

Jarno Leppänen

**PYÖRIMISNOPEUSOHJATUN HYD-  
RAULIPUMPUN SOVELTUVUUS TELA-  
ALUSTAISIIN KIVENMURSKAIMIIN**

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Petteri Multanen  
Huhtikuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Jarno Leppänen: Pyörimisnopeusohjatun hydraulipumpun soveltuvuus tela-alustaisiin kivenmurskaimiin  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikka, TkK  
Huhtikuu 2021

---

Pakokaasu- ja hiukkaspäästövaatimukset kiristyvät kiihtyvään tahtiin, eikä dieselteknologialla todennäköisesti voida täyttää näitä vaatimuksia tulevaisuudessa. Ratkaisuksi ehdotetaan usein dieselmootoreiden korvaamista sähkökäyttöillä, joihin liittyy tela-alustaisen kivenmurskaimien tilanteessa useita ongelmia. Yksi näistä on lineaaristen liikkeiden toteuttaminen, sillä sähkömekaaniset sylinterit eivät näytä soveltuvan tela-alustaisiin kivenmurskaimiin niiden kalliin hinnan ja huonon sovelluskohtaisen olosuhteiden kestävyys takia. Nykyisin tutkittavassa tuotteessa lähes kaikki toiminnot on toteutettu säätötilavuuspumppuja käyttävällä hydraulijärjestelmällä, joka nähdään liian kalliina ja monimutkaisena ratkaisuna jätettäväksi käyttöön pelkille lineaarisille toiminoille.

Tässä työssä tutkitaan lineaaristen liikkeiden toteuttamista nopeusohjattua hydraulipumppua käyttävällä hydraulijärjestelmällä. Työ jakaantuu kahteen osaan sen lähtökohtien esittämisen jälkeen. Kirjallisuustutkimusosassa käytetään pääsääntöisesti oppikirjatietoa, mutta myös aihealueen tieteellisiä julkaisuja sekä kaupallisten nopeusohjattujen pumppujen tuoteselosteita. Se käy läpi tyypilliset nopeusohjatun pumpun komponentit eri toteutusvaihtoehtoihin sekä pumpun ohjausjärjestelmän toiminnan pääpiirteittäin. Työn soveltavassa osassa taas pohditaan kirjallisuustutkimuksen pohjalta nopeusohjatun pumpun implementointia tuotteeseen. Käsiteltäviä aiheita ovat nopeusohjatun pumpun toteuttamisen järjestyminen hyllykomponenteista verrattuna valmiisiin kaupallisiin ratkaisuihin sekä pumpun kannattavat komponenttivalinnat. Tämän jälkeen muodostetaan nopeusohjattua pumppua käyttävän hydraulijärjestelmän toimintaperiaate-ehdotus ja verrataan tätä nykyiseen toteutukseen.

Työ osoittaa, että nopeusohjattua pumppua käyttävän hydraulijärjestelmän implementoinnissa todennäköisesti vaativin vaihe on toteuttaa sähköinen ohjausjärjestelmä, mikä vaatii huomattavasti erilaista osaamista verrattuna säätötilavuuspumppua käyttävän hydraulijärjestelmän suunnitteluun ja käyttöönottoon. Lisäksi työn pohjalta ehdotetaan valittavaksi valmis kaupallinen nopeusohjattu pumppu, jos se mahdollistaa halutun säätöperiaatteen käytön ja sen kustannukset eivät eroa huomattavasti hyllykomponenteista muodostettavan ratkaisun kustannuksista. Riippumatta kuitenkin implementoinnin toteutustavasta tähän toimintaperiaate-ehdotukseen kannattaa valita pumpun peruskomponenteiksi ulkoryntöinen hammasrataspumppu ja vaihtovirtasermoottori sen ohjaimineen johtuen muun muassa kokonaisuuden riittävästä dynaamisista ominaisuuksista ja mahdollisuudesta toteuttaa työssä ehdotettu toimintaperiaate.

Lisäksi siirtyminen esitettyyn toimintaperiaate-ehdotukseen näyttää kannattavalta verrattuna nykyiseen toteutukseen myös muun muassa energiatehokkuuden, järjestelmän yksinkertaistamisen ja moduloitavuuden kannalta. Suurin syy tähän on sähköinen ohjausjärjestelmä, joka mahdollistaa monipuolisemmat ja painelinjan kuristuksista riippumattomat säätömahdollisuudet. Lisäksi tuotekohtainen ohjaus voidaan toteuttaa ohjausalgoritmiin mekaanisen toteutuksen sijaan, mikä mahdollistaa esimerkiksi asetusarvojen muuttamisen koskematta järjestelmän komponentteihin. Nopeusohjatun pumpun ohjausjärjestelmä voidaan tarvittaessa myös kytkeä paremmin osaksi muuta automaatiojärjestelmää, mikä mahdollistaa lisää toiminallisuuksia, joihin nykyinen järjestelmä ei ole kyennyt.

Avainsanat: pyörimisnopeusohjattu, taajuusmuuttajaohjattu, hydraulipumppu, tela-alustainen kivenmurskain, Metso Outotec

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. LÄHTÖKOHDAT .....	3
2.1 Kivenmurskaus ja tela-alustaiset murskaimet.....	3
2.2 Lineaaristen toimintojen nykyinen toteutus.....	5
2.3 Järjestelmän sähköistämisen ajankohtaisuus.....	7
3. NOPEUSOHJATTU HYDRAULIPUMPPU JA SEN OHJAUS.....	9
3.1 Komponentit.....	11
3.1.1 Hydraulipumppu.....	12
3.1.2 Sähkömoottori.....	13
3.1.3 Moottorinohjain .....	14
3.2 Ohjausjärjestelmä .....	17
3.2.1 Ohjain ja ohjausalgoritmi.....	18
3.2.2 Mittausjärjestelmä .....	20
3.2.3 Tiedonsiirto .....	22
4. SOVELLUKSEN IMPLEMENTOINTI.....	24
4.1 Järjestelmän toimintaperiaatteen ehdotus.....	26
4.2 Ehdotuksen vertaaminen nykyiseen toteutukseen.....	29
5. JOHTOPÄÄTÖKSET .....	30
LÄHTEET .....	31

LIITE A: NOPEUSOHJATUN JÄRJESTELMÄN LUONNOS

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	alternating current, vaihtovirta
DC	direct current, tasavirta
LS	load sensing, kuormantunteva
LT	Lokotrack-tuoteperhe
UPS	uninterruptible power supply, keskeyttämätön virransyöttö
VSD	variable speed drive, pyörimisnopeusohjattu
$f$	taajuus
$n$	pyörimisnopeus
$n_s$	sähkömoottorin pyörimisnopeus lukuun ottamatta jättämää
$P$	teho
$\Delta p$	paine-ero
$q_v$	todellinen tilavuusvirta
$V_k$	kierrotilavuus
$\eta_{kok}$	kokonaishyötysuhde

# 1. JOHDANTO

Markkinoilla pärjääminen vaatii yleensä kilpailukykyisen tuotteen. Tuotteen kilpailukykyyn vaikuttavat muun muassa sen hinta sekä ominaisuudet. Tuotteen tulee myös täyttää erilaiset viranomaisvaatimukset, joista liikkuvien työkoneiden, kuten tela-alustaisten kivenmurskaimien, tapauksessa haasteita aiheuttavat erityisesti pakokaasujen päästövaatimuksia sekä ympäristölupia koskevien lainsäädäntöjen tiukentuminen. Erityisesti päästövaatimukset tulevat luultavasti kiristymään niin paljon, ettei niihin kyetä enää tulevaisuudessa vastaamaan nykyisellä dieselteknologialla. Tämän vuoksi muun muassa Metso Outotec selvittää jo nyt keinoja, joiden avulla Lokotrack (LT) -tuoteperheen tela-alustaisten kivenmurskainten käytönaikaiset päästöt saataisiin mitätöityä kokonaan.

Ratkaisuksi päästöjen nollaamiseen on ehdotettu dieselmoottorin korvaamista sähkökäyttöillä, mitä on tutkittu jo aiemmin esimerkiksi opinnäytetyössä LT120E:n sähköistäminen (Reponen 2019). Työssä käy ilmi, että tela-alustaisten kivenmurskainten sähkökäyttötoteutuksiin liittyy vielä huomattavasti haasteita, sillä muun muassa lineaarisen liikkeen toteuttaminen on vaikeaa. Vaikeus korostuu varsinkin kivenmurskainten tapauksessa, sillä niissä koneen komponentit altistuvat koko käyttöajan hiekkapölylle, tärinälle, kiven iskeytymille sekä vaihteleville käyttöolosuhteille eri vuodenaikoina. Johtoruuvimekanismin tiukkoine toleransseineen perustuvaan sähkömekaaniseen sylinteriin voi aiheutua mekaaninen vaurio varsinkin siihen iskeytyvistä suurista kivistä tai ajan myötä tiivisteiden läpäisemästä hiekkapölystä. Sähkömekaaniset sylinterit ovat myös huomattavasti kalliimpia verrattuna hydraulisiin sylintereihin, minkä vuoksi niiden asentaminen sarjatuotteisiin ei todennäköisesti vielä ole kannattavaa (Reponen 2019, s. 40).

Tässä työssä tutkitaan pyörimisnopeusohjattua hydraulipumppua (jatkossa nopeusohjattua pumppua) ratkaisuna lineaarisen liikkeen toteuttamisen ongelmiin yhdessä sähköisen tehonsiirron ja perinteisten hydraulisyntereiden kanssa. Ehdotetussa ideassa tarkoituksena olisi implementoida nopeusohjattu pumppu tiettyihin tuotteisiin, jotta nämä tuotteet voitaisiin tulevaisuudessa sähköistää täysin. Työn rajallisuuden vuoksi se tarkastelee nopeusohjatun pumpun soveltuvuutta vain LT106-malliseen koneeseen, mutta työssä tehdyt päätelmät ovat kuitenkin suurilta osin yleistettävissä kaikkiin Metso Outotecin Lokotrack-sarjan tela-alustaisiin kivenmurskaimiin. Tämä johtuu siitä, että niiden

lineaariset toiminnot on toteutettu lähes samalla tavalla. Työssä ei lisäksi lasketa tuotteen kustannusmuutoksia tai energiatehokkuuden muutosta, sillä näitä varten uusi järjestelmän tulisi suunnitella täysin ja kilpailuttaa, mikä ei mahdu työn laajuuteen.

Jotta LT106:n jäljelle jäävä hydraulijärjestelmä voidaan ylipäättänsä muuttaa käyttämään nopeusohjattua pumppua, tarvitaan aluksi LT120E:n moottorimoduulin tyylinen ratkaisu, sillä nykyisin LT106:ssa hydraulipumppuja pyöritetään suoraan dieselmoottorilla. LT120E:ssä dieselmoottorilla pyöritetään ensin generaattoria, joka puolestaan syöttää virtaa sähköisille voimansiirroille. Ratkaisussa sähkö voidaan ottaa myös sähköverkosta, jos sellainen on saatavilla, eikä dieselmoottoria tällöin tarvita. LT120E ei poikkea kuitenkaan muista LT-tuoteperheen kivenmurskaimista lineaarisilta toiminnoiltaan, vaan ne on siinäkin toteutettu hydraulisesti. LT120E:ssä ei kuitenkaan voida muuttaa hydraulipumpun pyörimisnopeutta, sillä sähkömoottorin pyörimisnopeudella ei ole säädintä, joten tilavuusvirran säätö on toteutettu käyttämällä säätötilavuuksisia pumppuja kuten muissakin LT-tuoteperheen tuotteissa.

Koska sähköenergian saamiseen on jo edellä mainitun kaltaisia kaupallisia ratkaisuja, työn ulkopuolelle jätetään kysymykset sähköverkon saatavuudesta työmailla, ja todetaan uudelle ratkaisulle olevan markkinoita, jos nykyisen LT120E:n kaltaisellekin ratkaisulle on. Väite pohjataan oletukseen siitä, ettei LT120E:tä osteta, jos sähköverkkoa ei ole saatavilla, sillä sen hinta on kalliimpi verrattuna sähköistämättömään LT120-malliin.

Työn on tarkoitus vastata kysymyksiin: kuinka lineaaristen toimintojen toteutus tulisi muuttumaan siirryttäessä käyttämään nopeusohjattua pumppua jo nyt ja millaiset komponentit nopeusohjattuun pumppuun kannattaisi valita? Tämän lisäksi työssä pohditaan, onko järkevämpää toteuttaa nopeusohjattu pumppu itse niin sanotuista hyllykomponenteista vai ostaa valmis ratkaisu. Työ on kirjallisuustutkielma, jossa nopeusohjatun pumpun teoria pohjataan oppikirjoihin, mutta myös aihealueen tieteellisillä julkaisija tutkitaan. Lisäksi työssä käytetään yrityksen omia dokumentteja, kuten hydraulikaaviota, nykyisen toteutuksen tutkimisessa sekä kaupallisten nopeusohjattujen pumppujen tuoteselosteita, jotta saadaan muodostettua käsitys mahdollisista säädön toteutustavoista.

Aluksi työssä tutustutaan hieman Metso Outotecin yrityksenä, kivenmurskaukseen toimialana sekä LT106:n lineaaristen toimintojen hydrauliseen toteutukseen ja tutkitaan järjestelmän muuttamisen ajankohtaisuutta. Tämän jälkeen luodaan perustavanlaatuinen käsitys nopeusohjatun pumpun toiminnallisuudesta ja sen tuomista hyödyistä sekä tutkitaan mahdollisia komponenttivalintoja. Lopuksi pohditaan nopeusohjatun pumpun sovelluskohtaisia komponenttivalintoja ja sitä käyttävän hydraulijärjestelmän implementoinnin järkevyyttä lineaarisille toiminoille verrattuna nykyisen kaltaiseen toteutukseen.

## 2. LÄHTÖKOHDAT

Metso Outotec on vuonna 2020 Metso Mineralsin ja Outotecin yhdistyessä muodostettu Helsingin pörssiin listautunut osakeyhtiö. Sulautumisen ulkopuolelle jätettiin Metson aiempi tytäryhtiö Metso Flow Control, jonka nykyinen nimi on Neles. Metso Outotecin liiketoiminta perustuu mineraalien, metallien ja kiviaineksien prosessointiin sekä erinäisten materiaalien kierrätykseen. Yhtiön koko liikevaihdon raportoidaan olevan 4,2 miljardia euroa, ja se työllistää 15 000 henkilöä 50 eri maassa. (Metso 2020a)

Vuonna 2019 Metso Outotecin liiketoiminnasta kiviaineksen prosessoinnin on arvioitu muodostaneen 26 % myynnistä perustuen Metso Mineralsin ja Outotecin myynteihin (Metso Outotec 2020a). Konsultointitoimiston Wood Mackenzien (2020) selvityksen mukaan kiviaineksen prosessointiin liittyvien tuotteiden maailmanlaajuiset markkinat vuonna 2019 olivat noin 5 miljardia euroa (katso Metso Outotec 2020a). Tästä nopeasti laskettaessa Metso Outotecilla on noin viidesosan markkinaosuus tällä toimialalla.

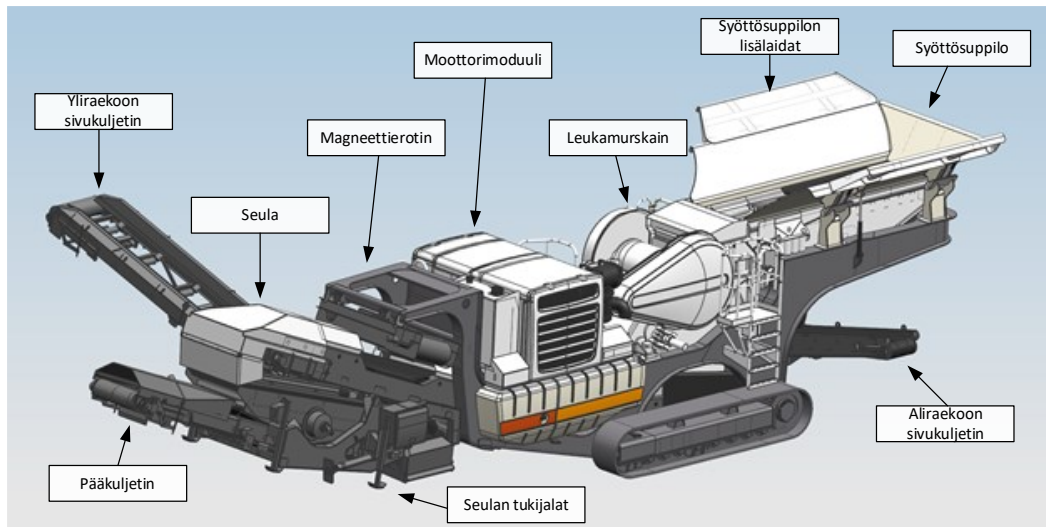
Kiviaineiden prosessointiin liittyviä tuotteita ovat muun muassa kivenmurskaimet, seulat ja erilaiset kuljettimet ja kuljetinratkaisut, joista kaikkia on saatavana niin kiinteäasenteisina kuin liikkuvina. Näistä kaikkiin markkinasegmentteihin Metso Outotecilla on tarjottavana sekä asiakasräätälöityjä ratkaisuja että vakiotuotteita. Näistä liikkuvat tela-alustaiset kivenmurskaimet valmistetaan osaksi Tampereella Lokomonkadulla, johon tuotteiden edessä oleva nimi Lokotrack viittaa (katso esimerkiksi Törmä 2016).

### 2.1 Kivenmurskaus ja tela-alustaiset murskaimet

Kivenmurskaus on prosessi, jossa kiveä pienennetään mekaanisesti. Metso Outotec tuottaa LT-tuoteperheeseensä tela-alustaisiin kivenmurskaimiin muutamaa päätyypin kivenmurskainyksikköä, joita ovat leuka- ja kartiomurskain sekä impaktori (Metso Outotec 2020b). Leukamurskaimessa epäkeskeiseen horisontaaliseen akseliin kiinnitetty leuka jauhaa kiveä toista pintaa vasten, kunnes raekoko on tarpeeksi pientä ja kiviaines menee läpi murskaimesta. Karamurskain taas perustuu epäkeskeisesti pyörivään vertikaaliseen kartioon. Kun kivi puristuu kartion alareunalla toista kiinteää pintaa vasten, se halkeaa. Impaktorissa kiviaineelle pyritään antamaan tarpeeksi liike-energiaa pyörivällä rummulla, jotta kiviaines halkeaisi iskeytyessään kulutuslevyjä vasten. Impaktorit voidaan jakaa vielä kahteen tyyppiin, joiden luokittelu perustuu niiden akselien asentoon. Akselin ollessa vaakatasossa puhutaan keskipakomurskaimesta ja pystytasossa iskupalkkimurskaimesta (Metso 2020b).

Kaikissa edellä mainituissa kivenmurskaimissa on mahdollista säätää lopputuotteen raekokoa, mutta tietyn päätyypin kivenmurskaimet soveltuvat toisia paremmin eri raekokojen saavuttamiseen. Jos lopputuotteen raekoko on huomattavasti syötettävän kiviaineksen raekokoa pienempää tai tarvitaan suurempaa tuottoa eli lopputuotetta aikayksikköä kohden, voidaan käyttää peräkkäisiä koneita. (Metso Outotec 2020b)

Joskus tuotteen raekoolla on myös alaraja. Tällöin käytetään seulaa, joka erottelee eri raekokoiset kivet toisistaan eri kuljettimille. LT-tuoteperheestä löytyykin tuotteita, kuten kuvan 1 LT106, joihin voidaan asentaa murskaimen lisäksi seula. Kivenmurskausyksikön ja mahdollisen seulan lisäksi tela-alustan päällä on paljon muitakin komponentteja, kuten moottorimoduuli ja useampi kuljetin. Näiden lisäksi laitoksille on saatavissa niiden mallista riippuva määrä lisävarusteita, kuten syöttösuppilon lisäraudat, magneettierotin sekä vasarayksikkö, jolla pienennetään kiviainesta sen tukkiessa syöttösuppilon (Metso 2020b).



**Kuva 1.** Tela-alustainen kivenmurskain LT106, jossa on osa tarjottavista lisävarusteista (Metso Outotec 2021).

Tela-alustaisen kivenmurskaimen suunnittelussa yksi suurimmista haasteista lieneekin tämän kaiken pakkaaminen mittoihin, joilla sen kuljettaminen onnistuu sulavasti. Maksimikuljetusmitat säätelee laki, mutta kuljetuksen sulavuuden takaamiseksi mitoista korkeutta säätelevät todennäköisesti tieverkon rajoitukset, kuten alitettavat sillat. Jotta kivenmurskain saadaan kuljetettua, löytyy useimmista malleista kääntötoimintoja. Esimerkiksi kuvan 1 LT106:n konfiguraatioissa pää- ja sivukuljettimet, seulan tukijalat ja syöttösuppilon lisäraudat saadaan käännettyä hydraulikan avulla kuljetusasentoon. Hydrauliikalla voidaan tarjota myös mahdollisuus valita lisävarusteena hydraulinen tehon ulosotto, jollainen nykyisestäkin LT106:sta löytyy (Metso Outotec 2020c). Tässä työssä tutkitaan



nopeusohjatun pumpun soveltuvuutta tuottamaan kaikille näille ja raekoon säätöön liittyville hydraulisyylintereille vaadittava tilavuusvirta. Kyseisistä hydraulisyylintereitä vaativista toiminnoista käytetään myöhemmin pelkästään nimitystä ”lineaariset toiminnot”.

## 2.2 Lineaaristen toimintojen nykyinen toteutus

Nykyisin LT106:n lineaariset toiminnot on toteutettu joidenkin hydraulimoottoreja tarvitsevien toimintojen kanssa saman pääventtiilistön ja pumpun taakse. Tämä on toteutettu siten, että pääventtiilistön solenoidiohjatulla venttiileillä ohjataan suoraan asetuksensäätöä ja kivenmurskaimen siirtämiseen liittyvät lineaariset kääntötoiminnot on kytketty käsiventtiileihin, jotka on kytketty yhden pääventtiilistön solenoidiohjatun venttiilin taakse. Jos edellä mainitut lineaariset toiminnot toteutettaisiin erillisellä hydraulijärjestelmällä, sen vaatima hydraulinen teho olisi noin 10 kW. (Metso Outotec 2020c)

Käsiventtiilistöt ovat kytketty sarjaan ja niitä käyttävät toimilaittepiirit eroavat toisistaan ainoastaan venttiilien ja niiden takana olevien hydraulisyylintereiden määrällä. Hydraulinen asetuksensäätö muodostuu taas kolmesta hydraulisyylinteristä, paineakusta ja sen latauspiiristä sekä oheiskomponenteista. Asetuksen säätöä ohjataan pääventtiilistön kahdella venttiilillä, joista ensimmäisellä ohjataan kahta asetusta säätävää hydraulisyylinteriä ja toisella asetuksen lukitsevan hydraulisyylinterin pluskammion painetta. Viimeisenä mainittuun piiriin on lisätty myös paineakku vähentämään murskaimesta hydraulijärjestelmään aiheutuvaa sykintää sekä kompensoimaan asetuksen lukitsevan sylinterin vuotoa. (Metso Outotec 2020c)

Yleisesti hydraulijärjestelmän hyötysuhteen parantamisen idea on tuottaa mahdollisimman vähän ylimääräistä hydraulista tehoa toteuttamaan halutut toiminnot. Koska hydraulinen teho  $P$  määritetään kaavalla

$$P = \Delta p \cdot q_v \cdot \eta_{kok}, \quad (1)$$

näkyvää vakiohydraulisen tehon tuottaminen järjestelmän komponenttien yli olevan paineeron  $\Delta p$  kasvuna, kun pumpun tuottamaan todellista tilavuusvirtaa  $q_v$  ei kuluteta (Kauranne et al. 2013, s.138–150). Tämän vuoksi ottamatta kantaa hydraulijärjestelmän kokonaishyötysuhteeseen  $\eta_{kok}$  voidaan energiatehokkuutta parantaa vähentämällä ylimääräisen tilavuusvirrantuottoa. LT106:n tapauksessa tilavuusvirran säätäminen on toteutettu säätötilavuuspumpuilla.

Koska pumpun tuottama tilavuusvirta eli tuotto määritetään ilman hyötysuhteita kaavalla

$$q_v = n \cdot V_k, \quad (2)$$

pienentämällä pumpun kierrostilavuutta  $V_k$  pienenee myös pumpun tuotto (Kauranne et al. 2013, s. 142). Koska LT106:ssa on käytössä rinnakkaisia hydraulijärjestelmiä, ja niitä käytetään dieselmoottorin akselilta jakovaihteen välityksellä, ei pumppujen pyörimisnopeutta  $n$  voida muuttaa vaikuttamatta muiden hydraulipiirien toimintaan.

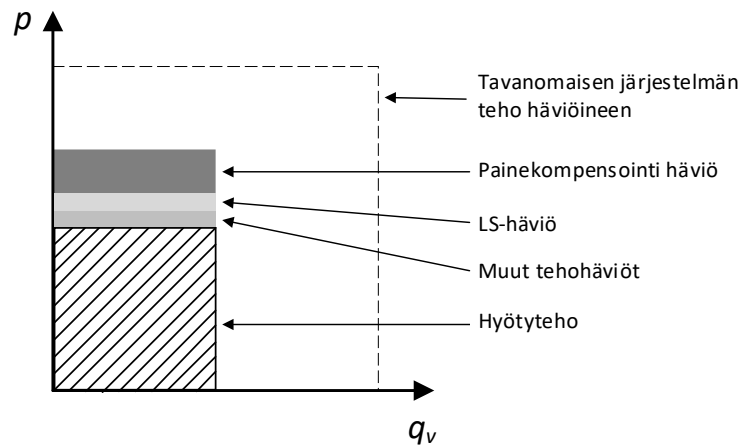
Säätökierrostilavuuksisia pumppuja voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Tällä hetkellä LT106-mallissa käytetään vinolevypumppuja (Metso Outotec 2020c). Vinolevypumpussa sylinteriryhmä pyörii käyttöakselin mukana, ja vinolevyssä kiinniolevat männät tuottavat tilavuusvirtaa iskunsa verran jokaisella kierroksella (Kauranne et al. 2013, s.170). Ratkaisussa kierrostilavuutta muutetaan muuttamalla vinolevyn kulmaa, jota ohjataan LT106:n tapauksessa piirikohtaisesti hydraulisella eli kuormantuntevalla (load sensing, LS) säätöperiaatteella (Metso Outotec 2020c). LS-säätöperiaatteen hyötysuhde on Paavilaisen (2009, s.66) mukaan muita säätötilavuuspumpun säätöperiaatteita parempi, mikä lienee syy sen käyttämiseen LT106:n hydraulikassa.

LS-säätö perustuu tilavuusvirran ja paineen säätöön siten, että paine-ero mittakuristimen yli pyritään pitämään vakiona (Paavilainen 2009, s. 66). LT106:n tapauksessa paine-ero on 21 bar ja se muodostetaan pumpun paine- ja ohjauspuolen välille rajoittamalla toimilaitteita ohjaavien suuntaventtiilien karojen aukeamaa ruuveilla. Toteutuksessa suuntaventtiilit on asennettu LS-venttiilistöön, joka välittää pumpulle sen toimilaitelinoissa esiintyvän suurimman paineen. LS-säätöä käytettäessä hydraulijärjestelmän häviötehoksi muodostuu muiden häviöiden, kuten putkistoissa, venttiileissä ja toimilaitteissa syntyvien häviöiden, lisäksi säätöön tarvittavissa kuristimissa muodostuva tehohäviö eli LS-häviö. (Metso Outotec 2020c)

Koska LS-säätö ei mahdollista useamman toimilaitteen käyttöä eri järjestelmäpaineilla ja niiden liikenopeuksien säätöä samaan aikaan, käytetään LT106:ssa vielä painekompensaattoreita jokaisen suuntaventtiilin edessä, jotta tilavuusvirta saadaan vakioitua toimilaitelinjakohtaisesti. Tällöin puhutaan esikompensoidusta LS-säädöstä, jonka painekompensointi huonontaa jälleen hyötysuhdetta, kun useampaa toimilaitetta käytetään samanaikaisesti. Lisäksi hydraulijärjestelmän säätötilavuuspumppuja ei myöskään saada täysin nollakulmalle, minkä vuoksi pumppu tuottaa hukkatehoa myös silloin, kun tietyn pumpun takana olevia toimilaitteita ei tarvita, mutta dieselmoottori on käynnissä. (Metso Outotec 2020c)

Esikompensoidun LS-ohjatun hydraulijärjestelmän hyötysuhdetta havainnollistetaan kuvassa 2 tilanteessa, jossa pumpulta vaadittu tuotto on pienempi kuin sen maksimituotto ja pumpulla käytetään useampaa toimilaitetta yhtä aikaa. Kuvaan on myös lisätty vertailun vuoksi samalla hyötyteholla niin sanotun tavanomaisen järjestelmän tilanne, missä

pumpulla on vakiotuotto ja järjestelmän painetta ei ole rajoitettu muuten kuin paineerausventtiilillä. Koska tällaisessa järjestelmässä pumpun maksimituotto on yleensä määritetty sen toimilaitteiden yhtäaikaisen käytön mukaan, tilanteessa, jossa kaikkea pumpun tilavuusvirtaa ei tarvita, pumpu tuottaa huomattavasti ylimääräistä tehoa.



**Kuva 2.** *LS-säädetyin järjestelmän hyötysuhde verrattuna tavanomaiseen järjestelmään. Kuvassa pinta-alasuhteet suuntaa antavia.*

Siitä huolimatta, että LT106:ssa käytetään LS-säädettyjä pumppuja, muodostuu prosessin aikana hukkathehoa niin paljon, että järjestelmää joudutaan jäähdyttämään aktiivisesti. Koska järjestelmä on toteutettu siten, että kaikki viisi eri pumpun takana olevaa osajärjestelmää jakavat saman hydraulinesesäiliön, on jäähdytyskin toteutettu yhteisellä jäähdyttimellä (Metso Outotec 2020c). LT106:n hydraulijärjestelmän voidaankin ajatella olevan tämän vuoksi enemmän keskitettympi kuin hajautetumpi.

### 2.3 Järjestelmän sähköistämisen ajankohtaisuus

Kuten työn alussa mainittiin, viranomaisten pakokaasupäästövaatimukset kiristyvät, minkä vuoksi suuntautuminen kohti ympäristöystävällisempiä ratkaisuja on vääjäämättöntä. Tällä hetkellä esimerkiksi Euroopan unionin alueella ei ole tiedossa seuraavia päästövaatimuksia tai niiden julkaisuajankohtaa (katso Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus 2016/1628 2016). Uusien päästövaatimuksien ennakointi lienee järkevää, sillä vertaamalla aikaisempien päästöluokkien voimaantumispäiviä niiden säätöpäiviin on selvää, ettei reagointiaikaa ilman ennakoitua juurikaan jää.

Tämä tulee ilmi tutkimalla muun muassa vuonna 1997 säädettyä työkoneita koskevaa Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviä 97/68/EY, jota myös tela-alustaiset kivenmurskaimet noudattavat. Direktiivissä työkoneiden vaaditaan noudattavan Stage-päästöluokkia, joista ensimmäisen vaiheen luokat astuivat voimaan vuonna 1998–1999 riippuen hieman moottorin koosta. Tämän jälkeen päästöluokkia on kiristetty vaiheittain, ja

tällä hetkellä uusin eli viides vaihe säädettiin Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksen 2016/1628 myötä vuonna 2016. Viimeisimmän asetuksen päästoluokat astuivat voimaan vuosina 2019–2020 riippuen jälleen moottorin koosta.

Päästoluokkien kiristyminen lienee yksi motivaatiotekijä täysin sähköisiin työkoneratkaisuihin siirtymisessä. Lineaarikäyttöjen lisäksi sähköistämiseen liittyvänä ongelmana on todennäköisesti nykyisten energianvarastointiratkaisuiden kehittymättömyys, sillä liikkuvien työkonoiden tapauksessa useinkin sähköverkkoon liittymisen vaatimat sähköjohtimet rajoittavat työkonoiden toimintaa. Tela-alustaisissa kivenmurskaimissa itse kiviaineksen murskaaminen tapahtuu paikoillaan, jolloin sähköverkkoon liittymisestä ei muodostu ongelmaa sellaisen ollessa saatavilla, mutta laitosta siirrettäessä johdottomuus olisi tarpeellista. Ideaalitulanteessa laitosta olisi mahdollisuus käyttää johdottomasti koko työpäivän ajan, jonka jälkeen se voitaisiin viedä ladattavaksi.

Nykyisin parhaiten liikkuviin ajoneuvoihin soveltuvien energianvarastointiratkaisuiden, kuten litiumioniakkujen, riittämättömyys johtuu pääsääntöisesti niiden huonosta energiatiheudesta, korkeasta hinnasta, suhteellisen vähäisestä latausyhteyden määrästä sekä pitkistä latausajoista (Koochi-Fayegh & Rosen 2020). Tähän on kuitenkin todennäköisesti tulossa muutos, sillä esimerkiksi Lin et al. (2017) esittelevät muutamia litiumanodiin perustuvia akkuteknologioita, joista esimerkiksi Li-air anodi-katodi -parin esitetään mahdollistavan nykyisiä litiumioniakkuja jopa 1,5 kertaa energiatihemmät akut, jotka lähestyvät näin ollen jopa bensan energiatihelyttä. Myös tutkimukset sähkökemiallisista kondensaattoreista näyttävät lupaavilta. Esimerkiksi Patrice ja Gogotsi (2008) esittelevät muutamia lupaavia ideoita ja ennustavatkin tulevien sukupolvien sähkökemiallisten kondensaattoreiden saavuttavan nykyisten litiumioniakkujen energiatiheden.

Todennäköisesti esimerkiksi näiden teknologioiden pohjalta saadaan jo lähitulevaisuudessa jalostettua toimivia ratkaisuja teollisuuden tarpeisiin. Koska sähköenergiaan liittyvien ongelmien ratkaisu on mahdollista, lineaarisen liikkeen toteuttamiseen on tärkeää kiinnittää huomiota jo nyt, jotta tulevaisuudessa markkinoille saataisiin viimeistään viranomaisvaatimusten voimaantumisen yhteydessä täysin päästötön kivenmurskain. Tässä työssä esitellyn ratkaisun yhteydessä saataisiin myös korvattua nykyisille LT-tuotepöytätehtäville, kuten LT106:lle, tyypillinen keskitetty järjestelmä hajautetulla järjestelmällä. Reposen (2019 s. 38–45) mukaan hajautettuun järjestelmään siirtyminen vähentäisi valmistuskustannuksia sekä hydraulijärjestelmän määrää toteutuksessa, mikä helpotaisi muun muassa ympäristölupien saamista työmaille. Muita hajautettuun järjestelmään siirtymisen hyötyjä yhdessä nopeusohjatun pumpun kanssa ovat hydraulijärjestelmän mahdollinen yksinkertaistuminen sekä toimilaitteiden hyötysuhteen parantuminen, kun siirrytään käyttämään pääsääntöisesti sähkömoottoreita hydraulimoottoreiden sijaan.

### 3. NOPEUSOHJATTU HYDRAULIPUMPPU JA SEN OHJAUS

Nopeusohjattu pumppu (engl. variable speed drive, VSD) on hydraulisille toimilaitteille tehoa tuottava säädettävä osajärjestelmä, jolla tässä työssä tarkoitetaan sähköisen voimansiirron (engl. electric drive) eli sähkömoottorin ja sen pyörimisnopeudenohjaimen (jatkossa moottorinohjaimen) sekä vakiokierrostilavuuksisen pumpun muodostamaa kokonaisuutta. Kaikista näistä komponenteista löytyy useita eri toteutusvaihtoehtoja, eikä käsite nopeusohjattu pumppu ole vakiintunut pitämään sisällään yhdenlaista komponenttikokonaisuutta. Nopeusohjauksen lisäksi pumppua voitaisiin samanaikaisesti ohjata myös sen kierrostilavuudella. Tässä työssä sitä ei kuitenkaan tutkita, sillä se ei yksinkertaista järjestelmää, ja sen tuomat hyödyt suhteessa sen hintaan eivät ole kannattavia LT-tuotteiden lineaarikäyttöjen tapauksessa.

Kustannuksien näkökulmasta keskeisin hyöty nopeusohjattuihin pumppuihin siirtymisessä onkin vakiokierrostilavuuksisen pumpun riittäminen, sillä se on halvempi komponentti verrattuna säätötilavuuspumppuun. Molemmilla ratkaisuilla pystytään kuitenkin säätämään pumpun tuottoa, minkä vuoksi siitä ei tarvitse tinkiä. Nopeusohjatut pumput ovat nousseet ajankohtaisiksi vasta nyt, sillä moottoreiden ja niiden ohjaimien hinnat ovat lähteneet tulemaan alaspäin viime vuosikymmenennellä. (Kauranne et al. 2013, s. 458–461)

Muita nopeusohjatun pumpun tuomia hyötyjä ovat hyötysuhteen parantuminen, mahdollisuus energian talteenottoon sekä melutason alentuminen johtuen mahdollisuudesta tiputtaa pumpun pyörimisnopeutta, kun pumpun maksimituottoa ei tarvita (Kauranne et al. 2013, s. 458–461). Koiton et al. (2018) mukaan varsinkin mahdollisuus energian talteenottoon vaikuttaa erittäin paljon hyötysuhteeseen, ja sykklisissä nostosovelluksissa siihen voidaan saavuttaa jopa 74 % parannus verrattuna tavanomaiseen hydraulijärjestelmään. Jos samassa sovelluskohteessa energian talteenottoa ei käytetä, mahdollistaa pelkkä nopeusohjattu pumppu 49 % parannuksen hyötysuhteeseen verrattuna jälleen tavanomaiseen hydraulijärjestelmään (Koitto et al. 2018).

Siitä huolimatta, että energian talteenotolla voidaan saavuttaa huomattavia parannuksia hyötysuhteeseen, ei sitä tässä työssä tarkemmin tutkita, sillä esimerkiksi Koiton et al. (2018) käyttämä hydraulinen energian talteenottopiiri toisi jälleen monimutkaisuutta ja todennäköisesti lisää kustannuksia ratkaisuun, kuten myös Bosch Rexrothin (2021) tar-

joama ratkaisu, jossa energiaa otetaan talteen sähköisessä muodossa. Tähän ratkaisuun tarvittaisiin sähköinen tehonsiirto, joka voisi toimia generaattorina, ja hydraulipumppu, joka taas voisi toimia moottorina (Bosch Rexroth 2019).

Tämän työn puitteissa ohjausjärjestelmää, jolla ohjataan hydraulijärjestelmää, kutsutaan ylemmän tason ohjausjärjestelmäksi. Alemmaksi ohjausjärjestelmäksi taas kutsutaan moottorihjaimen sisäistä ohjausjärjestelmää, jonka fyysistä toteutusta käsitellään kappaleessa 3.1.3. Ohjauksen teoriaa, joka on yleistettävissä myös alempaan ohjausjärjestelmään, käsitellään ylemmän ohjausjärjestelmän kanssa kappaleessa 3.2. Edellä mainitut erotellaan toisistaan, sillä käytettäessä valmistajien vakiokomponentteja sovelluskohtaisten sijaan, ei moottorihjaimin välttämättä sisällä mahdollisuutta toteuttaa ylemmän tason säätöä. Tällöin tarvitaan erillinen ohjausjärjestelmä, jolla syötetään asetusarvona moottorihjaimelle moottorilta haluttu pyörimisnopeus. Näitä ei tule sekoittaa yleisesti kirjallisuudessa käytettäviin automaation tasoihin, joissa tyypillisesti ylemmillä automaatiotasolla tarkoitetaan automaatiojärjestelmän osia, jotka eivät suoranaisesti ohjaa toimilaitteita, vaan esimerkiksi valvovat ja jalostavat tietoa automaatiojärjestelmän toiminnasta. Tässä työssä tutkitaan ainoastaan toimilaitteen ohjauksen automaatiota.

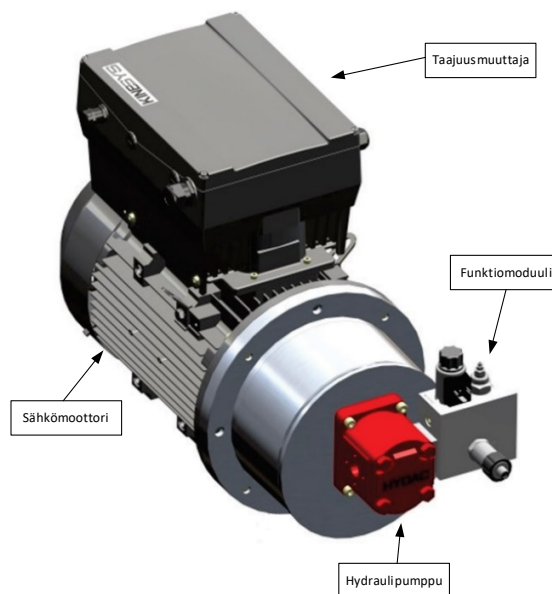
Nopeusohjattu pumppu ei kuitenkaan sovellu aivan kaikkiin hydraulijärjestelmiin, sillä sen askelvaste on suhteellisen huono verrattuna säätötilavuusohjattuihin pumppuihin. Toisin sanoen reagointiaika ohjauksen muutoksen vastaanottamisesta pumpun tuoton muuttumiseen on suhteellisen hidas. Edellä mainittu selittyy nopeusohjatun pumpun pyörivän massan inertiaasta. Kun sitä verrataan esimerkiksi säätötilavuusohjattuun pumpuun, nopeusohjatussa pumpussa inertia muodostuu sähkömoottorin pyörivän osan eli roottorin sekä pumpun pyörivien osien massasta. Sen sijaan säätötilavuusohjatussa pumpussa inertia muodostuu vain pumpun pyörivien osien massasta. Jos kummankaan tilavuusvirtasäädettävän järjestelmän dynaamiset ominaisuudet eivät riitä, täytyy käyttää venttiiliohjattuja järjestelmiä. Tällöin kuitenkin joudutaan luopumaan tilavuusvirtaohjauksen tuomasta hyötysuhteen parantumisesta. (Kauranne et al. 2013, s. 458–461)

Tutkimalla Shen et al. (2013) tekemän tutkimuksen eri järjestelmien vasteen kuvaajia huomataan, että nopeusohjatulla kiinteäkierroksisella pumpulla saavutettiin noin sekunnin nousuaika (10 %:sta 90 %:iin), kun taas venttiiliohjatulla järjestelmällä saavutettiin noin sekunnin kymmenesosan nousuaika. Kokeessa vasteet mitattiin ajasta, joka kestää, kun hydraulisylinteriä liikutetaan hydraulijärjestelmällä 10 senttimetriä. Ensimmäisessä tilanteessa taajuusmuuttajan annettiin ohjata hydraulipumpun pyörimisnopeutta PI-algoritmilla, ja koejärjestelyn venttiili oli lukittu auki-asentoon. Toisessa tilanteessa saman hydraulipumpun pyörimisnopeus oli asetettu maksimiarvoon, ja koejärjestelyn venttiiliä ohjattiin jälleen PI-algoritmilla. Kokeessa testattiin myös tilanteita, joissa käytettiin

niin nopeus- kuin venttiiliohjaustakin sekä vielä neljättä tilannetta, jossa käytettiin näiden lisäksi myös paineakkua. Neljännellä testitilanteella saavutettiin lähes yhtä hyvä dynamiikka kuin pelkällä venttiiliohjauksella, mutta tilanteessa muodostui hieman ylimääräistä tilavuusvirtaa, jota ei pelkässä nopeusohjauksessa muodostunut (Shen et al. 2013). Tässä testissä ei ollut mukana säätötilavuushjattua pumppua, mutta sen dynamiikka lie-nee asettuvan venttiiliohjatun ja nopeusohjatun väliin.

### 3.1 Komponentit

Hydraulipumpun sekä moottorin ja sen ohjaimen lisäksi kaupallisissa nopeusohjatuissa pumppuyksiköissä voi olla muitakin komponentteja. Esimerkiksi kuvassa 3 esitetyn Hydacin (2020) DVA-kitin mukana toimitetaan muutamasta vaihtoehdosta valittavissa oleva hydraulipumpun pyörimisnopeuden säätöön liittyvä hydraulilohko, jota valmistaja kutsuu funktiomoduliksi. Valittavia hydraulilohkoja ovat muun muassa paineakun latauslohko, joka pitää paineakun paineen tiettyjen arvojen sisällä, tai vakiosivuvirtauksen mahdollistava hydraulilohko (Hydac 2020).



**Kuva 3.** *Esimerkki pyörimisnopeusohjatusta pumpusta: Hydac (2020, muokattu) DVA-kit.*

Nopeusohjatun pumpun komponenteista sähkömoottorin ja hydraulipumpun tulee olla kytkettävissä mekaanisesti toisiinsa, mutta moottorin ohjaimen voi sijoittaa vapaammin. Esimerkiksi Hydacin (2020) ratkaisussa moottorinohjaimen saa moottorin päälle asennettavana 22 kW asti, minkä jälkeen se ei enää kokonsa puolesta enää mahdu siihen.

Peruskomponenttien eli hydraulipumpun, sähkömoottorin ja sen ohjaimen valinnassa tulee ottaa huomioon niiden toiminnan raja-arvot. Tyypillisesti sähkömoottorin jäähdytys

on toteutettu sen roottorin mukana pyörivällä siipipyörällä. Jos moottori pyörii liian hitaasti, se voi ylikuumentua. Tämä tuo tyypillisesti koko järjestelmälle pyörimisnopeuden alarajan. Hydac (2021) on ratkaissut tämän tarjoamalla erillistä tuuletinta, mutta moottorin jäähdytys voidaan toteuttaa myös esimerkiksi nestejäähdytyksellä (katso esimerkiksi Bosch Rexroth 2020). Pyörimisnopeuden ylärajan järjestelmälle tyypillisesti taas tuo hydraulipumpun mekaaninen rakenne. Valmistajan listaama hydraulipumpun maksimipyörimisnopeus voidaan kuitenkin ylittää hetkellisesti rikkomatta pumppua, niin kuin vastaavasti sähkömoottorin pyörimisnopeuden alaraja voidaan hetkellisesti alittaa. (Kauranne et al. 2013, s. 458–461).

### 3.1.1 Hydraulipumppu

Hydraulijärjestelmään soveltuvat pumput ovat nesteen syrjäytysperiaatteeseen perustuvia komponentteja, jotka muuttavat mekaanisen energian hydrostaattiseen muotoon. Pumput voidaan luokitella rakenteensa mukaan monella eri tavalla, mutta tyypillisimmin ne jaetaan hammaspyörä-, ruuvi-, siipi-, ja mäntäpumppuihin. Näistä mäntäpumpuilla päästään parhaimpiin hyötysuhteisiin ja järjestelmäpaineisiin, mutta ne ovat suhteellisen hintavia. Hammasrataspumput taas ovat halpoja, ja niillä päästää melkein yhtä hyvään hyötysuhteeseen. Toisaalta ne eivät mahdollista yhtä korkeaa järjestelmäpainetta, ja niiden rakenne ei mahdollista säädettävää kierrostilavuutta. Mäntäpumput taas aiheuttavat tuottoonsa sykintää, koska sylintereitä on suhteellisen vähän ja niiden työtahtien väliin jää niin sanottua kuollutta aikaa, jolloin painetta ei tuoteta. Tilanne on parempi hammasrataspumppujen kohdalla, mutta tarvittaessa vieläkin tasaisempaa tuottoa voidaan hyötysuhteen kustannuksella pumpuksi valita ruuvi- tai siipipumppu. Pumpun valintaan voi vaikuttaa myös melutaso. Tyypillisesti pumppu on sitä hiljaisempi, mitä jatkuvampi sen tuotto on, mutta myös pumpun rakenteella on merkitystä. (Kauranne et al. 2013, s. 137–172)

Sovellukset, joihin riittää vakiokierrostilavuuspumppu, toteutetaankin yleensä hammasrataspumpuilla. Hammasrataspumput voidaan jakaa rakenteessa mukaan vielä ulko- ja sisäryntöisiin, joista ulkoryntöiset kestävät tyypillisesti 14–21 MPa paine-eron pumpun paine- ja imuliitännän välillä ja sisäryntöiset 10–14 MPa paine-eron. Erikoisemmilla rakenneratkaisuilla molemmat pumput pystyvät kuitenkin noin 30 MPa järjestelmäpaineeseen. Lähtökohtaisesti näistä valitaan ulkoryntöinen pumppu sen halvemman hinnan vuoksi, mutta tarvittaessa pienempää melutasoa ja parempaa imukykyä, voidaan valita sisäryntöinen pumppu. Sisäryntöisen pumpun tuotto on ulkoryntöistä pumppua tasaisempaa. (Kauranne et al. 2013, s.151–155)



Tyypillisesti valmiiksi konfiguroituihin nopeusohjattuihin vakio kierrostilavuuspumppuratkaisuihin onkin valittavissa ulko- tai sisäryntöisen hammasrataspumppu (Bosch Rexroth 2019; Hydac 2021; Parker 2021). Näiden lisäksi Bosch Rexroth (2019) tarjoaa erilaisia aksiaalimäntäpumppuja ja Parker (2021) vinoakselipumppuja ja siipipumppuja. Kaikissa edellä mainituissa kaupallisissa ratkaisuissa oletuskokoonpanossa on kuitenkin ulkoryntöinen hammasrataspumppu ja muut pumppuvaihtoehdot ovat valittavissa erikseen.

### 3.1.2 Sähkömoottori

Sähkömoottori on sähköenergiaa mekaaniseksi energiaksi muuttava toimilaite. Cetinkuntin (2015) sekä Putran ja Tanin (2011) mukaan sähkömoottorit jaetaan käyttöenergian mukaan tasa- ja vaihtovirtamoottoreihin sekä askelmoottoreihin, joista tasavirtamoottoreita käytetään nimensä mukaisesti tasavirralla (engl. direct current, DC) ja vaihtovirtamoottoreita vaihtovirralla (engl. alternating current, AC). Askelmoottoreita taas käytetään sähköisillä impulsseilla, joista jokainen impulssi vastaa yhtä roottorin kierto-  
kulman diskreettiä muutosta (Cetinkunt 2015, s. 603; Putra & Tan 2011, s. 48–49).

Näistä askelmoottoreita ei käsitellä tässä työssä, sillä ne on tarkoitettu tässä työssä tutkittavaa sovellusta pienemmän kokoluokan sovelluksiin, joissa tarvitaan tarkkaa paikan-  
säätöä ja muun muassa momenttivaatimukset ovat huomattavasti pienempiä. Askelmoottoreiden käyttökohteita lienevät esimerkiksi pienet robotit ja 3D-tulostimet. Jatkossa sähkömoottoreista puhuttaessa tarkoitetaan sähkömoottoreita, jotka sopivat säädettyihin noin 10 kW järjestelmiin, millaiseksi LT106:n jäljelle jäävä hydraulijärjestelmä on avioitu (luku 2.2).

Sähkömoottoreista tasavirtamoottorit voidaan jakaa vielä tarkemmin harjallisiin ja harjattomiin moottoreihin, joista harjattomat moottorit käyttävät aina kestopagneetteja roottoreissa ja käämitystä staattorissa. Harjallisessa moottorissa roottori on aina käämitetty, mutta staattorissa käytetään yleensä kestopagneetteja. Siirryttäessä kuitenkin suuritehoisiin yli 15 kW moottoreihin kestopagneettien käyttö ei ole enää kustannustehokasta, minkä vuoksi niissä käytetään tyypillisesti sähkömagneetteja kestopagneettien sijaan. (Cetinkunt 2015, s. 640–641)

Vaihtovirtamoottorit taas voidaan jakaa tahti- ja epätahtimoottoreihin, joista käytetään myös nimityksiä synkroni- ja asynkronimoottori (Cetinkunt 2015, s. 659–666). Kun moottorin magneetikentän pyörimisnopeus eli tahtinopeus on täsmällisesti sama roottorin kanssa, on kyseessä tahtimoottori. Epätahtimoottorissa taas tahtinopeus on aina roottorin pyörimisnopeutta suurempi, ja nopeuksien erotusta kutsutaan jättämäksi. Jättämä tuokin moottorin säätämiseen haasteita, sillä esimerkiksi vakio-ohjauksella moottoria

kuormitettaessa sen pyörimisnopeus pienenee eli jättämä kasvaa. (Halme & Parikka 2005)

Moottorin ulostulosta tarvitaan yleensä informaatiota säädön toteuttamiseen, sillä esimerkiksi edellä mainittua epätahtimoottorin jättämää ei voida tietää, jos sähkömoottorin kuorma on tuntematon ja muuttuu satunnaisesti. Näin ollen moottorin pyörimisnopeus ei ole tiedossa, eikä sitä voida käyttää säätöön. Tämä on ratkaistu lisäämällä moottorin sisälle sen pyörimisnopeutta mittaava anturi, jonka mittauksen avulla moottorinohjain osaa lisätä sähkömoottorille syötettävän tehon määrää säilyttääkseen pyörimisnopeuden sen asetusarvossa. Tämän lisäksi jotkin moottorityypit, kuten harjattomat tasavirtamoottorit, tarvitsevat tiedon roottorin kiertokulmasta, koska staattorin käämitykselle syötettävää virtaa tulee muuttaa oikealla tavalla riippuen roottorin asennosta, jotta saadaan staattorin ja roottorin magneettikentät kohtisuoraan ja täten muodostettua pyörivä liike (Cetinkunt 2015, s. 640–641).

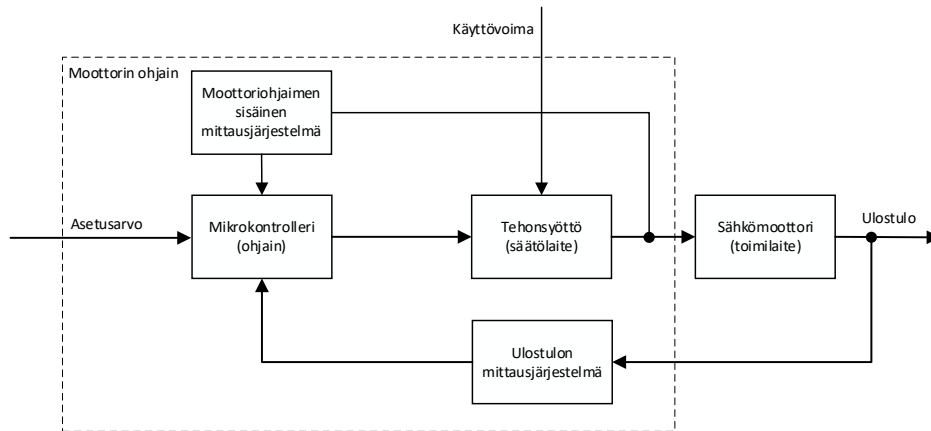
Moottoria, jonka sisälle on integroitu sen pyörimisnopeutta mittaava anturi ja jota ohjataan sitä voimakkaammin, mitä kauempana pyörimisnopeus on sen asetusarvosta, kutsutaankin servo-ohjatuksi moottoriksi tai lyhemmin servomoottoriksi. Aluksi kaikki servomoottorit olivat tasavirtamoottoreita, mutta tehoelektroniikan kehittyessä niitä on voitu toteuttaa myös vaihtovirralla. Nykyään kuitenkin servo-ohjauksen käsite on häilyvä varsinkin sähkömoottoreiden osalta ja käytännössä mitä tahansa moottoria, jota ohjataan perustuen sen pyörimisnopeuteen, voidaan kutsua servomoottoriksi. (Halme & Parikka 2005)

Kauranne et al. (2013) mukaan nopeusohjatuissa pumppuratkaisuissa käytetään yleisemmin taajuusmuuttajaohjattua epätahtimoottoria, servomuuttajalla ohjattua DC-servomoottoria tai servomuuttajalla ohjattua epätahtista AC-servomoottoria. Nämä kaikki mahdollistavat säätöön hyvän tarkkuuden, mutta DC-servomoottorilla ja sen ohjaimella saavutetaan edellä mainituista parhaimmat dynaamiset ominaisuudet (Kauranne et al. 2013, s. 458–461). Näistä sähköisistä voimansiirroista Hydac (2021) tarjoaa nopeusohjattuun pumppuunsa oikosulkumoottoria eli yhdenlaista epätahtista vaihtovirtamoottoria taajuusmuuttajalla ja Parker (2021) kaikkia kolmea edellä mainittua. Bosch Rexroth (2019) taas tarjoaa näistä epätahtisia vaihtovirtamoottoreita ja DC-servomoottoreita näiden ohjaimineen, mutta myös tahtista AC-servomoottoria sen servomuuttajalla.

### **3.1.3 Moottorinohjain**

Tutkimalla Cetinkuntin (2015, s. 640–680) esittämiä nykyisiä teollisuuden vaatimuksia täyttäviä erityyppisiä nopeusohjattuja sähköisiä voimansiirronratkaisuja voidaan erottaa

niistä yksinkertaistamalla viisi eri osakokonaisuutta, joita ovat ohjain, säätölaite, sähkömoottori, sisäinen mittausjärjestelmä ja ulkoinen mittausjärjestelmä. Kuvassa 4 on hahmotettu alkeislohkokaavioesitys sähköisen säädettävän voimansiirron periaatteesta.



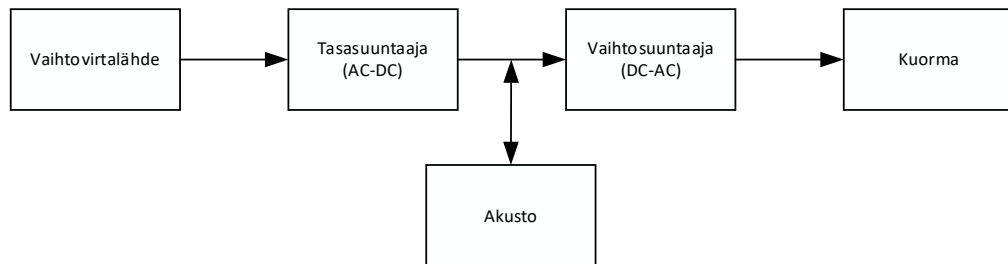
**Kuva 4.** Sähköisen voimansiirron alkeislohkokaavioesitys

Katsomalla kuvan 4 lohkokaaavioesitystä huomataan moottorinohjaimen olevan monimutkainen kokonaisuus, kun sähkömoottorin ulostulon älykästä säädettävyyttä tarvitaan perustuen esimerkiksi ulkoiseen väylältä tulevaan asetusarvoon. Järjestelmän älykkyys perustuu sen sisäisen ohjaimen, kuten ohjelmoitavan logiikan, tuottamaan ohjaukseen, joka muodostetaan asetusarvon sekä mittausjärjestelmien tuottaman datan perusteella. Lohkokaaavioesitykset voivat olla monen tasoisia, eikä moottorinohjaimen sisäistä ohjainta useinkaan esitetä erikseen, sillä nykypäivänä sen voidaan ajatella kuuluvan jo osaksi säätölaitetta. Näin on esimerkiksi toiminut Koitto et al. (2019).

Ohjattavasta moottorista riippuen mitattavia suureita ovat yleensä ulostulo sekä moottorinohjaimen sisäisesti tehonsyötöltä moottorille lähtevien johtimien virrat (Cetinkunt 2015, s. 640–680). Edellä mainittuja mittauksia ei kuitenkaan ole kaikissa säädettävissä sähköisen voimansiirron ratkaisuissa, sillä esimerkiksi perinteisen oikosulkumoottorin tapauksessa moottorin virtaa ei voida mitata (Halme & Parikka 2005). Jos käytössä on muu kuin servomoottori, ei moottorin ulostulostakaan ei ole tietoa. Säätöön tarvitaan kuitenkin aina jotain informaatiota järjestelmän toiminnasta ja sen tilasta, jos sen kuormituksella on dynamiikkaa ja säädön halutaan reagoivan siihen (Cetinkunt 2015, s. 63–67). Toisaalta kyseinen informaatio voi tulla asetusarvona moottorinohjaimelle ylemmän tason ohjausjärjestelmältä, jos mittauksia ei ole sähköisen voimansiirron sisäisesti.

Moottorinohjaimessa on itse ohjaimen lisäksi myös säätölaite eli tehonsyöttö. Tehonsyötön perustoiminnallisuus perustuu tehoelektronikan (engl. power electronics) komponentteihin, joilla on tarkoitus muokata sähköistä energiaa sitä käyttävälle toimilaitteelle

sellaiseen muotoon, että sen toiminta on haluttua ja energiatehokasta. Mahdollisia sähköenergian muunnoksia ovat vaihto- ja tasavirran välillä tehtävät muunnokset sekä sähköenergian ominaisuuksien, kuten jännitteen ja virran, muutokset. Tasavirrasta poiketen vaihtovirralla jännitteen ja virran säädettäviä ominaisuuksia on yhden sijasta kaksi, ja ne ovat taajuus ja amplitudi. Tehonsyöttö voi sisältää useita eri vaiheita, joissa sähkötehoa ja sen ominaisuuksia muutetaan. Esimerkiksi keskeytymätön virransyöttö (engl. uninterruptible power supply, UPS) on tehonsyötön yksi sovellus, jonka toiminta on esitetty kuvassa 5. (Putra & Tan 2011, s. 45–85)



**Kuva 5.** Keskeytymätön virransyöttö (Putra & Tan 2011 s.73, muokattu)

Keskeytymättömässä virransyötössä vaihtovirtalähteen, kuten sähköverkon, sähkövirta muutetaan tasavirraksi tasasuuntaajalla, jonka jälkeen se vaihtosuunnataan uudelleen halutun taajuiseksi vaihtovirraksi toimilaitteelle, kuten asynkroniselle moottorille. Koska sen pyörimisnopeus  $n_s$  ilman jättämää määritetään kaavalla

$$n_s = \frac{2 \cdot f \cdot 60}{\text{napaluku}}, \quad (3)$$

muuttamalla vaihtosuuntaajan ulostulon taajuutta  $f$  saadaan muutettua pyörimisnopeutta (ABB 2001).

Koska keskeytymättömään virransyöttöjärjestelmään on lisätty myös akusto, mahdollistaa se nimensä mukaisesti virransyötön myös tilanteissa, joissa vaihtovirtalähde ei ole saatavilla. Tasasuuntaajan ulostulo perustuu todennäköisesti akustolle ominaiseen latausjännitteen ja virran kontrollointiin, sillä akuston lataussykliin kesto riippuu oikeanlaisesta latauksen hallinnasta (Dhameja 2001, s. 1–21). Koska kivenmurskainten ja muiden useampia sähköisiä voimansiirtoja tarvitsevien laitteiden tapauksessa kaikille koneille ei liene järkevää asentaa omia tasasuuntaajia eikä akustoja, kannattaa nämä toteuttaa keskitetysti. Tällöin vaihtosähkömoottorin tapauksessa ohjaimeksi riittää pelkkä ohjain, jonka tehonsyöttö perustuu vaihtosuuntaajaan, kun taas tasavirtamoottoreiden tapauksessa moottorinohjaimen tarvitaan DC-DC muunnokseen perustuva tehonsyöttö.

Tässä työssä moottorinohjaimia ei erotella tarkemmin toisistaan, vaan todetaan hyvän moottorinohjaimen mahdollistavan moottorin ulostulon säädettävyyden siten, ettei se itse kuluta huomattavasti energiaa. Oikea moottorinohjain valitaan ohjattavan moottorin tyyppin ja sähköiselle voimansiirrolle tulevaan energianmuotoon mukaan. Yksittäiset moottorinohjainratkaisut eroavat myös valmistajakohtaisesti toisistaan, ja ne on toteutettu yleisimmin integroituina piireinä. Tämän lisäksi valmistajat ovat voineet integroida moottorinohjaimen myös sovelluskohtaisen ylemmän tason ohjausjärjestelmän.

Nopeusohjattujen pumppujen tapauksessa näin ovat esimerkiksi toimineen Bosch Rexroth (2019), Hydac (2021) ja Parker (2021). Tutkimalla näistä tarkemmin Hydacin (2021) ratkaisua huomataan, että moottorinohjaimella on mahdollistettu suoraan pumpun tuoton säätäminen perustuen joko neljään digitaaliseen tai kahteen analogiseen liitäntään kytkettävien antureiden tuottaman mittauksen perusteella. Jos säädön toteuttamiseen riittävät kyseiset rajapinnat, ei erillistä ylemmän tason ohjainta tarvita (Hydac 2021).

## 3.2 Ohjausjärjestelmä

Kuten aikaisemmin on tullut esille, toimilaitteen ohjaukseen tarvitaan informaatiota sen toteumasta, kun kuormalla on satunnaista dynamiikkaa esimerkiksi nopeusohjatun pumpun tapauksessa. Ohjausjärjestelmiä, joiden toimilaitteiden ohjaukseen käytetään mittauksia, kutsutaan takaisinkytketyiksi järjestelmiksi (Cetinkunt 2015, s. 1–16). Ne voidaan toteuttaa niin analogisina, digitaalisina kuin kummankinlaisia komponentteja yhdistämällä, jolloin eri tyyppin komponenttien välille kuitenkin tarvitaan signaalinmuuntimia (Ibrahim 2006).

Tässä työssä tutkitaan sellaisia takaisinkytkettyjä ohjausjärjestelmiä, joiden ohjain on toteutettu digitaalisena (jatkossa digitaalinen ohjausjärjestelmä) eli hyväksikäyttäen mikroprosessoria, joka koostuu suorittimesta ja muista oheiskomponenteista, kuten muisteista (Ibrahim 2006). Cetinkuntin (2015, s. 45) mukaan digitaalinen ohjausjärjestelmä mahdollistaa myös enemmän säätömahdollisuuksia sen laskentakyvyn ja logiikan vuoksi ja ohjausalgoritmien muuttamisen useinkaan ilman komponenttien vaihtamista toisin kuin analogisissa säätöjärjestelmissä. Digitaaliset järjestelmät todennäköisesti vievät tämän vuoksi myös vähemmän tilaa, koska releiden ja muiden analogisen järjestelmän vaatimien yksinkertaisten komponenttien toiminnot voidaan toteuttaa ohjelmoimalla.

Bosch Rexrothin (2019), Hydacin (2021) ja Parkerin (2021) nopeusohjattujen pumppujen ohjausjärjestelmien digitaalisen tai analogiapohjaisuudesta ei ole sanottu mitään, mutta niiden voidaan ajatella olevan digitaalisia suurella todennäköisyydellä, koska ne tukevat

digitaalisille ohjausjärjestelmille tyypillisiä piirteitä, kuten väyläliitäntää ja digitaalisia sisääntuloja, ja mahdollistavat erilaisia säätöperusteita. Koska edellä mainitut valmistajat eivät todennäköisesti käytä analogisia ohjausjärjestelmiä, on järkevää jättää ne tämän työn osalta käsittelemättä. Koska nopeusohjatun pumpun toteuttamisessa niin sanoituista hyllykomponenteista suurin haaste lienee ohjausjärjestelmän implementointi, tutkitaan seuraavissa alaluvuissa tarkemmin teoriaa digitaalisen ohjauksen ja siihen tarvittavien mittausten toteuttamisesta sekä yleisesti kaksisuuntaisesta tiedonsiirrosta eri järjestelmien osien välillä. Teorian tutkimisen jälkeen etsitään tietoa siitä, miten nopeusohjattujen pumppuratkaisuiden valmistajat ovat nämä toteuttaneet.

### 3.2.1 Ohjain ja ohjausalgoritmi

Ibrahimin (2006) mukaan digitaalisissa ohjausjärjestelmissä mittauksen eli toiminnan toteuttamisen lisäksi mikroprosessorin muistiin on tallennettu asetusarvo eli tieto siitä, mikä järjestelmän ulostulo tulisi olla. Analogisille järjestelmille tyypillisesti digitaalisenkin järjestelmän asetusarvo voi tulla myös järjestelmän ulkopuolelta, jos sellaiselle on tarvetta. Kun asetusarvo ja mittaus eroavat toisistaan, muodostaa ohjain uuden ohjauksen ja näin ollen pyrkii pitämään järjestelmän sen asetusarvossa (Ibrahim 2006). Tarkemmin ohjaus muodostetaan digitaalisessa ohjausjärjestelmässä ohjausalgoritmilla eli suorittimella pyöritettävällä ohjelmalla, joka määrittää täsmällisesti ohjaimen reagoinnin ulostulon mittauksen poikkeamaan sen asetusarvosta (Cetinkunt 2015, s.45). Edellä mainitun vuoksi se onkin sovelluskohtainen ja sen tekoon vaikuttavat esimerkiksi nopeusohjauksen tapauksessa komponenttien dynaamiset ominaisuudet. Ohjausalgoritmi tehdään järjestelmän säätöperusteen, kuten hydraulijärjestelmissä paine-eron, mukaan. Säätöperuste taas valitaan järjestelmän toiminnan vaatimusten mukaan, ja säätöön käytettäviä suureita ja niiden mittauksia voi olla useampi.

Kaupallisten nopeusohjatuiden pumppujen valmistajista Bosch Rexroth (2019), Hydac (2021) ja Parker (2021) tarjoavat kaikki paine- ja tilavuusvirtapohjaisia säätöperusteita sekä näiden yhdistelmiä, kuten myös paineakun varaukseen pohjautuvia säätöperusteita. Näillä säätöperiaatteilla voidaan toteuttaa esimerkiksi säätötilavuuspumpuille tyypillisesti käytetty säätöperiaate eli LS-säätö. Hydac (2021) ja Parker (2021) tarjoavat lisäksi edellä mainittuihin säätöperusteisiin lisättäväksi vakiosivuvirtausta, jota voidaan esimerkiksi käyttää hydrauliohjauksen suodattamiseen tai jäädyttämiseen. Kuten aikaisemmin mainittiin, Hydac (2021) on toteuttanut tämän pienellä ratkaisun mukana toimitettavalla hydraulilohkolla. Parker (2021) taas ei ole maininnut vakiosivuvirtauksen mahdollistavasta säätöperiaatteen toteutuksesta mitään, mutta se lienee olevan toteutettu samalla tavalla kuin Hydacin (2021) ratkaisu.

Kun säätöperuste on valittu, voidaan tietty ohjausalgoritmin toteuttaa todennäköisesti käyttäen useampaa eri toteutusperiaatetta. Ohjausalgoritmin toteutus voikin perustua järjestelmän dynamiikkaa kuvaavaan matemaattiseen malliin, joka luodaan ohjauksen muutoksen ja ulostulon muutoksen välille, mutta se voidaan toteuttaa myös ilman sitä. Ohjausalgoritmeja, jotka eivät perustu tällaiseen malliin, on useita, mutta niistä tyypillisimpiä ovat logiikkaan pohjautuvat algoritmit sekä PID-algoritmi. Uusissa ohjausjärjestelmissä algoritmi voidaan muodostaa myös esimerkiksi käyttämällä tekoälyä (Nof 2009, s. 65).

Parhaimmassa tapauksessa tarkka matemaattinen malli voidaan muodostaa suoraan fysiikan lakien avulla. Useimmissa ohjausjärjestelmien tapauksessa fysiikan lakien pohjalta muodostetun mallin vaatimat parametrit eivät ole kuitenkaan täysin tiedossa, jolloin mallin tuntemattomat termit joudutaan etsimään identifioinnin keinoin. Ongelmallisin tilanne on silloin, kun ohjausjärjestelmään vaikuttaa lisäksi jokin ulkopuolinen tuntematon mekanismi eli häiriö, jonka huomiotta jättäminen tekisi järjestelmän toiminnasta epätoivottua. Viimeisenä mainitussa tilanteessa malliin yritetään usein lisätä geneerisiä toimivaksi todettuja lineaarisia osamalleja, joiden parametrejä yritetään jälleen etsiä identifioinnin keinoin. Jos näin syntyneet lineaariset osamallit eivät kuvasta häiriötä riittävällä tarkkuudella, joudutaan siirtymään käyttämään näiden osalta epälineaarisia osamalleja, joiden muodostaminen on huomattavasti hankalampaa ja käytössä oleva menetelmät rajalliset. (Keesman 2011)

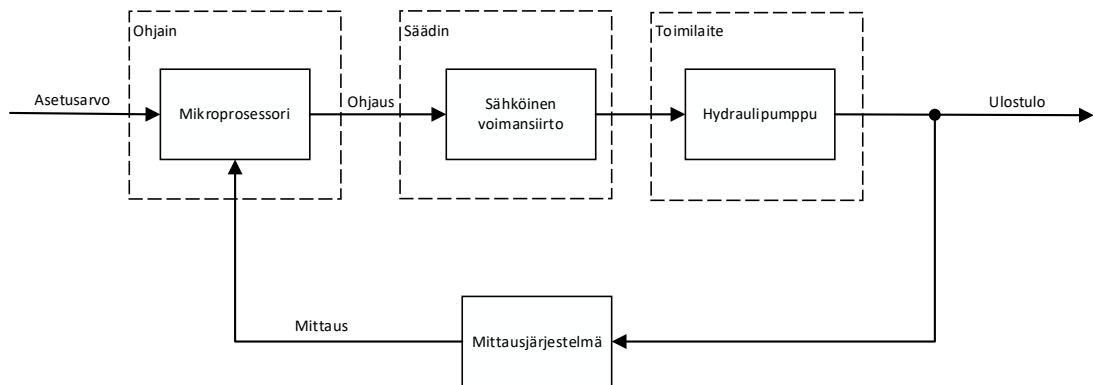
Matemaattisten mallien rakentaminen lieneekin työläs prosessi puhumattakaan tekoälyn käyttämisestä. Logiikalla taas voidaan toteuttaa ainoastaan kaksiasentoisia ohjauksia, joissa toimilaite laitetaan joko päälle tai pois päältä, minkä vuoksi niiden soveltuvuus varsinkin nopeus- tai liikeohjaukseen on rajallinen (Cetinkunt 2015, s. 45). PID-algoritmi ei vaadi mallia ja mahdollistaa muitakin ohjauksia kuin päälle tai pois, minkä lisäksi se voidaan toteuttaa sekä analogisena että digitaalisena. Todennäköisesti näiden syiden takia PID-säätimiä käytetäänkin 90 prosenttisesti takaisinkytketyissä säätöjärjestelmissä Cetinkunt (2015, s. 45).

Putran ja Tanin (2011) mukaan PID-algoritmin P-osa eli proportionaalinen osa toteuttaa mittauksen ja asetusarvon eron vakiovahvistuksen, I-osa eli integroiva osa taas hienosäädön sekä vakiovirheen poistamisen ja D-osa eli derivoiva osa mittauksen ja asetusarvon eron muutoksen nopeuteen reagoinnin. Edellä mainitut algoritmin osat vaativat niiden parametrien valitsemista, mitä kutsutaan virittämiseksi. Parametreille ei ole olemassa tarkkoja arvoja, ja virittämiseen on useita menetelmiä, joista tunnetuin lienee Ziegler–Nichols -menetelmä (Putra & Tan 2011, s.116–126). Tutkimalla nopeusohjattujen pumppujen ohjausalgoritmien toteutusperusteita Bosch Rexroth (2019) mainostaa,

ettei heidän ratkaisunsa perustu PID-säätimeen, vaan epälineaariseen malliin. Hydacin (2021) ja Parkerin (2021) tuotteiden algoritmien toteutusperiaatteista taas ei ole mitään mainintaa.

Normaalin toiminnan ohjaamisen lisäksi ohjausalgoritmiin toteutetaan yleensä muitakin toimintoja, kuten toimilaitteiden päälle ja pois -toimintoja sekä huolto- ja varotoimintoja. Tyypillisesti tällaiset toiminnot on toteutettu logiikalla, ja niiden aktivointi tapahtuu anturidatan, painonappien tai rajakytkimien kaltaisten toimintojen avulla, mutta ne voivat perustua myös esimerkiksi ajastimiin. Nopeusohjatun pumpun ohjauksen kannalta tällaisia toiminnallisuusia voisi olla esimerkiksi pumpun antaman hydraulitehon rajoittaminen järjestelmän ollessa kylmä tai pumpun pysäyttäminen sähkömoottorin ylikuumentuessa, jollainen muun muassa Hydacin (2021) ohjausalgoritmiin on lisätty.

Kuvassa 6 on hahmoteltu digitaalinen ohjausjärjestelmä, joka koostuu mittausjärjestelmästä, ohjaimesta, säätimestä ja toimilaitteista, nopeusohjatun pumpun tapauksessa. Nopeusohjatun pumpun tapauksessa säätimen roolissa on sähköinen voimansiirto kokonaisuudessaan ja toimilaitteena pelkästään hydraulipumppu. Ajattelutavasta riippuen jako voidaan tehdä myös toisin.



**Kuva 6.** Lohkokaavioesitys nopeusohjatusta pumpusta

Kuvassa 6 takaisinkytkentä on otettu hydraulipumpun ulostulosta eli pumpun tuotosta, mutta se voidaan ottaa myös myöhemmässä vaiheesta, kuten komponentin yliolevasta paine-erosta tai lineaarikäyttöjen tapauksessa sylintereiden liikenopeuksista, jos ohjaus halutaan toteuttaa niiden mukaan. Yleisesti säätöperiaate voidaankin toteuttaa käyttäen mitä tahansa suuretta, joka on mitattavissa antureilla ja jonka yhteys säädettävään suureen tiedetään tai voidaan selvittää.

### 3.2.2 Mittausjärjestelmä

Mittausjärjestelmä koostuu yleisesti anturista ja sen tuottaman signaalin yhteensopivaksi ohjaimelle muokkaavista komponenteista, joita ovat hieman anturista riippuen esimerk-



kisi vahvistin ja analogisesta signaalista digitaaliseksi signaaliksi muuntava signaali-muunnin eli A/D-muunnin (Regtien et al. 2004, s. 8–11). Mittausjärjestelmien määrä ohjausjärjestelmässä riippuu valitusta säätöperusteesta. Yleisesti säätöön käytettävät mitaukset pyritään ottamaan suoraan säädettävästä suureesta, jos kyseinen suure on mitattavissa ja mittauksiin tarvittavien antureiden hinnat ja teknologian rajoitukset eivät estä niiden käyttöä. Jos edellä mainittuja rajoituksia esiintyy, voidaan säätöön käyttää epäsuoria mittauksia. Tällöin mitataan joitain muita suuretta, joiden riippuvuus säätöön tarvittavasta suureesta tiedetään.

Yleisesti mittausjärjestelmän tulisi pystyä tuottamaan tarpeeksi hyvä mittaussovelluskohteelle, mikä on yksi ehto säädön stabiilisuudelle. Hyvän mittausjärjestelmän ominaisuuksia luotettavan datan tuottamisen näkökulmasta ovat esimerkiksi:

- suuri herkkyys ja pieni vaste eli kyky reagoida pieniin muutoksiin nopeasti,
- laaja mittaussalue,
- pieni häiriötaso mittaussignaalin ja
- suuri tarkkuus, johon vaikuttaa muun muassa hystereesin pienuus sekä se, ettei ulostulo vaella (engl. drift).

Näiden lisäksi mittausjärjestelmän tulee olla tarpeeksi halpa, kestää sovelluskohteen olosuhteita sekä olla tarpeeksi pitkäikäinen. (Regtien et al. 2004, s. 310–317)

Joskus ohjausjärjestelmissä käytetään myös useampaa takaisinkytkentää eli toteutetaan mittauksia eri energiamuutoksien väliltä, jos ohjausjärjestelmälle vaadittaviin vaatimuksiin, kuten tarkkuusvaatimuksiin sekä dynaamisiin ominaisuuksiin, ei päästä vain yhdellä takaisinkytkennällä. Tilanne lienee tällainen, kun järjestelmässä on useita peräkkäisiä energianmuunnoksia tai ohjattava prosessi tai toiminta sisältää pitkiä aikavakioita sisältäviä osia, jotka kasvattavat koko ohjausjärjestelmän vastetta eli aikaa säädön toteutumisesta sen havaitsemiseen ulostulossa. Tämän vuoksi esimerkiksi sähköisen tehonsiirron sisällä voi olla takaisinkytkentöjä ylemmän tason ohjausjärjestelmän takaisinkytkentöjen lisäksi.

Nopeusohjatun pumpun tapauksessa sähköisen voimansiirron sisäisiä takaisinkytkentöjä, kuten servo-ohjausta, ei välttämättä tarvita, sillä pumpun säätö voidaan toteuttaa ilman tietoa sähkömoottorin tarkasta pyörimisnopeudesta esimerkiksi sähköisesti toteutetulla LS-säädöllä. Sähköinen LS-säätö perustuu samaan periaatteeseen kuin tavanomainenkin hydraulisesti toteutettu LS-säätö, jossa mittakuristaminen yli halutaan säilyttää vakio paine-ero. Nyt paine-ero kuitenkin mitataan kahdella anturilla, joiden erotuksen

pohjalta muodostetaan moottorinohjaimelle uusi asetusarvo, eli joko lisätään tai vähennetään sähkömoottorille syötätettävän tehon määrää. Tämä lisää säätöön kuitenkin viivettä ja näin ollen huonontaa entisestään nopeusohjatun pumpun dynaamisia ominaisuuksia verrattuna esimerkiksi tilavuusohjattuihin pumppuihin.

Dynaamisten ominaisuuksien lisäksi viive voi vaikuttaa ohjausjärjestelmän säädön stabiiliuteen eli kykyyn pitää järjestelmän toiminta halutunlaisena ja mahdollisimman lähellä asetusarvoa. Lähtökohtaisesti kaikki ohjausjärjestelmään lisättävät komponentit lisäävät viivettä entisestään, mutta digitaalisten järjestelmien kohdalla viivettä lisäävät entisestään useassa välissä tarvittavat signaalien muunnokset analogisten ja digitaalisten signaalien välillä. Signaalimuuntimissa varsinkin niiden näytteenottotaajuudella on suuri merkitys viiveen suuruuteen. Tämän lisäksi tapahtuu Nyquistin taajuutta suurempien signaalien laskostuminen pienemmille taajuuksille, jos näytteenottotaajuus on Nyquistin taajuutta pienempi, jolloin muuntimen ulostulo ei ole halutunlainen, ja se todennäköisesti tekee koko ohjausjärjestelmästä epästabiilin. Signaalimuuntimien näytteenottotaajuuden lisäksi viivettä voidaan pienentää esimerkiksi nostamalla suorittimen kellotaajuutta ja minimoimalla tiedonsiirron viivettä. (Cetinkunt 2015, s. 48–63)

### 3.2.3 Tiedonsiirto

Jos ohjausjärjestelmä täyttää suurellakin viiveellä siltä vaaditut dynaamiset ominaisuudet, ei suuri viive itsessään vie järjestelmän stabiiliutta. Suurempi vaikutus on viiveen suuruuden satunnaisella vaihtelulla, mitä aiheuttaa tyypillisimmin digitaalinen tiedonsiirto. Siitä huolimatta, että analogisessa tiedonsiirrossa viiveen satunnaisvaihtelu ei ole niin suuri ongelma, niiden pohjalta toteutetaan enää harvoin kokonaisia automaatiojärjestelmiä. Tämä johtuu lähinnä siitä, että analogiset tiedonsiirtojärjestelmät vaativat huomattavasti enemmän kaapelointia verrattuna digitaalisiin vastaaviin, joissa tyypillisesti riittää vain yksi kaapeli laitetta kohden. Digitaalisessa toimilaitteiden kaksisuuntaisessa tiedonsiirrossa viiveen minimoimisen ja sen vakiona pitämiseen käytetään yleensä erilaisia ratkaisuja kuin tietotekniikan tiedonsiirrossa. Näitä ratkaisuja, jotka on tehty ohjausjärjestelmän tarpeisiin, kutsutaan kenttäväyliksi. On olemassa useita eri protokollia noudattavia kenttäväyliä, joista oikea valitaan perustuen sovelluksen tarpeisiin. Protokollista tyypillisimmin liikkuvissa ajoneuvoissa käytetään CAN-väylää. (Nof 2009, 237–247)

Tietotekniikan tapauksessa tiedonsiirtoa on optimoitu enemmän suurten datamäärien liikkuttamiseen parhaalla mahdollisella vasteajalla eli viiveellä, kun taas automaation tiedonsiirtoratkaisut pyrkivät reaaliaikaisuuteen, ja niillä siirrettävä datan määrä on suhteellisesti pienempi. Automaation tiedonsiirtoratkaisuiden hinnat ovat kuitenkin huomattavasti kalliimpia kuin tietotekniikan ratkaisuiden, koska tietotekniikan tiedonsiirtoratkaisut

olevat niin sanottuja hyllykomponentteja. Tämän lisäksi niiden saatavuus on yleensä automaation vastaavia parempi. Edellä mainitut tekijät ovat olleet pääsääntöisesti syynä sille, että automaation tiedonsiirtoratkaisut ovat kehittyneet lähemmäksi tietotekniikan internet-pohjaisia ratkaisuja. (Nof 2009, 237–247)

Nofin (2019) mukaan nykyisin markkinoilla onkin ratkaisuja, joissa ylemmän tason ohjausjärjestelmä voidaan kytkeä osaksi koko automaatiojärjestelmää käyttäen hyväksi automaation ethernet-pohjaisia tiedonsiirtoprotokollia, kuten ProfiNET ja EtherCAT. Siitä huolimatta, että nämä tiedonsiirtotavat voivat jakaa tietotekniikan internet-pohjaisille ratkaisuille tyypilliset fyysiset rajapinnat sekä samat kaapeloinnit, on protokollissa kuitenkin eroja, minkä vuoksi automaation laitteet eivät keskustele suoraan tietotekniikan laitteiden kanssa (Nof 2009, 237–247). Myös tämän työn kannalta alemman ja ylemmän tason ohjausjärjestelmien välille on kehitetty joitain ethernet-pohjaisia kenttäväyliä, kuten toimilaitteen liikkeen ohjaukseen tarkoitettu Sercos III (Sestito, 2021).

Kuten aikaisemmin todettiin, kaupallisissa nopeusohjatuissa pumpuissa ylempi ohjausjärjestelmä on tyypillisesti integroitu sähkömoottorin ohjaimen, jolloin ylemmän ja alemman ohjausjärjestelmän välinen tiedonsiirto lienee toteutettu piirilevyn sisäisesti. Sähkömoottorin ohjaimen tarvitaan kuitenkin usein sisäänmenona asetusarvo, jos säädön tavoite ei ole vakio. Tällöin käytetään tyypillisesti digitaalisia kenttäväyliä, jos tiedonsiirto tarve on kaksisuuntainen. Esimerkiksi Bosch Rexrothin (2019) tuotteissa väylän voi valita hieman valitusta moottorinohjaimesta riippuen esimerkiksi Sercos, EtherCat, Ethernet/IP ja ProfiNet -väylien väliltä. Tämän valmistajan ratkaisussa myös analogiset kenttäväylät ovat saatavilla, ja IndraDrive moottorinohjaimiin on valittavissa edellä mainittujen digitaalisten kenttäväylien lisäksi CAN-väylä (Bosch Rexroth 2019). Hydacin (2021) ratkaisuun taas on valittavissa lisävarusteena kyseinen kenttäväylärajapinta, jonka voi valita Profibus, EtherCAT, CANopen tai ProfiNET -kenttäväylistä (Hydac 2021). Ilman kenttäväylärajapinnan valintaa Hydacin (2021) ratkaisussa taas lienee olevan kiinteä ohjausjärjestelmän asetusarvo.

Asetusarvon asettamisen lisäksi digitaalisella kenttäväylä rajapinnalla saada tietoa ohjattavan laitteen toiminnan tilasta. Esimerkiksi Hydacin (2021) tuotteessa kenttäväylällä voidaan tarkistaa pumpun tila sekä ohjaimen kiinnitetyiden antureiden mitta-arvot. Kerätessä esimerkiksi tietoa järjestelmän käynnissäoloajasta voidaan tarvittavia huolto-toiminpiteitä jaksottaa tai jos tietoa kerätään säätöön käytettävästä paine-erosta toimilaitteen yli, voidaan toimilaitteen tiivisteiden hajoaminen huomata paine-eron normaalia nopeampana laskemisena, kun pumppu pysäytetään. Digitaalisilla kenttäväylillä voidaankin mahdollistaa esimerkiksi edellä mainituin keinoin kunnossapidon valvontaa ilman suurempia muutoksia fyysiseen laitteistoon.

## 4. SOVELLUKSEN IMPLEMENTOINTI

Tässä työssä esille tulleista nopeusohjatun pumpun implementoinnin rajoitteista suurin lienee ratkaisun suhteellisen huono askelvaste. Tämä ei kuitenkaan estää sovelluksen käyttöä lineaarisiin toimintoihin tela-alustaisessa kivenmurskaimessa, sillä nämä toiminnot eivät vaadi huomattavia dynaamisia ominaisuuksia. Jos pumpun pyörimisnopeus saadaan sovelluksella nostettua nolasta siten, että tiettyä hydraulisylinteriä saadaan liikutettua Shenin et al. (2013) tekemän tutkimuksen mukaisesti kymmenen senttimetriä noin sekunnissa ja verrataan tätä venttiiliohjauksen kykyyn tehdä sama 0,1 sekunnissa, ei suuremmalla viiveellä ole käytännön merkitystä, kun nykyisellä ratkaisullakin sylinterien liikeajat ovat sylinteristä riippuen 10–90 sekuntia (katso Metso Outotec 2020c).

Sovelluksen ei tarvitse myöskään reagoida suoraan asetuksensäädön lukitussylinterin vuotoihin, koska tässä piirissä on paineakku. Siitä huolimatta, että nopeusohjatun pumpun dynaamiset ominaisuudet olisivat paremmat, ei kyseistä paineakku voida poistaa järjestelmästä yksinkertaistamistarkoituksessa, sillä se on vaimentamassa kyseisen lukitussylinterin hydraulijärjestelmään johtamia paineiskuja, jotka syntyvät murskausprosessista. Paineiskut puolestaan taas voivat aiheuttaa komponenttien vaurioitumista (Kauranne et al. 2013 s. 95). Tämän piirin kannalta lukitussylinterin tiivisteet luultavimmin kuluisivat nopeammin, jos järjestelmässä ei olisi paineakku. Nopeusohjattuun pumpuun siirtyminen voi jopa auttaa vähentämään paineiskuja johtuen nopeusohjatun pumpun rauhallisemmasta dynamiikasta. Jos järjestelmältä vaadittaisiin kuitenkin parempaa dynamiikkaa, voitaisiin siihen vaikuttaa esimerkiksi lisäämällä paineakku myös pumpun rinnalle (Shen et al. 2013).

Sovelluksen dynaamisten ominaisuuksien lisäksi nopeusohjatun pumpun implementoinnissa on jonkin verran eroavaisuuksia verrattuna muihin pumppuratkaisuihin. Näistä suurin lienee sähköinen ohjausjärjestelmä, jonka vuoksi sovelluksen implementoinnissa vaaditaan monialaista osaamista varsinkin, jos nopeusohjattu pumppu päätetään toteuttaa itse hyllykomponenteista valmiin ratkaisun sijaan. Siitä huolimatta, että sähköinen voimansiirto eli moottori ja sen ohjain voidaan laskea hyllykomponenteiksi, täytyy ainakin ylemmän tason ohjausalgoritmin toteuttaa itse, mitä varten tarvitaan myös erillinen ohjainlaite. Tämä olisi tyypillisesti valmiissa ratkaisuissa integroituna moottorinohjaimen, mutta hyllykomponentteja käytettäessä mahdollisuutta toteuttaa ylemmän tason ohjausjärjestelmää ei useinkaan ole. Ylemmän tason ohjaus ja ohjainlaite voidaan toteuttaa todennäköisesti yksinkertaisimmin hieman säätöperusteesta riippuen PID-algoritmillä, jota käytettäisiin geneerisellä I/O -pareja sisältävällä mikro-ohjaimella.

Nopeusohjatun pumpun kehitystyössä suurin haaste on todennäköisesti ohjauksen saaminen stabiiliksi ja tarpeeksi värähtelemättömäksi, jotta järjestelmän toiminta on haluttua ja ohjaus ei aiheuta järjestelmään turhia paineiskuja. Kuten työssä on tullut ilmi, stabiiliuteen voivat vaikuttaa useat eri asiat, kuten säätöalgoritmi, järjestelmässä esiintyvät viiveet, tiedonsiirto ja mittauksien laatu. Kehitystyöhön tarvitaan todennäköisesti myös jokin virtuaalinen kehitysympäristö, kuten Matlab, jossa ohjausalgoritmi voidaan muodostaa simuloinnin avulla mikrokontrollerin tukemalla ohjelmointikielellä. Jos tällaista osaamista ei löydy organisaation sisältä, se voidaan joutua ostamaan joka tapauksessa alihankintana.

Päädyttäessä puolestaan valmiisiin nopeusohjattuihin pumppuratkaisuihin voidaan järjestelmäsuunnittelu todennäköisesti toteuttaa samoilla suunnitteluresursseilla, joita on vaadittu aikaisempiinkin hydraulisiin toteutuksiin, sillä yksinkertaisimmillaan valmiin ratkaisun implementointi tuotteeseen vaatii asetusarvon ajamista ohjaimeen ja yhden anturin kytkemistä hydraulijärjestelmään normaalin suunnittelun, testauksen ja toiminnan validoinnin lisäksi. Nopeusohjattujen pumppuratkaisuiden valmistajilta voidaan myös odottaa tukea ongelmatilanteissa, jos sellaisia muun muassa kehitysvaiheessa kohdataan.

Koska tässä työssä ei lasketa tarkempia kustannusarvioita, on vaikea sanoa, kumpi ratkaisu on taloudellisesti kannattavampi. Jos valmiit nopeusohjatut pumppuratkaisut ovat lähes samanhintaisia, kannattaa todennäköisesti päätyä käyttämään valmiita nopeusohjattuja pumppuratkaisuja, sillä niiden säätömahdollisuudet ovat tyypillisesti tarpeeksi laajat toteuttamaan suhteellisen yksinkertaisia, kuten paine- ja tilavuusvirtaperusteisia, säätöjä. Jos nämä eivät kuitenkaan riitä sovelluskohteeseen, joudutaan ilmeisesti toteuttamaan nopeusohjatun pumpun ohjausjärjestelmä itse.

Nopeusohjatun pumpun konfiguraatiolla on merkitystä myös kustannuksiin, minkä vuoksi siihen kannattaa valita tietynlaiset komponentit. Sovelluksen hydraulipumpuksi lieneeärkevintä valita aikaisemmin esitetyistä hydraulipumpuissa ulkoryntöinen hammasrataspumppu, sillä se lienee halvin, ja useaa sellaista voidaan käyttää 250 bar järjestelmäpaineella, mikä on nykyisen LT106:n järjestelmäpaine tutkittavien lineaarikäyttöjen osalta. Kivenmurskaimissa äänekkäin komponentti lienee itse murskain, minkä vuoksi tuotteeseen ei tarvitse valita hiljaisempaa pumppua. Jos pumpusta kuitenkin lähtee huomattavasti eri taajainen ja korvaan pistävä ääni verrattuna muihin murskauslaitoksen komponentteihin, kannattaa myöhemmässä tuotekehityksen vaiheessa miettiä siirtymistä hiljaisempaan sisäryntöiseen hammasrataspumppuun.

Sähkömoottoriksi kannattaa todennäköisesti Kauranne et al. (2013, s. 458–461) mainitsemista yleisimmin käytetyistä sähkömoottoreista valita epätahtinen AC-servomoottori,

sillä järjestelmältä ei vaadita kummempia dynaamisia ominaisuuksia, ja moottori mahdollistaa seuraavassa luvussa ehdotetun sääperusteen käytön, jossa pumpun tuotolle asetetaan tietty arvo. Epätahtiset vaihtovirtamoottorit, joista tyypillisin on oikosulkumoottorit, ovat Abadin (2016) mukaan yksi luotettavimmista sähkömoottorityypeistä, ja ne mahdollistavat korkean käynnistysmomentin, jollaista muun muassa hydraulijärjestelmässä tarvitaan tilanteissa, jossa pumpun tulee käynnistyä paineen alla. Nämä ominaisuudet yhdessä sen helpon säädettävyyden ja halvan hankintahinnan kanssa selittävät oikosulkumoottoreiden suosiota, ja se onkin käytetyimpiä moottorityyppejä teollisuuden ratkaisuissa. Oikosulkumoottorin hyötysuhde ei kuitenkaan ole sähkömoottoreiden parhaimmasta päästä, ja esimerkiksi kestopagneettimoottoreilla voidaan saavuttaa parempi hyötysuhde ja tämän vuoksi pienempi hukkalämmöntuotto (Abad 2016, s.1–31). Kestomagneetteja käyttävien moottorien hintoihin liittyy kuitenkin riski, sillä melkein kaikki vahvasti magneettinen malmi louhitaan ja jalostetaan Kiinassa, jonka vientipolitiikka voi täten vaikuttaa vahvasti niitä käyttävien moottoreiden hintoihin ja saatavuuteen (Kramer 2021).

Käytettäessä AC-servomoottoria tarvitaan sen pyörimisnopeuden ohjaamiseen servomuuttaja (Kauranne et al. 458–461). Jos ylemmän tason ohjain on integroituna moottorinohjaimen, täytyy varmistua siitä, että ohjain kykenee toteuttamaan valitun säätöperusteen ja siinä on tarpeelliset liityntärajapinnat antureille ja mahdollisesti muulle automaatiojärjestelmälle. Automaatiojärjestelmään liittymisen mahdollistavaa rajapintaa tarvitaan silloin, kun pumpun asetusarvoa tarvitsee säätää käytönaikaisesti tai halutaan hyödyntää nopeusohjatusta pumpusta saatua dataa esimerkiksi kunnonvalvontaan.

#### **4.1 Järjestelmän toimintaperiaatteen ehdotus**

Koska nopeusohjatun pumpun käyttöön ei löytynyt esteitä, voidaan muodostaa järjestelmälle toimintaperiaatteen ehdotus. Pohtimalla useita erilaisia tapoja toteuttaa lineaarikäyttöjen liikenopeudensäätö mahdollisimman yksinkertaisesti ja energiatehokkaasti tässä työssä päädyttiin käyttämään ohjausta, jossa tilavuusvirran maksimiarvo asetetaan jokaiselle toimilaitelinjalle erikseen. Ratkaisussa toimilaitetta ohjaavan venttiilin tietyn solenoidin aktivoinnista lähtee tieto pumpulle asetusarvona, minkä mukaan sen pyörimisnopeuden maksimiarvo säädetään. Jos pumpun painelinjan paine ei ole saavuttanut järjestelmän maksimipainetta, pumppu pyrkii kyseiseen pyörimisnopeuteen. Tämä säätöperuste mahdollistaa toimilaitteiden liikenopeuden säädön vakiokuormalla. Jos toimilaitteen yli oleva paine-ero kasvaa eli kuorma lisääntyy, voi toimilaitteen liikenopeus hidastua hieman. Tällä ei kuitenkaan ole käytännön toteutuksen kannalta merkitystä,

sillä ratkaisulla pyritään ennemmin estämään toimilaitteiden liian nopeat liikkeet kuin toteuttamaan täysin vakioidut liikenopeudet.

Valittu säätöperuste ei myöskään mahdollista useamman toimilaitteen samanaikaista käyttöä siten, että kaikki toimilaitteet liikkuisivat tietyillä nopeuksilla, koska tilavuusvirta ohjautuu ennemmin sille toimilaitteelle, jonka kuormavoimasta aiheutuva työpuolen paine on alhaisin. Kahden tai useamman lineaaristen toimintojen samanaikainen käyttö ei kuitenkaan ole tarpeellista ja voi pahimmassa tapauksessa aiheuttaa vaaratilanteita. Tämän vuoksi tässäkin säätötavassa, kuten nykyisenkin LT106:n hydraulisessa toteutuksessa, estetään kahden lineaarisen toiminnon samanaikaisesti käyttäminen. Tästä poikkeuksena on kuitenkin hydraulisen tehon ulosotto, jota käytettäessä sen toimilaitelinjojen tilavuusvirta voi hetkellisesti vaihtua prosessin aikana, kun asetuksenlukituspiirin paineakkua varataan.

Edellä mainitun säätöperusteen pohjalta toteutettiin liitteen A hydraulikaavio, jossa esitellään nopeusohjattua pumppua käyttävän hydraulijärjestelmän luonnos. Liitteessä on ainoastaan toimilaittepiireistä asetuksen säätö, hydraulisen tehon ulosotto ja lineaarisista toiminnoista syöttösuppilon lisäreunat, sillä loput lineaariset toiminnot eroaisivat vain hydraulisyntereiden ja venttiilien määrässä. Nämä hydraulikaaviosta puuttuvat lineaariset toiminnot venttiileineen lisättäisiin kaavion painelinjan ja tankkilinjan jakolohkoihin, jotka on kehystetty kaavioon punaisella.

Koska kaikki hydraulijärjestelmään liitettävät toimilaittepiirit ovat lisävarusteita, ei vakio- tuotteeseen liene järkevää asentaa kaikille toiminnoille venttiileitä valmiiksi. Lisäksi toteutuksessa, jossa olisi vain yksi venttiilistö, runkoletkutuksen määrä lisääntyisi huomattavasti verrattuna tilanteeseen, jossa toimilaittepiirin venttiilistö olisi lähellä sen piirin toimilaitteita. Tässä tilanteessa esimerkiksi syöttösuppilon lisäreunat vaatisivat kymmenen letkua kahden sijaan kulkemaan rungon läpi venttiilistöltä toimilaitteille. Tämä johtuu siitä, että hydraulikkaa vaativat toiminnot ovat ympäri tuotetta, eikä yhtä venttiilistöä voida täten sijoittaa lähelle kaikkia toimintoja (kuva 1).

Toteutuksessa, jossa on toimilaittepiirikohtainen venttiilistö, täytyy ottaa huomioon venttiilien solenoidien ohjaus. Ehdotuksessa tämä ratkaistaan venttiilistökohtaisilla mikrokontrollereilla, jotka ovat yhteydessä ohjausjärjestelmään digitaalisia kenttäväyläkaapeleita pitkin ja kyseisen piirin venttiilien solenoideihin ulostulopinnien avulla. Tällöin venttiilistölle tarvitsee viedä virtajohtimien kanssa ainoastaan yksi kenttäväyläkaapeli. Jotta koko ohjausjärjestelmä saadaan toimimaan, täytyy sähkömoottorinohjain ja hydraulijärjestelmään lisätyt paineanturit lisäksi kytkeä osaksi ohjausjärjestelmää. Näistä moottorinohjain ei kuitenkaan välttämättä tarvitse kenttäväylää, ja se voidaan kytkeä ylemmän

tason ohjausjärjestelmään suoraan I/O -parilla. Tämä johtuu siitä, että näissä kaapeleissa liikkuu ainoastaan moottorin ohjaussignaali ja toiseen suuntaan mahdollisesti tilaviesti sähkömoottorin pyörimisnopeudesta. Koska antureidenkin tapauksessa johtimissa liikkuvat vain mittauksen arvot, voidaan ne kytkeä suoraan I/O -pareihin. Nyt ei kuitenkaan tarvita kaksisuuntaista tiedonsiirtoa, jolloin anturit kytketään ainoastaan sisääntulopintoihin.

Liitteen A luonnoksessa painelinjan jakolohkon ja pumpun välissä käytetään Hydacin (2021) funktiomodulin kaksi kaltaista suoraan pumpun painelinjaan kiinnitettävää lohkoa, jonka suuntaventtiili mahdollistaa sivuvirtauksen jäähdytyspiirille hydrauliohjauksen kuumuudessa ja paineen purkamisen järjestelmästä, kun se sammutetaan. Tämän lisäksi lohossa on mekaaninen painerajaventtiili varoventtiilinä, mikä kykenee reagoimaan nopeusohjattua pumppua nopeammin paineiskuihin.

Tämän hydraulijärjestelmän jäähdytyksen tarpeellisuus riippuu todennäköisesti siihen kytkettävien toimilaitteiden määrästä ja tyypistä. Jos asiakas valitsisi tela-alustaiseen kivenmurskaimeen ainoastaan muutamia harvakseltaan käytettäviä toimintoja, kuten esimerkiksi pääkuljettimen kääntötoiminnon, syöttösuppiloiden lisälaidat ja hydraulisen asetuksen säädön, todennäköisesti erillistä jäähdytyspiiriä ei tarvita. Tarvittaessa taas toimintoja, joita käytetään pitempiä aikoja, kuten hydraulisen tehon ulosottoa, jäähdytysjärjestelmän tarve lienee välttämätön. Edellä mainitun vuoksi jäähdytyspiiristä voidaan todennäköisesti tehdä optio eli lisätä se järjestelmään vasta sitä tarvittaessa. Koska hydraulijärjestelmän lämpiämistä on suhteellisen helppo arvioida (katso esimerkiksi Kauranne et al. 2013, s.83–87), voitaisiin asiakkaalle antaa arvio siitä, kuinka kauan järjestelmää voitaisiin käyttää ilman ulkoista jäähdytysjärjestelmää. Jos kuitenkin hydraulijärjestelmän nesteen lämpötila ylittyy sille asetetun maksimiarvon, on pumpun ohjausalgoritmiin helppo lisätä pakkosammutustoiminto. Myös muita hydraulijärjestelmän avustavia toimintoja, kuten hydraulinesteen lämmitys, voidaan tarjota lisävarusteena tarvittaessa.

Moduloinnin näkökulmasta tässä kappaleessa käsitelty ehdotus mahdollistaisi liitteen A kaltaisen hydraulikoneikkon (kaikki komponentit kaavion jakolohkojen välissä) käyttämisen kaikissa sähköistettävissä LT-tuoteperheen kivenmurskaimissa, kun jakolohkojen liitännöiden määrä katsotaan riittäväksi. Mahdollisuus modulointiin johtuu siitä, että eri toimilaitelinjan yhdistämisestä pumpun painelinjaan voidaan lähettää yksilöity viesti pumpulle, jolloin sen tuotto asettuu jokaiselle sen perässä olevalle toimilaitteelle sopivaksi. Moduloidulla koneikko voidaan pienentää eri tuotteisiin tarvittavien nimekkeiden yhteenlaskettua määrää. Tämä puolestaan pienentää kokonaiskustannuksia, sillä jokaiselle nimikkeelle kertyy ylläpitokustannuksia useassa organisaation osassa, kuten hankin-



nassa, tuotannossa ja suunnittelussa. Koska myöskään venttiilien ei tarvitse olla ehdotuksessa tietyn kokoisia, kun pumppu toteuttaa tilavuusvirran säädön, voidaan venttiilien koko vakioida, mikä puolestaan pienentää tarvittavien erilaisten venttiilien määrää tuotteissa.

## 4.2 Ehdotuksen vertaaminen nykyiseen toteutukseen

Nopeusohjatun pumpun lisäksi jäljelle jäävä hydraulijärjestelmä voitaisiin jättää käyttämään säätötilavuuspumppua, vaikka pumpun primääritehonlähde muuttuisi vakiovyörimisnopeudelliseksi sähkömoottoriksi dieselmoottorin sijaan. Tällöin nykyisestä hydraulijärjestelmästä sähköistettävät toiminnot poistamalla saataisiin suhteellisen pienellä työmäärällä toimiva ratkaisu verrattuna työmäärään, joka nopeusohjattua pumppua käyttävän hydraulijärjestelmän suunnitteluun ja käyttöönottoon vaaditaan. Jos hydraulijärjestelmä päädyttäisiin toteuttamaan säätötilavuuspumpulla, mahdollistaisi sähkömoottorikäyttö pumpun kytkemisen päälle ja pois, vaikka sen pyörimisnopeutta ei voitaisi muuttaa. Edellä mainitulla toiminnallisuudella voitaisiin kytkeä pumppu pois päältä, kun sitä ei tarvita, jolloin pumppu ei tuota hukkateloa tyhjäkäynnillä. Sillä voitaisiin myös toteuttaa joitain turvatoimintoja, kuten hydraulijärjestelmän pois kytkeminen sen ylikuumentuessa.

Toisaalta siirtyminen nopeusohjattuun pumppuun mahdollistaisi siirtymisen pois esikompensoidusta LS-säädöstä ja sen vaatimista lisäletkutuksista mahdollisine vuotokohtineen. Siitä huolimatta, että painekompensointia ei tarvittaisi johtuen tarpeesta ajaa sähköistämisen jälkeen vain yhtä hydraulista toimilaitetta kerrallaan, tarvitaan LS-säätöön kuitenkin toimilaitelintojen mittakuristimet, joiden yli muodostuva LS-häviö heikentää järjestelmän hyötysuhdetta (kuva 2). Myös ohjaussignaalien välittäminen pumppulle vaatii nykyisessä toteutuksessa monimutkaisia LS-venttiilistöjä, joka voitaisiin korvata nopeusohjattua pumppua käyttämällä liitteen A kaltaisilla yksinkertaisemmillä venttiileillä. Lisäksi nopeusohjattu pumppu voidaan tarvittaessa kytkeä osaksi muuta automaatiojärjestelmää, jolloin esimerkiksi hydraulisen tehon ulosottoon kytketyn toimilaitteen tilavuusvirtausta voitaisiin muuttaa murskauslaitoksen hallintapaneelistä tai toteuttaa muun muassa laajempi hydraulijärjestelmän vikadiagnostiikka.

Myös moduloinnin kannalta siirtyminen nopeusohjattua pumppua hyödyntävään hydraulijärjestelmään näyttää lupaavalta, sillä muun muassa nykyisessä toteutuksessa toimilaitteiden liikenopeuteen vaikutetaan LS-venttiilistöjen venttiilien karojen aukeamista rajoittavilla ruuveilla. Käytettäessä eri tuotteissa mahdollisimman samanlaisia LS-venttiilistöjä pitäisi eri toimilaitteiden liikenopeudet säätää tuotantolinjalla. Nopeusohjatun pumpun tapauksessa tämä voidaan toteuttaa ajamalla ohjaimen muistiin tuotekohtainen ohjausalgoritmi, joka ottaa huomioon myös siihen asennetut lisävarusteet.

## 5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Nopeusohjattua pumppua hyödyntävän järjestelmäehdotuksen ja säätötilavuuspumpua käyttävän toteutuksen vertailun pohjalta voidaan todeta uuden ehdotuksen olevan lineaarisille toiminnoille selkeästi parempi ratkaisu energiatehokkuuden, järjestelmän fyysisen toteutuksen yksinkertaistumisen ja moduloitavuuden kannalta. Näiden lisäksi tuotteen kilpailukykyyn markkinoilla vaikuttaa sen ominaisuuksien lisäksi myös hinta. Ilman kustannuslaskelmia, jotka ottavat huomioon hankintahintojen lisäksi ehdotuksen implementoinnin kulut ja muut kulut, kuten nimikekulut, on vaikea arvioida uuden ehdotuksen kannattavuutta verrattuna säätötilavuuspumppua käyttävän hydraulijärjestelmään. Todennäköisesti kuitenkin jo pelkkien LS-venttiilistöjen korvaaminen toisi kustannussäästöjä, vaikka jouduttaisiin hankimaan moottorin pyörimisnopeusohjain pelkän tehoelektroniikan sijaan. Mahdollisia säästöjä voitaisiin saavuttaa myös paremman moduloitavuuden avulla tuoteperheen siirtyessä käyttämään samaa nopeusohjattua pumppua hyödyntävää hydraulijärjestelmää, minkä avulla voitaisiin vähentää nimikemääriä.

Työn tekemisen yhteydessä heräsi kiinnostus tutkia myös tavanomaisen eli vakiokierrostilavuuspumppua ja venttiiliohjausta käyttävän hydraulijärjestelmän soveltuvuutta lineaarisille toiminnoille, koska näin voitaisiin päästä vieläkin yksinkertaisempaan ja kustannustehokkaampaan toteutukseen. Tässä ratkaisussa pumppu valitaan siten, ettei järjestelmän pienempien sylintereiden liikkeet ole liian nopeita ilman suuria toimilaitelintojen kuristuksia. Riippuen pumpun ja kuristuksien koosta, suurempien sylintereiden liikeaika voi pidentyä, mikä kuitenkin vaikuttaa ainoastaan tuotteen käyttömukavuuteen. Koska kivenmurskain on kuitenkin tyypillisesti suurimmaksi osaksi paikallaan murskaamassa kiviainesta, eikä sitä siirretä tiheään, ei murskauskäytöksen kuljetusasetoon laittamiseen kuluvan ajan pidentymisellä esimerkiksi 10 minuutista 15 minuuttiin ole huomattavaa merkitystä. Siirtyminen tavanomaiseen hydraulijärjestelmään kuitenkin vaikeuttaa jälleen modulointia, eikä se mahdollista pumpun tuoton säädettävyyttä, joka voi huonontaa järjestelmän hyötysuhdetta. Tämä voi silti olla lähes merkityksetöntä koko tuotteen mitataavassa johtuen lineaaristen toimintojen harvasta käytössä.

Tavanomainen järjestelmä voikin olla toinen hyvä vaihtoehto nopeusohjattua pumppua hyödyntävän hydraulijärjestelmän lisäksi. Jatkossa tulisikin tehdä järjestelmäsuunnittelu tavanomaiselle järjestelmälle, valita tässä työssä esitetyn ehdotuksen pohjalta kaupalliset hydraulikomponentit ja verrata edellä mainittujen toteutuksien ominaisuuksia, kuten energiatehokkuutta ja luotettavuutta, sekä tietenkin kustannuksia. Vasta tällaisen vertailun jälkeen voidaan valita sovelluskohteeseen parhaiten soveltuva toteutus.

## LÄHTEET

Abad, G. (2016). *Power electronics and electric drives for traction applications*. New York, NY: John Wiley & Sons, Incorporated.

ABB (2001). Tekninen opas nro 7: Sähkökäytön mitoitus. Saatavissa (viitattu 8.3.2021): [https://library.e.abb.com/public/b11d4fe92973be93c1256d2800415027/Tekninen\\_opasnro7.pdf](https://library.e.abb.com/public/b11d4fe92973be93c1256d2800415027/Tekninen_opasnro7.pdf)

Bosch Rexroth. (2019). Sytronix – variable-speed pump drives, tiedosto verkkosivuilta. Saatavissa (viitattu 23.3.2021): [https://www.boschrexroth.com/documents/12605/25201122/R999000332\\_Sytronix\\_Kat\\_2019\\_EN\\_media.pdf/c27b63fa-86f6-b0d2-86bb-650020f1de99?version=1.0](https://www.boschrexroth.com/documents/12605/25201122/R999000332_Sytronix_Kat_2019_EN_media.pdf/c27b63fa-86f6-b0d2-86bb-650020f1de99?version=1.0)

Bosch Rexroth. (2020). MSK – Synchronous Servomotors, tiedosto verkkosivuilta. Saatavissa (viitattu 1.4.2021): [https://www.boschrexroth.com/documents/12605/25199827/R911325169\\_03.pdf/62c33187-6bf8-7ac4-1ad5-35a5bdea5e30?download=true](https://www.boschrexroth.com/documents/12605/25199827/R911325169_03.pdf/62c33187-6bf8-7ac4-1ad5-35a5bdea5e30?download=true)

Cetinkunt, S. (2015). *Mechatronics with experiments* (2. painos). Chichester, England: Wiley.

Dhameja, S. (2001). *Electric vehicle battery systems*. Boston: Newnes.

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetetus 2016/1628 liikkuviin työkoneisiin tarkoitettujen polttomoottoreiden kaasu- ja hiukkaspäästöjen raja-arvoihin ja tyyppihyväksyntään liittyvistä vaatimuksista (2016). Euroopan unionin virallinen lehti. L252/53, 2016. Saatavissa: <http://data.europa.eu/eli/reg/2016/1628/oj>

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 97/68/EY liikkuviin työkoneisiin asennettavien polttomoottoreiden kaasu- ja hiukkaspäästöjen torjuntatoimenpiteitä koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön lähentämisestä (1997). Euroopan unionin virallinen lehti. L59/1, 1998. Saatavissa: <http://data.europa.eu/eli/dir/1997/68/oj>

Halme, J. & Parikka, R. (2005). AC-servomoottori – rakenne, vikaantuminen ja havainnointimenetelmät. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT).

Hydac. Hydac Kinesys: Variable speed drive DVA, tiedosto verkkosivuilta. Saatavissa (viitattu 18.2.2021): <https://www.hydac.com.au/products/motion-control-systems/kinesys-variable-speed-drive-dva.html>

Ibrahim, D. (2006). *Microcontroller based applied digital control*. Chichester: John Wiley.

Kauranne, H., Kajaste, J. & Vilenius, M. (2013). *Hydrauliteknikka* (2. painos). Helsinki: Sanoma Pro.

Keesman, K. J. (2011). *System identification an introduction*. London: Springer London.

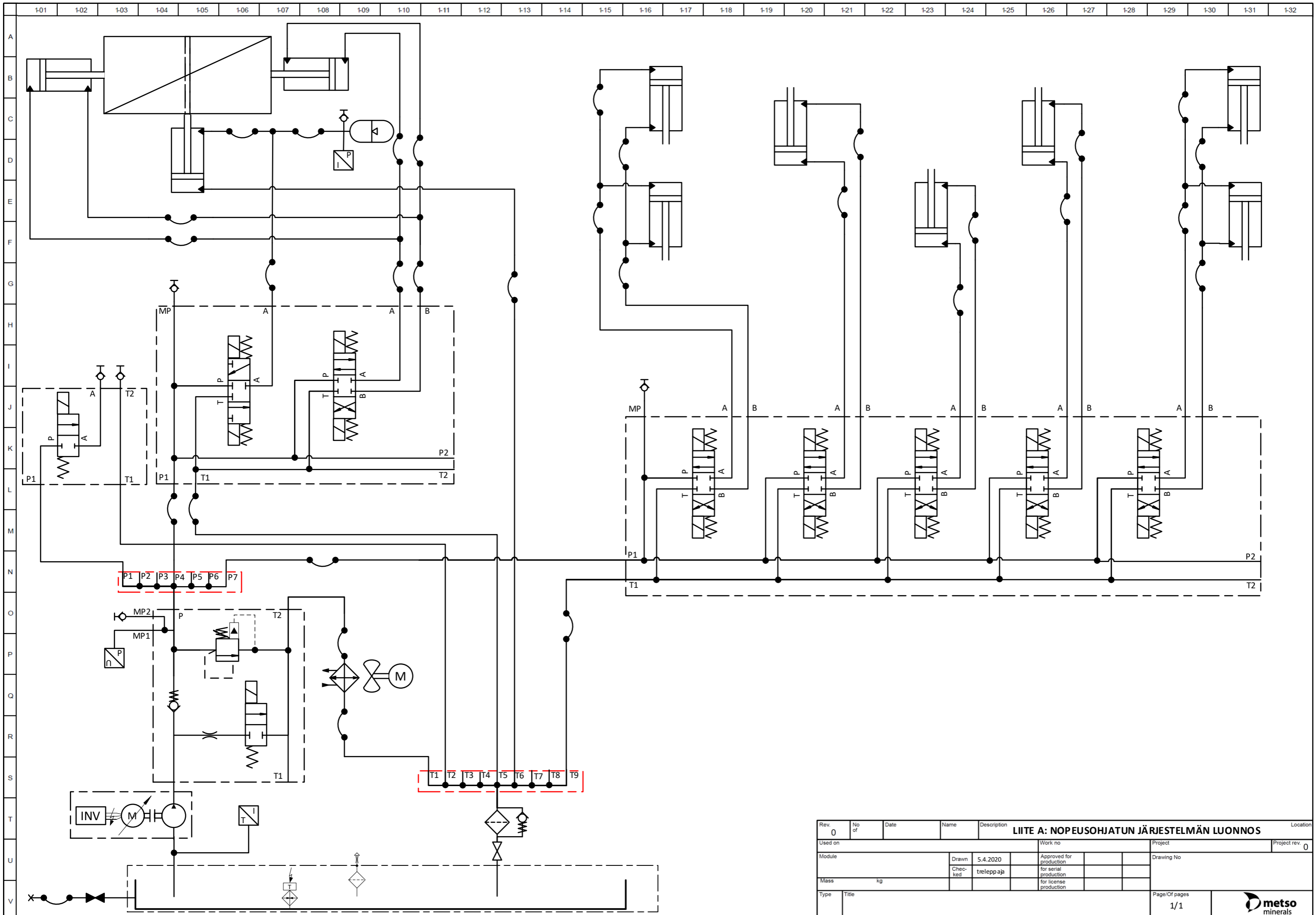
Koitto, T., Kauranne, H., Calonius, O., Minav, T. & Pietola, M. (2018). Experimental investigation of a directly driven hydraulic unit in an industrial application. In: H. Murrenhoff (Eds.), *Proceedings of the 11th International Fluid Power Conference*, March 19-21, 2018, Aachen, Germany (Vol. 2).

- Koitto, T., Kauranne, H., Calonius, O., Minav, T. & Pietola, M. (2019). Experimental study on fast and energy-efficient direct driven hydraulic actuator unit. *Energies (Basel)*, 12(8), 1538–1554.
- Koohi-Fayegh, S. & Rosen, M. A. (2020). A review of energy storage types, applications, and recent developments. *Journal of Energy Storage*, 27.
- Kramer, D. (2021). US government acts to reduce dependence on China for rare-earth magnets. *Physics Today*, 74(2), 20–24.
- Lin, D., Liu, Y. & Cui, Y. (2017). Reviving the lithium metal anode for high-energy batteries. *Nature Nanotechnology*, 12(3), 194–206.
- Metso. (2020a). Metso Outotec ja Neles, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.2.2021): <https://www.metso.com/fi/metso-outotec-neles/>
- Metso. (2020b). Kiviainestuotanto, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.2.2021): <https://www.metso.com/fi/tuotehaku/#/Kategoriat/Kiviainestuotanto/>
- Metso Outotec. (2020a). Sijoittajaesitys, tammikuu 2021, tiedosto verkkosivuilta. Saatavissa (viitattu 14.2.2021): <https://www.mogroup.com/fi/yritys/sijoittajat/julkaisut-ja-esitysmateriaalit/>
- Metso Outotec. (2020b). Lokotrack® LT Series Mobile crushers, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.2.2021): <https://www.mogroup.com/portfolio/lokotrack-lt-series/>
- Metso Outotec. (2020c). LT106:n hydraulikaavio.
- Metso Outotec. (2021). LT106:n 3D-malli.
- Nof, S. Y. (2009). *Springer handbook of automation*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg.
- Paavilainen, H. (2009). Hydrauliiikka 1, luentomoniste. Saatavissa (viitattu 29.3.2021): <https://wiki.metropolia.fi/download/attachments/12158203/luentomoniste.pdf>
- Parker. Drive Controlled Pumps, tiedosto verkkosivuilta. Saatavissa (viitattu 23.3.2021): <https://www.parker.com/Literature/Hydraulics%20Group%20US/DCP%20Brochure%20HA473113.pdf>
- Putra, A. S. & Tan, K. K. (2011). *Drives and control for industrial automation*. London: Springer London.
- Regtien, P., van der Heijden, F., Korsten, M. J. & Otthius, W. (2004). *Measurement science for engineers*. London: Butterworth-Heinemann.
- Reponen, L. (2019). LT120E:n sähköistäminen. Diplomityö. Tampereen yliopisto. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-201908273032>
- Sestito, G. S., Turcato, A. C., Dias, A. L., Ferrari, P., Spatti, D. H. & da Silva, M. M. (2021). A general optimization-based approach to the detection of real-time ethernet traffic events. *Computers in Industry*, 128.
- Shen, H., Nie, M., Zhi, S. & Bo, J. (2013). Study on high dynamic variable speed hydraulic control system. *Applied Mechanics and Materials*, 271-272, 625–631.

Simon, P. & Gogotsi, Y. (2008). Materials for electrochemical capacitors. *Nature Materials*, 7(11), 845–854.

Törmä, M. (2016). LOKOMO – 100 vuotta konepaja- ja terästeollisuutta: Poimintoja yhtiön historiasta. *Tekniikan Waiheita*, 34(1), 42–50.

Wood Mackenzie (2020). Global upstream M&A: 2019 in review, tiedosto verkkosivuilta. Saatavissa (viitattu 14.2.2021): <https://www.woodmac.com/reports/upstream-oil-and-gas-global-upstream-manda-2019-in-review-377400>



Rev.	No of	Date	Name	Description	Location
0				<b>LIITE A: NOPEUSOHJATUN JÄRJESTELMÄN LUONNOS</b>	
Used on			Work no		Project
Module			Drawn	Approved for production	Drawing No
			Checked	for serial production	
Mass			kg		for license production
Type	Title				Page/Of pages
					1/1

