli, inertia lasketaan seuraavasti.

$$J = \frac{1}{2}m(r_1^2 + r_2^2)$$

jossa

$m$  on kappaleen massa

$r_1$  on kappaleen sisähalkaisija

$r_2$  on kappaleen ulkohalkaisija

Suurin kela (kuva 6), joka kelanpurkulaitteelle luvataan, on ulkohalkaisijaltaan 1600 mm ja sisähalkaisijaltaan 480 mm. Suurin luvattu paino kelalle on 10 000 kg. Pää-akseli sekä maksimikokoinen kela huomioiden kokonaisineriaksi tulee  $3600 \text{ kg/m}^2$ . Pienimmällä mahdollisella kelalla inertiaksi tulee vain  $50 \text{ kg/m}^2$ . Mekaanisen välityksen kitka voidaan jättää huomioimatta sen ollessa lähes olematon suureen kelaan verrattuna.



Kuva 6 Suurin sallittu kela

Kulmakiihtyvyyttä tarvitaan selvittäessä maksimi momenttia, joka tarvitaan kelan kiihdyttämiseen ja jarruttamiseen. Oikaisulaitteessa käytettävän maksimi syöttönopeuden ollessa  $0,67 \text{ m/s}$  on selvittävä vielä kehän pituus, jotta voidaan selvittää kulmanopeus joka moottorilta vaaditaan.

$$s = 2\pi r$$

jossa

$r$  on kelan säde

Suurimman kelan kehäpituuden ollessa 5,03 m voidaan kelan maksimi kulmanopeus laskea seuraavasti.

$$\omega = \frac{v \cdot 2\pi}{s}$$

jossa

$v$  on oikaisulaitteen maksimi syöttönopeus

$s$  on kelan maksimi kehäpituus

Edellä annetuilla arvoilla laskettuna maksimi kulmanopeudeksi tulee 0,83 *rad/s*.

Oikaisulaitteen ollessa Taajuusmuuttajakäyttöinen sekä siinä käytettävän kiihdytysrampin pituuden ollessa 1,5 sekuntia voidaan tarvittava maksimi kulmakiihtyvyys laskea. Kulmakiihtyvyyden laskemiseen voidaan soveltaa suoraviivaisen liikkeen kiihtyvyyden kaavaa.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

jossa

$v$  on nopeuden muutos

$t$  on ajan muutos



Kun taas kulmakiihtyvyyden kaavan ollessa

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

jossa

$\Delta\omega$  on kulmanopeuden muutos

$\Delta t$  on ajan muutos

Tasaisesti kiihtyvässä liikkeessä kiihtyvyys on vakio. Kulmakiihtyvyys kuvaa kappaleen kulmanopeuden muutosta tietyssä ajassa. Maksimi kulmanopeuden ollessa  $0,83 \text{ rad/s}$  ja sen saavuttamiseksi kuluu  $1,5$  sekuntia aikaa. Tällöin maksimi kulmakiihtyvyydeksi saadaan  $0,55 \text{ rad/s}^2$ .

Vertailun vuoksi kelan ollessa pienimmillään eli halkaisijan ollessa  $0,5 \text{ m}$  on maksimi kulmanopeus tällöin  $2,63 \text{ rad/s}$ . Maksimi kulmakiihtyvyys joka moottorilta vaaditaan, on tässä tapauksessa  $1,75 \text{ rad/s}^2$ .

Näin ollen voidaan laskea vääntömomentti, joka tarvitaan kelan sekä pääakselin kiihdyttämiseksi maksimi pyörimisnopeuteen.

$$M = \hat{J}\hat{\alpha}$$

jossa

$\hat{J}$  on maksimi hitausmomentti

$\hat{\alpha}$  on maksimi kulmakiihtyvyys

Suurin tarvittava vääntömomentti pääakselin pyörittämiseen on  $2010 \text{ [Nm]}$  suurimmalla kelalla. Pyöritettäessä kelaa sen ollessa pienimmillään, on vaadittava vääntömomentti pyörikykseen vain  $87 \text{ [Nm]}$ .

Kun työkoneen hitausmomentti on suuri ja / tai vaadittava kiihdytysaika on lyhyt. Voi hitauden aiheuttama vastamomentti nousta mitoitusta määrääväksi tekijäksi. [2, s. 2]

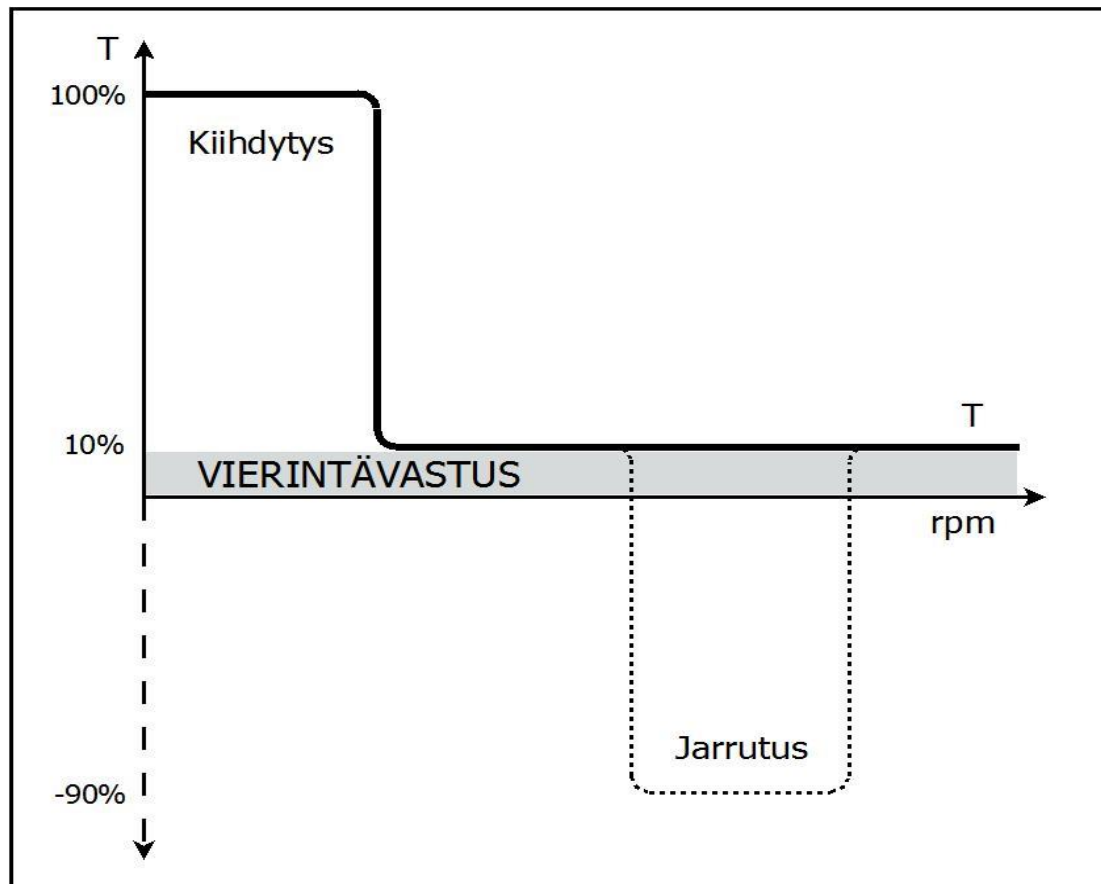
Tämän jälkeen on hyvä selvittää tarvittavat pyörimisnopeudet, joita moottorilta vaaditaan. Tiedettäessä maksimi kulmanopeus isoimmalla kelalla (0,83 *rad/s*) sekä pienimmällä kelalla (2,63 *rad/s*) voidaan laskea kierrostaajuus kummallekin ääripäälle seuraavaa kaava käyttäen.

$$n = \frac{\omega}{2\pi}$$

jossa  $\omega$  on kulmanopeus

Jolloin isoimman kelan kierrostaajuus on 0,13 1/s ja kelan ollessa pienimmillään kierrostaajuus on 0,42 1/s. kerrottaessa kierrostaajuus vielä 60:llä saadaan moottoreissa yleisemmin käytetty yksikkö rpm (revolutions per minute) Kelan ollessa suurimmillaan pyörimisnopeuden on oltava maksimisyöttönopeudella ~8 rpm ja kelan ollessa pienimmillään ~25 rpm.

Suuren kelan kiihdytys- sekä jarrutusmomentti ovat suuria, jolloin liikkeellelähtö vaatii suuren momentin moottorilta. Huippunopeuden saavutettuaan kela pyörii lähes omalla painollaan. Tästä johtuen tulevan sovelluksen momenttikäyrä tulee olemaan seuraavan kaltainen (kuva 7).



Kuva 7 Momenttikäyrä jossa kiihdytys- sekä jarrutusmomentti ovat suuria

Moottorin terminen kuormitettavuus on otettava huomioon sähkökäyttöä mitoittaessa. Terminen kuormitettavuus määrittelee moottorin pitkäaikaisen maksimikuormitettavuuden. [3, s. 23]

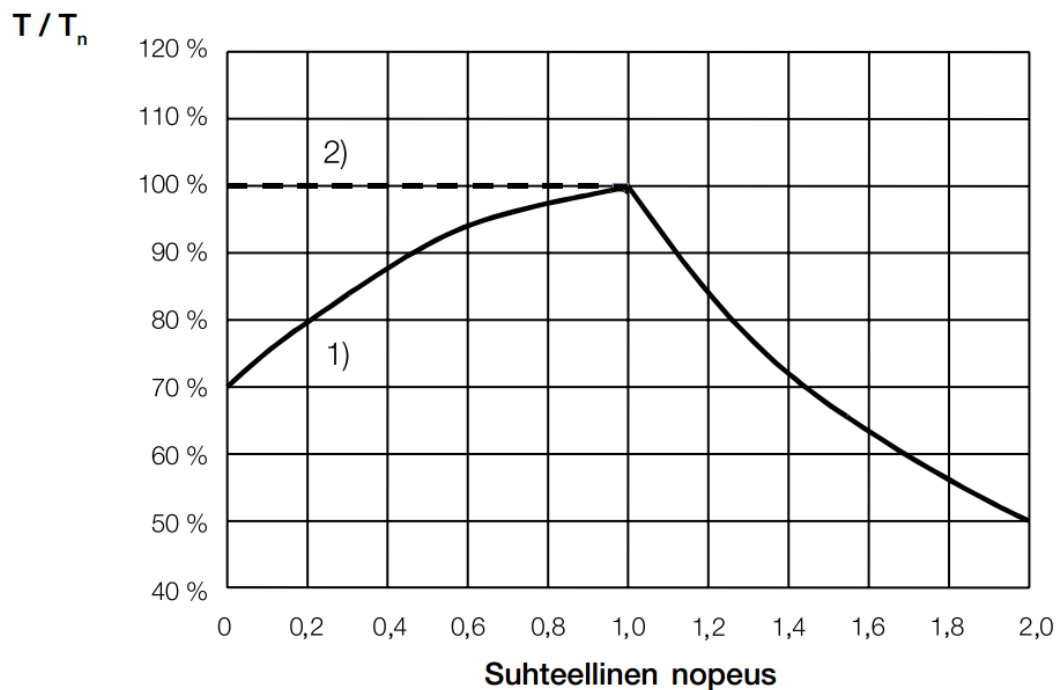
Kyseiseen sovellukseen tullaan todennäköisesti valitsemaan oikosulkumoottori. Oikosulkumoottori on lähtökohtaisesti itsejäähdytteinen, jolloin moottorin terminen kuormitettavuus laskee samalla kun moottorin kierrosluku pienenee. Tämä pitää ottaa huomioon moottoria valittaessa, sillä kyseinen ilmiö rajoittaa käytettävissä olevaa momenttia kun moottori pyörii alhaisilla kierroksilla.

Käytännössä sähkömoottoria ei voida syöttää alhaisilla pyörintänopeuden arvoilla täydellä virralla, koska moottorin tuuletus on alentunut ja siten se ei kykene johtamaan häviötä rakenteesta ulos samalla lailla kuin nimellisellä nopeudella toimiessaan. Tällöin

moottorin momentintuottokyky on alentunut. Jos moottorissa on erillinen akselin nopeudesta riippumaton vierastuuletus rakenne, voidaan niin sanottua nollanopeuden virran arvoa jatkuvassa käyttötilanteessa kasvattaa. [1, s. 27]

Tulevassa sovelluksessa moottoria tullaan pääosin käyttämään alhaisilla taajuuksilla, johtuen siitä, että oikaisulaite harvoin syöttää materiaalia kovin suurella nopeudella lävistyskeskukselle. Moottorin on kuitenkin kyettävä syöttämään materiaalia myös maksimi nopeudella, jolloin sekin on huomioitava moottoria valittaessa. Tästä johtuen moottori tulisi mielestäni varustaa erillisellä jäähdytyksellä, jolloin moottoria voidaan kuormittaa myös alhaisilla kierroksilla.

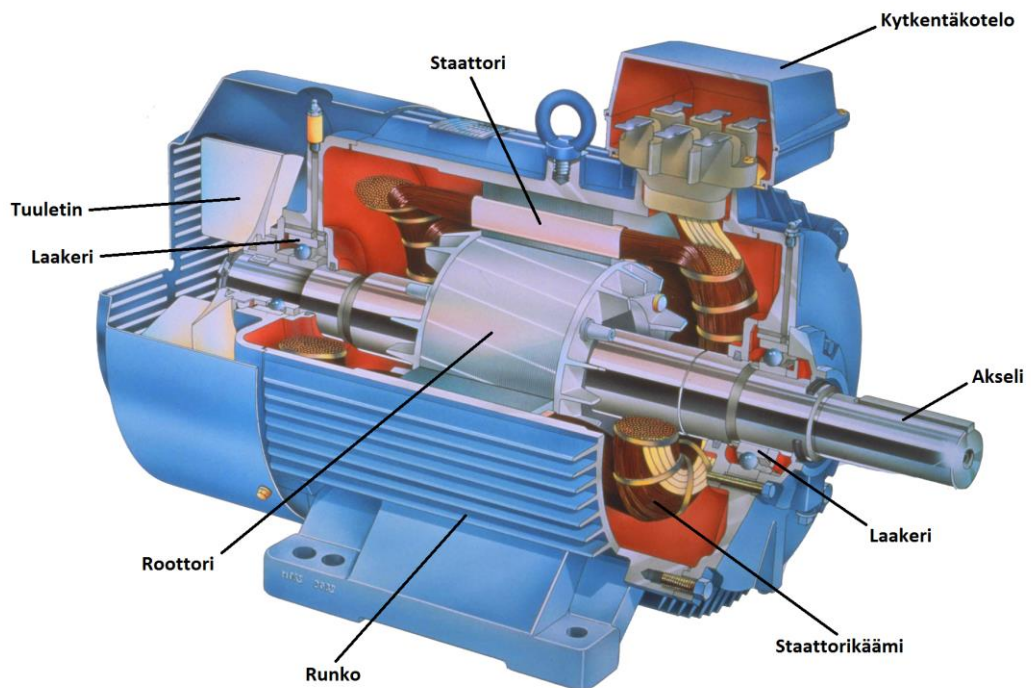
Termisen kuormituksen kuvaajasta (kuva 8) käy ilmi kuinka paljon lisäjäähdytys vaikuttaa käytettävissä olevaan momenttiin.



Kuva 8 Vakio-oikosulkumoottorin tyypillinen kuormitettavuus taajuusmuuttajalla säädetyssä käytössä 1) ilman erillistä jäähdytystä ja 2) erillisjäähdytyksellä. [3, s. 23]

## 6 Oikosulkumoottori

Yksinkertaisen rakenteensa vuoksi oikosulkumoottori (kuva 9) on erittäin suosittu moottori. Muihin moottorityyppeihin verrattuna, oikosulkumoottorissa ei ole erillisiä magneettikäämiä, vaan ainoastaan suhteellisen yksinkertaiset staattori- ja roottorikäämitykset. Tärkeimmät osat moottoritoiminnan kannalta ovat staattorin käämitykset levypaketteineen sekä roottorin käämitys levypaketteineen. Käytännössä ainoat moottorin kuluvat osat ovat laakerit. [4, s. 7]



Kuva 9 Oikosulkumoottorin rakenne

### 6.1 Toimintaperiaate

Oikosulkumoottorin toiminta perustuu moottorin sisällä pyörivään magneettikenttään. Staattorin symmetrisessä kolmivaihekäämityksessä kulkevan virran avulla kehittyä kyseinen magneettikenttä. Pyörivä magneettikenttä leikkaa roottorisauvoja jolloin niihin induoituu jännite. Indusoitunut jännite aiheuttaa roottorisauvoihin virran joka synnyttää magneettikentän ympärilleen. Roottorisauvojen leikatessa staattorin magneettikenttää syntyy vääntömomentti.

Moottori aloittaa pyörimisen, kun sähköinen vääntömomentti on suurempi kuin roottoria jarruttavan kuorman vääntömomentti. Roottori pyörii aina samaan suuntaan kuin kenttä. Roottorin nopeuden lisääntyessä pienenee roottorisauvojen ja kentän välinen nopeusero, jolloin roottorijännite ja -virta pienenevät.

Moottorin teoreettinen tahtinopeus määräytyy seuraavalla tavalla.

$$n_s = 60 \frac{f}{p}$$

jossa

$n_s$  on moottorin nimellinopeus

$f$  on sähköverkon nimellitaajuus [Hz]

$p$  on moottorin napaluku

Oikosulkumoottorin todellinen pyörimisnopeus ilmaistaan yleensä niin sanotun jättämän avulla. Jättämä tarkoittaa, kuinka monta prosenttia roottorin nopeus on tahtinopeutta pienempi. Kuormittamattoman moottorin pyörimisnopeus asettuu tilaan, missä moottorin kehittämä vääntömomentti on yhtä suuri kuin laakerien ja tuulettimen kitkan aiheuttama kuormittava vääntömomentti. Jättämä voidaan laskea kaavalla

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} 100\%$$

jossa

$s$  on moottorin jättämä [rpm]

$n_s$  on moottorin tahtinopeus [rpm]





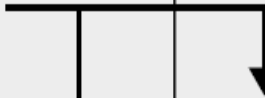
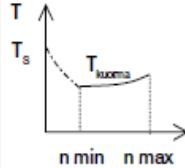
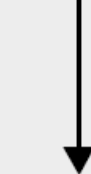
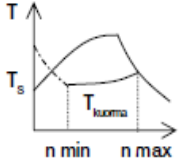

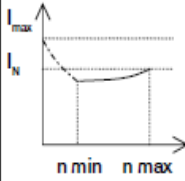

$n$  on roottorinnopeus [rpm]

[4, s. 9 - 10]

Kun oikosulkumoottoria käytetään nimellistaajuuden eli tässä tapauksessa 50 Hz:n alapuolella olevilla taajuuksilla, kutsutaan kyseistä aluetta vakiovualueeksi. Kun taas moottorin toimiessa nimellistaajuuden yläpuolella vastaavasta alueesta käytetään nimitystä kentänheikennysalue. Kentänheikennysalueella moottori voi toimia vakioteholla. Tämän johdosta kentänheikennysaluetta voidaan kutsua vakioehtoalueeksi.

## 6.2 Moottorin mitoitus

Tiedettäessä vaadittava vääntömomentti, käyttöjännite(380 V) sekä taajuus(50 Hz) on selvítettävä, mikä oikosulkumoottori valitaan kyseiseen sovellukseen (kuva 10).

Mitoituksen vaiheet	Verkko	Muuttaja	Moottori	Kuorma
				
1) Tarkista syöttävä sähköverkko ja kuormitus	$f_N=50\text{Hz}, 60\text{Hz}$ $U_N=380\dots 690\text{V}$			
2) Valitse moottori näiden tekijöiden mukaan: • Lämpökuomitettavuus • Kierroslukualue • Tarvittava maksimimomentti				
3) Valitse muuttaja näiden tekijöiden mukaan: • Kuormitustyyppi • Jatkuva ja maksimivirta • Syöttöverkko				

Kuva 10 Mitoituksen eri vaiheet [3, s. 8]

Pyöritysmoottorin, sekä pää-akselin välinen hammasvälitys on 1:5. Tällöin momentti, joka pyöritysmoottorilta vaaditaan, on seuraava

$$\frac{2010 \text{ Nm}}{5} = 402 \text{ Nm}$$

Pyörivän kelan kierrosalueen ollessa 8 - 25 rpm kierrosalue joka pyöritysmoottorilta vaaditaan, on seuraava

$$\frac{8 \text{ rpm}}{\frac{1}{5}} = 40 \text{ rpm}$$

$$\frac{25 \text{ rpm}}{\frac{1}{5}} = 125 \text{ rpm}$$

Pyöritysmoottorilta vaadittavan maksimimomentin ollessa vielä noin suuri ja kierrosalueen ollessa noin pieni, vaaditaan vaihde oikosulkumoottorin sekä pyöritysakselin väliin, jotta momentti sekä kierrosalue saataisiin sopiviksi.

Tässä tapauksessa koin painoarvoltaan tärkeämmäksi kierrosalueen, jonka halusin optimoida juuri oikeaksi. valitsin vaihteen välitykseksi 13,7 jolloin moottorilta vaadittava maksimi kierrosnopeus on  $125 \cdot 13,7 = \sim 1700 \text{ rpm}$ .

Vaihteen ollessa välitykseltään 1:13,7 ja tarvittavan maksimimomentin ollessa 402 Nm on momentti joka moottorilta vaaditaan.

$$\frac{402 \text{ Nm}}{13,7} = 29,3 \text{ Nm}$$



Laskettaessa kuormalaitteen puoleista momenttia eli toisiomomenttia, on huomioitava vaihteen hyötysuhde.

$$T_2[Nm] = T_1[Nm] \cdot \eta$$

jossa

$T_2$	toisiomomentti
$T_1$	moottorin momentti
$\eta$	vaihteen hyötysuhde

Moottoriksi valikoitui Nordgear:n SK672.1-132SH/4 TF mallinen hammasvaihdemoottori (kuva 11), jossa itsessään on sekä oikosulkumoottori että hammasvaihde.

Moottorin maksimimomentille on myös jätettävä noin 30 % marginaali, kun otetaan huomioon mitoitusvaiheen maksimimomentti. [3, s. 7]

Kun hammasvaihdemoottorin toisiomomentti on 493 Nm (taulukko 1) ja vaaditun maksimimomentin ollessa 402 Nm, jää marginaalia ~23 %.



Kuva 11 Nordgear hammasvaihdemoottori

Taulukko 1. Kelanpurkulaitteeseen valitun hammasvaihdemootorin tekniset tiedot

Tuotekuvaus	Lieriöhammasvaihdemoottori
Moottorin nimellisnopeus	1.460 <sup>1</sup> /min
Välityssuhde	13,70
Toisionopeus	107 <sup>1</sup> /min
Käyttökerroin	1,20
Moottorin nimellismomentti [Nm]	36
Toisiomomentti M2 [Nm]	493
Teho [kW]	5,500
Jännite [V]	400/690
Taajuus [Hz]	50
Hyötysuhdeluokka	IE2
Nimellisvirta I [A]	10,70
Cosphi 1	0,84
Paino [kg]	67

Moottorin lähtöteho voidaan laskea nopeuden ja momentin (taulukko 1) avulla seuraavasti.

$$P_{\text{lähtö}} = \frac{T[\text{Nm}] \cdot n[\text{rpm}]}{9550}$$

jossa

$T$  on moottorin nimellismomentti

$n$  on moottorin nimellisnopeus

Moottorin syöttöteho voidaan laskea jännitteen, virran ja tehokertoimen avulla.

$$P_{\text{syöttö}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

jossa

$U$  on moottorin syöttöjännite

$I$  on moottorin nimellisvirta

$\cos(\varphi)$  on moottorin tehokerroin

Moottorin hyötysuhde voidaan laskea jakamalla lähtöteho syöttöteholla. Moottorin hyötysuhteeksi sain 0,919.

$$\eta = \frac{P_{\text{lähtö}}}{P_{\text{syöttö}}}$$

Moottorin nimellismomentti voidaan laskea kaavalla

$$T = \frac{9550 \cdot P_n}{n_n}$$

jossa

$P_n$  on moottorin nimellisteho

$n_n$  on moottorin nimelisyörimisnopeus

$$\frac{9550 \cdot 5,5 \text{ kW}}{1460 \text{ rpm}} = 36 \text{ Nm}$$

## 7 Hammasvaihde

Tilanteessa, jossa kuormalaitteen pyörimisnopeus on alhainen, on usein viisasta käyttää nopeutta nostavaa vaihdetta. Tällöin moottori voidaan mitoittaa suuremmalle nopeudelle, jonka tuloksena se on mitoiltaan ja painoltaan pienempi ja hankintahinnaltaan edullisempi. [5]

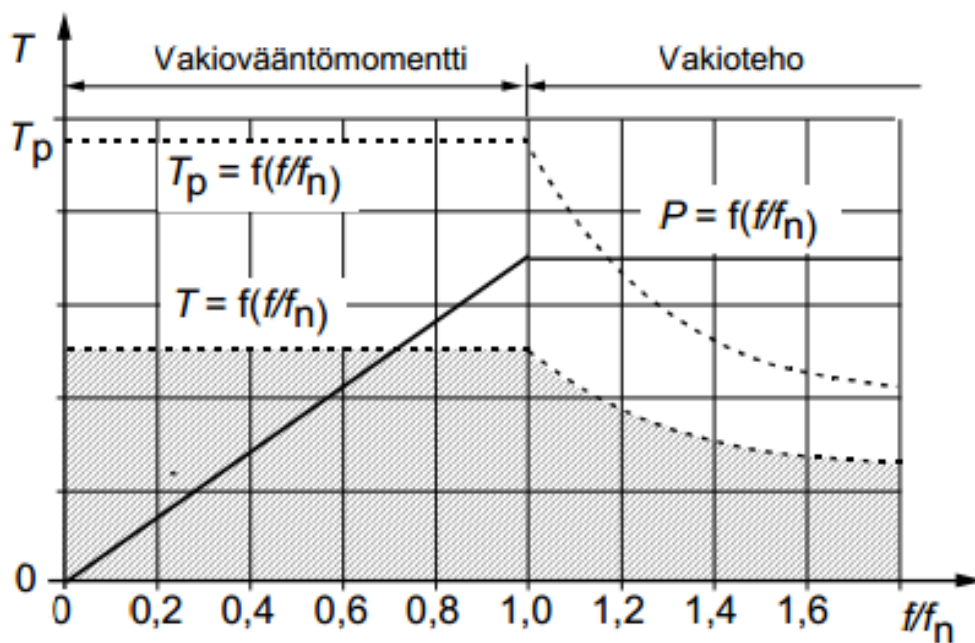
Suorahampaiset lieriöhammaspyörät ovat halpoja valmistaa, mutta niiden käynti ei ole riittävän tasaista ja äänetöntä vaativissa tarkoituksissa. Parannusta tasaisuuteen ja äänettömämpään käyttöön saadaan valmistamalla hammaspyörät vinohampaisina. Vinohampaiset hammaspyörät aiheuttavat huonontavana seikkana akseleiden suuntaisia voimia. Nuolihampaisessa hammaspyörässä aksiaalivoimat kuitenkin kumoavat toisensa. Lieriöhammaspyöriä sijoitetaan sellaisinaan käytävän ja käytettävän akselin väliin, tai valmiisiin vaihteistoihin, jotka kiinnitetään akseleihin. On myös mahdollista käyttää portaittain säädettäviä vaihteistoja, joiden käyttö on yleistä etenkin työstökoneissa ja autoissa. Työstökoneista esimerkiksi jyrsinkoneissa ja sorveissa käytetään suorahampaisia lieriöhammaspyöriä. Autojen vaihteistoissa käytetään sekä vino että suorahampaisia lieriöhammaspyöriä. Lieriöhammaspyöräsuureet on standardisoitu, ja suomalainen standardi perustuu kansainväliseen ISO standardiin. [6, s. 147]

Mekaanisissa sovelluksissa on usein vaihde, joka sovittaa kuorman sekä moottorin pyörimisnopeuden toisiinsa, niin myös tässä sovelluksessa. Kelan pyörimisnopeusalueen ollessa vain 40 - 125 rpm, on vaihteen käyttäminen välttämätöntä, koska esimerkiksi 2-napaisella oikosulkumoottorilla vakiovoalueella käytettäessä kierrosalue on ~ 0 – 3 000 rpm. Kyseisessä Nordgearin vaihteessa joka valikoitui sovellukseen, on toisioakselin laakerointi integroitu runkoon jolloin se kestää kovia akselikuormia. Tämän lisäksi toisioakselin laakeroinnin ja rungon välissä ei ole saumaa ja vaihteen runko on valurautaa. Hampaat on karkaistu ja hiottu. Vaihteisto on suunniteltu kestäväksi DIN 3990 -standardin mukaiset rasitukset.

## 8 Taajuusmuuttaja

Tässä sovelluksessa sekä oikaisulaitteen että kelanpurkulaitteen oikosulkumoottoria tullaan ohjaamaan taajuusmuuttajalla. Taajuusmuuttajan ominaisuuksiin kuuluu muun muassa se, että sillä voidaan muuttaa sekä lähtötaajuutta että lähtöjännitettä. Näin ollen

taajuusmuuttaja mahdollistaa oikosulkumoottorin tehokkaan ja tarkan pyörimisnopeuden ja vääntömomentin hallinnan (kuva 12). Useimmiten taajuusmuuttajat ovat tyypiltään kolmivaiheisia jännitevälipiirillisiä taajuusmuuttajia. Jännitevälipiirillisessä taajuusmuuttajassa tehopuolihoitteet muodostavat kuuden kytkimen vaihtosuuntausillan, jonka avulla moottorin vaiheet voidaan kytkeä joko positiiviseen tai negatiiviseen tasajännitepotentiaaliin. Taajuusmuuttajalla voidaan syöttää verkosta saatavilla olevaa tehoa moottorille, muttei takaisin verkkoon.



Kuva 12 Vakiovirralla moottorista saatava momentti ja teho [2, s. 15]

### 8.1 Taajuusmuuttajan ohjaus

Nopeussäädetyt käytön perustehtävä on säädellä energian siirtymistä prosessiin. Jännitevälipiirillisten taajuusmuuttajien ohjaus jaetaan usein kolmeen eri säätötyyppiin, Taajuussäätö, vuovektorisäätö sekä suora momenttisäätö.

### 8.1.1 Taajuussäätö

Taajuussäädössä säädettävät suureet ovat jännite ja taajuus. Jännite- ja taajuusohje syötetään modulaattoriin, joka muokkaa sen vaihtovirran siniaalto mukailleen ja syöttää eteenpäin moottorille. Tämä tekniikka tunnetaan nimellä pulssileveysmodulaatio (PWM). Taajuussäätö on yksinkertainen sekä edullinen menetelmä säätää oikosulkumoottoreita. Taajuussäädössä ei hyödynnetä lainkaan vektorisäätöä, joten haittapuolina voidaan mainita ohjauksen epätarkkuus sekä pieni käynnistysmomentti. Myös modulaattori, jota kyseisessä säätömenetelmässä käytetään, hidastaa moottorin reagoitua syöttöjännitteen ja -taajuuden muutoksiin. Taajuussäädössä ei käytetä takaisinkytkentää eli moottorilta saatavia nopeus- ja asentotietoja ei syötetä takaisin säätöpiirille. Näin ollen puhutaan takaisinkytkemättömästä käytöstä. [7, s. 11 - 12]

Tämän tyyppinen käyttö sopii sovelluksiin, joissa ei ole tarvetta tarkalle säädölle, kuten pumput ja puhaltimet.

### 8.1.2 Vuovektorisäätö

Vuovektorisäätö on kehittyneempi versio taajuussäädöstä, jonka säädettävät suureet ovat jännite, virta ja taajuus. Tässä menetelmässä käytetään takaisinkytkentää eli taajuusmuuttaja saa tietoa moottorilta, kuten moottorin nopeus- ja asentotieto. Jotta takaisinkytkentätietoa voidaan lukea, on moottorin oltava varustettu esimerkiksi pulssianturilla. Takaisinkytkentä tieto syötetään modulaattorille, joka vertaa niitä ohjearvoihin ja laskee syöttöarvot, jotka moottorille syötetään. Kyseinen sykli hidastaa moottorin vasteaikaa. [7, s. 12 - 13]

Vuovektorisäädön hyviä puolia ovat säädön tarkkuus, hyvä momenttivaste sekä täysi käynnistysmomentti. Huonoina puolina voidaan pitää järjestelmän monimutkaisuutta sekä kalleutta.

### 8.1.3 Suora momenttisäätö

Suoran momenttisäätö on kyseisistä ohjausmenetelmistä kehittynein. Se on ikään kuin vuovektorisäätö, mutta ilman takaisinkytkentää. Tässä menetelmässä ei modulaattoria tarvita suureiden säätöön, kuten PWM-käytöissä, koska taajuusmuuttajan prosessori lukee moottorin tilatiedot itse ja käsittelee ne erittäin tarkkojen matemaattisten mallien

avulla. Koska momenttia ja magneettivuota säädetään suoraan, niin säätövaiheiden määrä vähenee ja käytön momenttivaste nopeutuu huomattavasti. [7, s. 14]

Suoran momenttisäädön hyviä puolia ovat sen tarkka säätö, suuri käynnistysmomentti sekä yksinkertainen rakenne.

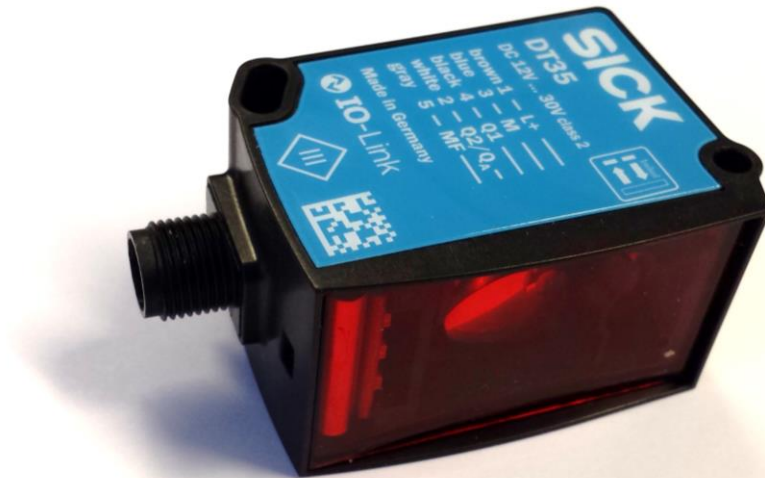
## 8.2 Taajuusmuuttajan valinta

Taajuusmuuttajaksi valikoitui Schneider electricin valmistama Altivar 71. Se on ominaisuuksiltaan hyvin monipuolinen, joten säätömahdollisuudet ovat hyvät. Kyseisen mallin valintaan vaikutti osin myös se että oikaisulaitteessa käytetään samaista taajuusmuuttajaa.

## 9 Kelan halkaisijan mittaus

Jotta kelan pintanopeus saataisiin säädettyä yhtä suureksi kuin oikaisulaitteen syöttönopeus, on kelan pyörimisnopeutta säädeltävä suhteessa kelan halkaisijaan. Tällöin on tiedettävä reaaliaikaisesti kelan halkaisija. Yhtenä tärkeimpänä kriteerinä pidin mittaus tapaa, jossa halkaisijaa mitataan kosketuksettomasti. Tällöin herkät materiaalit eivät pääse naarmuuntumaan. Tähän tarvitaan jonkin näköinen etäisyysanturi. Valitsin tähän projektiin laseretäisyysanturin (kuva 13) sen luotettavuuden, suhteellisen tarkan resoluution sekä analogisen ulostulon takia (0 - 10 v tai 4 - 20 mA).

Etäisyydenmittausantureiden toiminta perustuu valon kulkuajan mittaukseen. Lähetin lähettää valonsäteen, joka heijastuu takaisin vastaanottimeen kohteen pinnasta. Aika, jonka valonsäde tarvitsee kulkeakseen lähettimestä kohteeseen ja kohteesta takaisin vastaanottimeen, mitataan. Koska valon nopeus on vakio, voidaan kohteen etäisyys laskea mitatun kulkuajan perusteella. [8]



Kuva 13 SICK laseretäisyysanturi DT35

## 10 Säädön perusteita

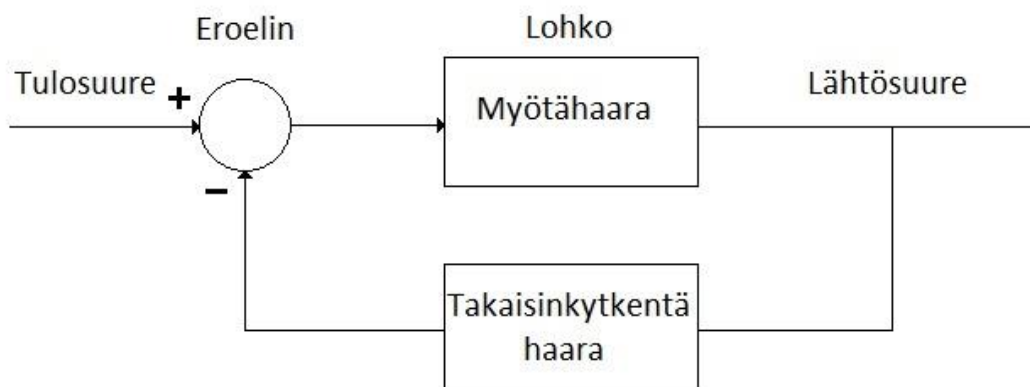
Säätötekniikassa prosesseja tai mekanismeja ohjataan säätimillä. Säätötekniikka perustuu takaisinkytkentään, jossa säädin käyttää mittaustietoa järjestelmän käyttäytymisestä prosessin ohjaamiseen. Takaisinkytkennällä pyritään estämään ulkopuolisten häiriöiden vaikutus systeemiin.

Vaikka takaisinkytkennällä on monia käyttökelpoisia ominaisuuksia, on sillä myös haittapuolia. Kun säädön tavoitteena on saada epästabiliista systeemistä stabiili, niin välillä takaisinkytkennän vaikutus on juuri päinvastainen. Tällöin ohjaus alkaakin vahvistamaan piirissä jatkuvasti kasvavaa värähtelyä.

Säätöpiirit voi jakaa karkeasti kahteen kategoriaan, suljetut sekä avoimet säätöpiirit. Suljetulla säätöpiirillä (kuva 14) tarkoitetaan järjestelmää, jossa säädin on automaattiohjauksella eli takaisinkytkentä on käytössä. Avoimella säätöpiirillä tarkoitetaan järjestelmää, jossa säädin on käsiohjauksella eli takaisinkytkentää ei käytetä. [9, s. 29]



Säätöpiiri koostuu perusosista kuten lohko, tulosuure lähtösuure sekä summauselin. Näitä perusosia tarkasteltaessa käytetään yleensä lohko-kaavioesitystä.



Kuva 14 Suljettu säätöpiiri [9, s. 30]

Kuvassa 14 on esitetty järjestelmä, jossa on tulosuure, lähtösuure sekä niiden vaikutussuunnat. Kuvasta käy ilmi myös niin sanottu negatiivinen takaisinkytkentä, joka merkitään suureen viereen eroelimessä. Mittauspisteen ja eroelimen välille jäävää osaa piirin yläosassa kutsutaan myötähaaraksi. Vastaavasti alaosassa mittauspisteen ja eroelimen väliä kutsutaan takaisinkytkennäksi.

Itse lohko edustaa prosessia, laitetta tai muuta sen kaltaista. Lohkoon usein liitetään sen matemaattis-fysikaalisen ilmiön edustama kaava, joka sitoo suureet toisiinsa. [9, s. 29]

Suljetun säätöpiirin toiminta lyhyesti:

Säädin antaa ohjauksen toimilaitteelle. Toimilaite kuten esimerkiksi oikosulkumoottori vaikuttaa prosessin suureisiin, kuten esimerkiksi pyörimisnopeuteen. Säädettävä suure mitataan ja mittausviesti kytketään takaisin säätimelle, jossa sitä verrataan käyttäjän antamaan asetusarvoon. Tämän jälkeen säädin laskee ohjauksen toimilaitteelle. [9, s. 29]

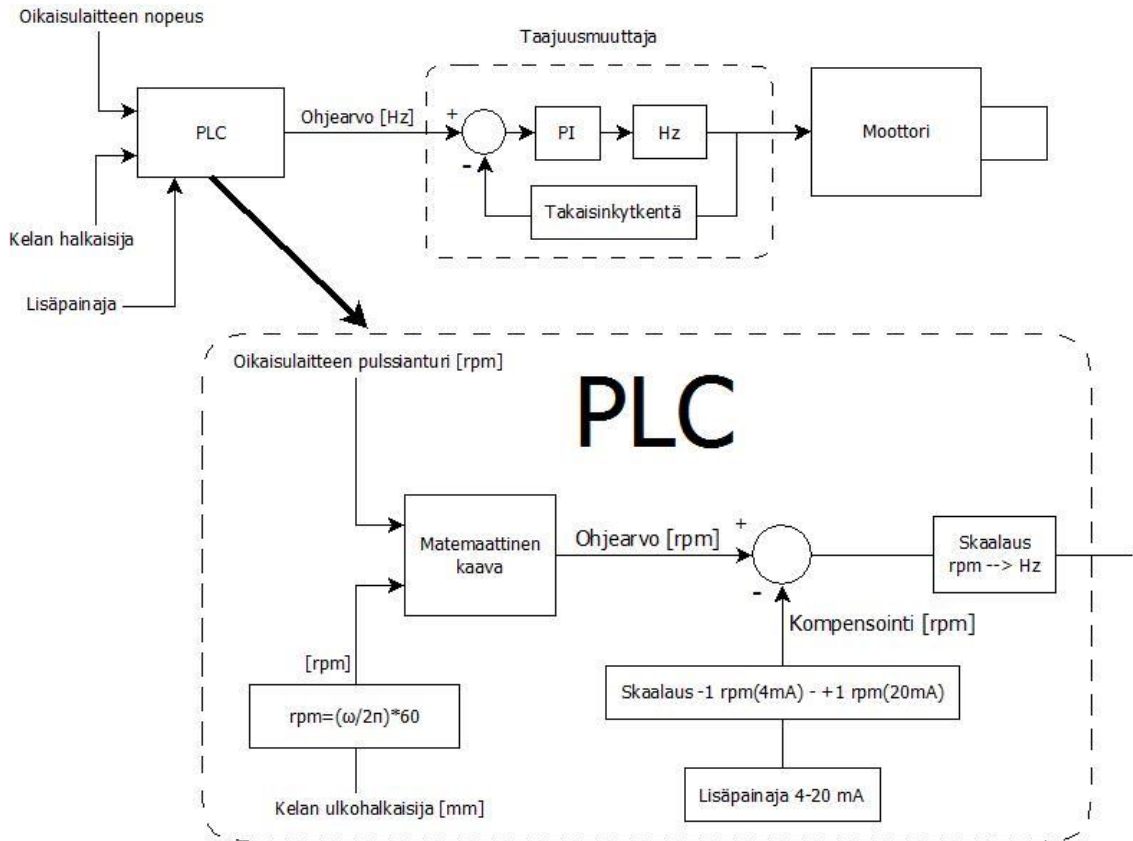
## 11 Synkronointi

Kelanpurkulaite sekä oikaisulaite molemmat ovat oikosulkumoottorikäyttöisiä. Molempien nopeutta säädellään taajuusmuuttajalla. Ratkaisu, jolla nopeudet saadaan synkronoiduksi keskenään, on seuraavanlainen.

Oikaisulaitteen nopeudensäädön ollessa jo varsin hyväksi havaittu en tule sitä juurikaan muuttamaan. Oikaisulaitteen taajuusmuuttajasta poimitaan jo tällä hetkellä tietoa PLC:hen. Esimerkiksi moottorin nopeustieto [rpm] voidaan lukea PLC:ssä, jossa kyseinen nopeus muutetaan laskukaavoilla materiaalin pintanopeudeksi [mm/min]. Oikaisulaitteen taajuusmuuttaja tulee toimimaan ohjaavana (master) taajuusmuuttajana. Kelanpurkulaitteen nopeutta säädellään oikaisulaitteen nopeuden mukaan. Taajuusmuuttaja joka kelanpurkulaitteen nopeutta säätää tulee olemaan vain masterin seuraaja, eli orja (slave).

### 11.1 Kelanpurkulaitteen nopeussäätö

Tässä työssä käytettävä nopeussäätö toteutetaan suljettua säätöpiiriä käyttäen. PLC:hen otetaan tieto oikaisulaitteen pyörimisnopeudesta, kelan ulkohalkaisijasta sekä lisäpainajan (kuva 16) potentiometrin virta-arvosta. Oikaisulaitteen pyörimisnopeus ja kelan ulkohalkaisija huomioiden, lasketaan logiikassa ohjearvo kelanpurkulaitteen pyöritysmoottorille. Tämän jälkeen pyörimisnopeutta kompensoidaan dynaamisesti lisäpainajalta saatavalla virta-arvolla (kuva 15). Lopuksi ohjearvo syötetään taajuusmuuttajalle joka pyörittää kelanpurkulaitteen moottoria.



Kuva 15 Kelanpurkulaitteen säätöpiiri

## 11.2 Lisäpainaja

Jotta synkronointi olisi luotettava eikä siinä ilmenisi pitkissäkään automaattisissa kelansyöttöohjelmissa virhettä, oli kelanpurkulaitteen ja oikaisulaitteen väliin tehtävä lisäpussi. Lisäpussi toteutetaan paineilmakäyttöisellä lisäpainajalla (kuva 16). Paineilmalla luodaan pieni vastus painajalle, jotta pussi saadaan luotua. Tämä tarkoittaa sitä että materiaali ei pääse missään vaiheessa muodostamaan pussia, jolloin herkün materiaalin pintaan syntyisi todennäköisesti naarmuja. Lisäpainajan niveleen asennetaan potentiometri, joka kertoo PLC:lle painajan kulman. Kulmatietoa käytetään hyväksi säädettäessä kelanpurkulaitteen pyörimisen nopeutta. PLC:hen luodaan dynaaminen kompensointi potentiometrillä saaduille arvoille. Käytännössä homma toimii niin, että lisäpussin ollessa suurimmillaan saadaan potentiometriltä ulos 4 mA. Tällöin Logiikan syöttämää nopeusarvoa kompensoidaan pienentämällä sitä ennen sen syöttämistä taajuusmuutta-

jälle. Näin ollen kelanpyöriksen vauhti suhteessa oikaisulaitteen syöttönopeuteen hidastuu. Kun taas pussi on pienimmillään eli materiaali tiukalla oikaisulaitteen ja kelanpurkulaitteen välissä, potentiometriltä saatava arvo on 20 mA. Tässä tapauksessa logiikalta taajuusmuuttajalle syötettävää nopeusarvoa kompensoidaan kasvattamalla sitä. Näin ollen pyöritys hieman nopeutuu. Pussin taas ollessa optimaalinen eli potentiometriltä saatava arvo on noin 12 mA, taajuusmuuttajan nopeusarvoksi syötetään sama nopeus kuin oikaisulaitteen sen hetkinen nopeus on. Käytännössä oikaisulaitteen nopeusarvoa kompensoidaan portaattomasti halutulla skaalaus tarkkuudella. Kyseistä kompensointi menetelmää käytettäessä ei materiaali pääse missään tilanteessa liian löysälle eikä liian kireälle.



Kuva 16 Lisäpainaja

## 12 Ohjelmitavalogiikka

Ohjelmitavat logiikat ovat yleisimpiä teollisuuden ohjauslaitteita. Ohjelmitava logiikka on mikroprosessorilla varustettu laite, joka ohjaa ja säätää koneiden ja prosessien toimintoja logiikkaohjelman avulla. Logiikkaan liitetyt kytkimet, koskettimet ja anturit välittävät tietoja laitteiden toimintatiloista ja prosessien mittausrvoista. Näiden tietojen perusteella logiikkaohjelma ohjaa mm. releitä, merkkilamppuja, magneettiventtiileitä ja mootoreita. [10, s. 9]

S7-300-sarja on Siemensin tunnetuimpia tuotteita. Se on hyvin monipuolinen ohjelmitavalogiikka. Käyttökohteet vaihtelevat prosessi -ja kappaletavarateollisuudesta aina yksittäisen laitteen ohjaukseen. Logiikka on kuitenkin suunniteltu eniten silmällä pitäen kappaletavara-automaatiota. Siemensin S7-300-sarja on Suomessa yleisesti käytössä ja sen vuoksi osaamista on laajalti tarjolla. [11]

Siemens S7-300-sarjan logiikat tukevat sekä Profibus että Profinet-kenttäväylää, jolloin I/O voidaan hajauttaa pienemmiksi yksiköiksi eri puolelle kokonaisuutta, niin kuin tässäkin tapauksessa tehdään. Kelanpurkulaitteessa on oma I/O terminaalijohdon liittämiseen ainoastaan Profinet-väylän kautta. Näin ollen ei ole tarpeellista johdotta jokaista anturijohdotta sähkökaapilta saakka. Molemmat taajuusmuuttajat ovat myös yhdistettynä Profinet-väylään, jolloin kaikki tarvittava tieto saadaan siirrettyä väylän kautta PLC:n käytettäväksi.

Logiikka käsite ei nykyään enää sisällä vain yhtä laitetta, vaan muunneltavuuden ja useampiin eri tehtäviin soveltuvan logiikan pitää kyetä muuttumaan tarpeen mukaan. Viime aikoina on esiin noussut käsitys modulaarisesta logiikasta eli logiikasta jonka osia on helppo muunnella vaihdettavilla osilla. Modulaarisuus helpottaa myös huolto ja korjaustöitä, sillä viallisen osan voi vain vaihtaa helposti toiseen. Siemens Simatic S7-300 -sarjan logiikat ovat modulaarisuudellaan ja prosessori valikoimansa laajuudella moneen eri sovellutukseen sopivia. [12, s. 9]

S7-300-sarjan modulaarisuudesta johtuen sen perusosiin, eli virtalähteeseen ja prosessoriin saa lisättyä signaaliyksikön, liitäntäyksikön, toimintayksikön tai kommunikointiyksikön. Näiden eri osien avulla kyetään liittämään useita logiikoita yhteen, saadaan ne

kommunikoimaan suurempien kokonaisuuksien kanssa ja liittämään erilaisia toimilaitteita logiikkaan. Tarpeiden mukaan edellä mainittuja osia saa liitettyä logiikkaan useita. [12, s. 9]

Itse ohjelmointi tapahtuu Siemensin STEP7 ohjelmistolla. Ohjelmointikielenä käytän STL-kieltä.

Logiikka ohjelmassa tullaan hyödyntämään osaksi jo olemassa olevia ohjelmia. Oikaisulaitteelle on jo olemassa ohjelmalohko jossa sen nopeutta säädellään lävistyskeskukseen tarpeiden mukaan. Oikaisulaitteen taajuusmuuttajalta saatavaa tietoa tallennetaan väylän kautta erilliseen DB:hen eli data blockiin [liite 1], josta haluttu tieto voidaan hakea esimerkiksi laskutoimituksia varten. Samaan DB:hen tallennetaan myös laseretäisyysanturilta saatava tieto. Kelanpyörytyksen taajuusmuuttajaa varten on luotava uusi FC eli funktio. Oikaisulaitteen taajuusmuuttajalta saatavaa tila- sekä nopeustietoa sekä laseranturin kelan halkaisijaa käsittelevä tieto käsitellään kyseisessä lohkoissa. Myös kelanpyörytystä varten tarvittava tieto lasketaan tässä lohkoissa, jonka jälkeen tieto syötetään väylän kautta data blockiin josta taajuusmuuttaja lukee määrätyt arvot.

### **13 Johtopäätökset**

Projekti oli kaikin puolin mielenkiintoinen, koska siihen sisältyi niin paljon eri osa-alueita, suunnittelusta ohjelmointiin asti. Eniten aikaa vei Sähkökäytön mitoitus, joka oli yllättävän suuritoinen. Moottorin mitoittamisesta hankalan teki pää-osin se että se oli mitoitettava 10 000 kg kuormalle ja 40 m/min syöttönopeudelle. Kyseistä nopeutta ei käytännössä käytetä koskaan, eikä varsinkaan kyseistä kuormaa. Kelanpurkulaitteen spesifikaatio kuitenkin lupaa maksimi kelan painoksi kyseisen 10 000kg ja kappaleajat laskeaan kyseisellä syöttönopeudella, jolloin laskelmat oli niiden mukaan tehtävä. Kyseisellä kuormalla moottorin on pystyttävä kiihdyttämään kela täyteen vauhtiin. Oikaisulaitteen syöttönopeus on pää-osin suhteellisen pieni, jolloin myöskään kelanpyörimisnopeuden ei tarvitse olla kovin suuri. Mielestäni moottori on tällä hetkellä yli suuri kyseistä sovellusta varten. Aikataulumuutosten johdosta kyseistä sovellusta ei vielä ehditty testamaan, joten kyseinen kommentti perustuu täysin omaan arviooni.

Kelanpurkulaitteen ollessa sähkökäyttöinen on ohuen materiaalin vetäminen oikaisulaitteella mahdotonta ketjuvälityksen sekä vaihteen aiheuttaman kitkan takia. Näin ollen nopeussäädön pitäisi toimia myös herkillä materiaaleilla joilla pussiajtoa ei voida käyttää. Kyseinen ajotyylly vaatii molempien sekä kelanpurkulaitteen että oikaisulaitteen sulavan nopeussäädön, joka loi eniten haasteita projektiin. Nopeussäätöä on hieman testattu simulaattorilaitteistolla, jonka perusteella sen pitäisi toimia riittävän tarkasti. Varsinkin kun oikaisulaitteeseen asennettiin lisäpainaja, joka mahdollistaa pyörimisnopeuden kompensoinnin. Pyörimisnopeuden kompensointia on käytettävä siitä syystä, että laseretäisyysanturilta tulevan datan pienetkin muutokset, jotka kertovat kelan halkaisijan ja joiden mukaan tarvittava kelan pyörimisnopeus lasketaan, ei ole mielestäni tarpeeksi tarkka. Varsinkaan jos materiaalin määrä kelalla on pieni. Tällöin on mahdollista paisuttaa kelaa niin paljon että sen muoto muuttuu hieman kolmiomaiseksi. Tämä taas muuttaa hetkellisesti kelan pyörimisnopeutta, joko liian suureksi tai liian pieneksi keskinopeuden kuitenkin pysyessä oikeana.

Toivon mukaan tulevaisuudessa nopeussäätö toimii niin kuin sen oletan toimivan. Olen luottavainen, että näin todella tapahtuu. Tällöin projekti on ollut erittäin onnistunut, koska aikaisemmalla järjestelmällä on ollut todella haastavaa ajaa sekä erittäin ohutta, että herkkää materiaalia jättämättä siihen asiakasta häiritseviä jälkiä. Tämä tulee olemaan myös iso askel täysin automatisoituun kelojen hallintajärjestelmään.

## Lähteet

1. Hietalahti Lauri, Säädetyt sähkömoottorikäytöt, Amk-kustannus, Tammertekniikka. Vantaa 2012
2. ABB Oy, TTT-käsikirja 2000-07, Sähkömoottorikäytöt. Verkkodokumentti. Saatavilla: [http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/18\\_S%84hk%94moottorik%84yt%94t.pdf](http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/18_S%84hk%94moottorik%84yt%94t.pdf). Luettu 21.11.2014.
3. ABB Oy, Tekninen opas nro 7, Sähkökäytön mitoitus. Verkkodokumentti. Saatavilla: [http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/b11daffe92973be93c1256d2800415027/\\$file/tekninen\\_opasnro7.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/b11daffe92973be93c1256d2800415027/$file/tekninen_opasnro7.pdf). Luettu 26.10.2014
4. Leena Korpinen, Sähkövoimatekniikkaopus, 10 Sähkökoneet, osa 1. Verkkodokumentti. Saatavilla: [http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/10sahkokoneet\\_1osa.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf). Luettu 11.1.2015.
5. Karhula Jukka, Koneen osien suunnittelu, luentomoniste. Lappeenranta, LUT, Metallitekniikka
6. Ansaharju, T. Maaranen, K.. Koneenasennus. 342 s. ISBN 951-0- 21574-0. Porvoo 1998
7. ABB Oy, Technical guide No.1, Direct torque control. Verkkodokumentti. Saatavilla: [http://www08.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/14f3a3ad8f3362bac12578a70041e728/\\$file/ABB\\_Technical\\_guide\\_No\\_1\\_REVC.pdf](http://www08.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/14f3a3ad8f3362bac12578a70041e728/$file/ABB_Technical_guide_No_1_REVC.pdf). Luettu 19.1.2015.
8. IFM, Etäisyysanturit. Verkkodokumentti. Saatavilla: [http://www.ifm.com/ifmfin/web/pmain/010\\_070\\_030.html](http://www.ifm.com/ifmfin/web/pmain/010_070_030.html). Luettu 12.2.2014.
9. Olli Jari, Sääätötekniikka 2012-2013, luentomoniste. Vantaa, Metropolia, Automaatiotekniikka
10. Liljaniemi Antti, Ohjaustekniikka TD00AA80-2005, luentomoniste. Vantaa, Metropolia, Automaatiotekniikka



11. Siemens Oy, Ohjelmoitavat logiikat, S7-300. Verkkodokumentti. Saatavilla: [http://www.siemens.fi/fi/industry/teollisuuden\\_tuotteet\\_ja\\_ratkaisut/tuotesivut/automaatiotekniikka/ohjelmoitavat\\_logiikat\\_simatic/s7\\_300](http://www.siemens.fi/fi/industry/teollisuuden_tuotteet_ja_ratkaisut/tuotesivut/automaatiotekniikka/ohjelmoitavat_logiikat_simatic/s7_300). Luettu 17.1.2015.
  
12. Kansainvälinen oppimisympäristö Siemens S7–logiikalle. Verkkodokumentti. Saatavilla: <https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/8643/Viheri%C3%83%3Fkoski.Riku.pdf>. Luettu 12.12.2015.

## Oikaisulaitteen taajuusmuuttajan Data Block

Taajuusmuuttajalta tulevat tiedot.

SIMATIC 5285\_Messe\ 02/25/2015 02:13:04 PM  
SINUMERIK\CPU 317F-3 PN/DP\...\DB70 - <offline>

### DB70 - <offline> - Declaration view

"TAMU\_Interface"  
Global data block DB 70  
Name: Family:  
Author: Version: 0.1  
Block version: 2  
Time stamp Code: 10/17/2008 10:45:11 AM  
Interface: 10/17/2008 10:45:11 AM  
Lengths (block/logic/data): 00278 00052 00000

Object properties:  
S7\_language 9(1) English (United States) 09/09/2011 09:40:34 AM

Block: DB70

Address	Name	Type	Initial value	Comment
0.0		STRUCT		
+0.0	Control_Word_1_Bit_1	BOOL	FALSE	Halt/Halt
+0.1	Control_Word_1_Bit_2	BOOL	FALSE	Reserved (set to 0)
+0.2	Control_Word_1_Bit_3	BOOL	FALSE	Reserved (set to 0)
+0.3	Control_Word_1_Bit_4	BOOL	FALSE	Direction of rotation command Rw=0, Rw=1
+0.4	Control_Word_1_Bit_5	BOOL	FALSE	Can be assigned to a command.
+0.5	Control_Word_1_Bit_6	BOOL	FALSE	Can be assigned to a command.
+0.6	Control_Word_1_Bit_7	BOOL	FALSE	Can be assigned to a command.
+0.7	Control_Word_1_Bit_8	BOOL	FALSE	Can be assigned to a command.
+1.0	Control_Word_1_Bit_9	BOOL	FALSE	Switch on/Contactor command
+1.1	Control_Word_1_Bit_10	BOOL	FALSE	Disable voltage/Authorization to supply AC power
+1.2	Control_Word_1_Bit_11	BOOL	FALSE	Quick stop/Emergency stop
+1.3	Control_Word_1_Bit_12	BOOL	FALSE	Enable operation/Run command
+1.4	Control_Word_1_Bit_13	BOOL	FALSE	Reserved (set to 0)
+1.5	Control_Word_1_Bit_14	BOOL	FALSE	Reserved (set to 0)
+1.6	Control_Word_1_Bit_15	BOOL	FALSE	Reserved (set to 0)
+1.7	Control_Word_1_Bit_16	BOOL	FALSE	Fault reset/Fault acknowledgment active on 0 V 1 rising edge
+2.0	Control_SpeedReference	WORD	W#16#0	Speedreference to Inverter
+4.0	Control_Spare_1	INT	0	
+5.0	Control_Spare_2	INT	0	
+8.0	Control_Spare_3	INT	0	
+10.0	Control_Spare_4	INT	0	
+12.0	Control_Spare_5	INT	0	
+14.0	Status_Word_1_Bit_1	BOOL	FALSE	Reserved (= 0)
+14.1	Status_Word_1_Bit_2	BOOL	FALSE	Remote, command or reference via the network
+14.2	Status_Word_1_Bit_3	BOOL	FALSE	Target reached, reference reached
+14.3	Status_Word_1_Bit_4	BOOL	FALSE	Internal limit active, reference outside limits
+14.4	Status_Word_1_Bit_5	BOOL	FALSE	Reserved (= 0)
+14.5	Status_Word_1_Bit_6	BOOL	FALSE	Reserved (= 0)
+14.6	Status_Word_1_Bit_7	BOOL	FALSE	Stop key, STOP via stop key
+14.7	Status_Word_1_Bit_8	BOOL	FALSE	Direction, direction of rotation 0=Rw, 1=RW
+15.0	Status_Word_1_Bit_9	BOOL	FALSE	Ready to switch on, power section line supply pending
+15.1	Status_Word_1_Bit_10	BOOL	FALSE	Switched on, ready
+15.2	Status_Word_1_Bit_11	BOOL	FALSE	Operation enabled, running
+15.3	Status_Word_1_Bit_12	BOOL	FALSE	Fault
+15.4	Status_Word_1_Bit_13	BOOL	FALSE	Voltage enabled, power section line supply present
+15.5	Status_Word_1_Bit_14	BOOL	FALSE	Quick stop/Emergency stop
+15.6	Status_Word_1_Bit_15	BOOL	FALSE	Switched on disabled, power section line supply locked.
+15.7	Status_Word_1_Bit_16	BOOL	FALSE	Warning, alarm
+16.0	Status_Speed	INT	0	Travelling Speed
+18.0	Status_Fault_Code	INT	0	Active fault code
+20.0	Status_Spare_1	INT	0	
+22.0	Status_Spare_2	INT	0	
+24.0	Status_Spare_3	INT	0	
+26.0	Status_Spare_4	INT	0	
+28.0	Status_Spare_5	INT	0	
+30.0	TAMU_Enable_OB100	BOOL	TRUE	
+30.1	TAMU_Aut_Start_Direction	BOOL	FALSE	
+30.2	TAMU_Aut_Quick_Stop	BOOL	FALSE	
+30.3	TAMU_Man_Start_Direction	BOOL	FALSE	