

Opinnäytetyö (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

2022

Mikko Taiminen

POTKURILAITTEEN SÄHKÖNOSTO

- Hydraulinoston korvaaminen sähkönostolla

Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Kone- ja tuotantotekniikka

2022 | 47 sivua

Mikko Taiminen

POTKURILAITTEEN SÄHKÖNOSTO

- Hydraulinoston korvaaminen sähkönostolla

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia mahdollisia korvaavia nostotapoja ULE-potkurilaitteen hydraulinoston korvaajaksi. Tutkimuksella haluttiin selvittää voiko nostolaitteiston toimintaa kehittää uudistamalla nostolaitteisto sekä voiko uudella nostolaitteistolla saavuttaa alemmat kustannukset.

Opinnäytetyö toteutettiin tutkimalla erilaisia vaihtoehtoja nostolaitteiston toteuttamiselle sekä vertailemalla erilaisia nostomekanismeja. Näiden hyötyjä, haittoja ja ominaisuuksia vertaillen päästiin tulokseen, jota esitettiin seuraavaksi nostolaitteistoksi. Lisäksi opinnäytetyössä tutkittiin mahdollisuutta käyttää samaa nostolaitteistoa kahden eri kokoluokan potkurilaitteissa.

Opinnäytetyössä valittiin tutkimuskohteeksi sähkönostolaitteisto, joka toimii sähkösylinterien avulla. Konsepti jäljittelee suurimmaksi osaksi nykyistä hydraulinostolaitteiston toimintaa. Valinta konseptista tehtiin sen etuihin, mahdollisuuksiin ja joustavuuteen perustuen. Opinnäytetyössä todettiin, että samaa sähkönostolaitteistoa voidaan käyttää eri kokoluokan potkurilaitteissa, jos kustannukset hydraul- ja sähkönostolaitteistojen välillä saadaan vastaamaan toisiaan.

Asiasanat:

Azimuth potkurilaite, sähkösylinteri, suunnittelu, konsepti, modulaarisuus

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical and Production Engineering

2022 | 47 pages

Mikko Taiminen

ELECTRIC LIFTING OF A THRUSTER

- Replacement of hydraulic lifting with electric lifting of a thruster

The objective of the thesis was to study possible lifting methods as a replacement for the hydraulic lifting of the ULE azimuth thruster. The topic of the study was to find out if the lifting systems operation could be improved by revamping the lifting system, as well as could lower costs be achieved with the implementation of the new lifting system.

The thesis was carried out by studying various options for the implementation of the lifting system, as well as comparing different lifting mechanisms. Comparing the advantages, disadvantages and characteristics of these, a result was obtained, which was presented as the next lifting system. In addition, the thesis explores the possibility of using the same lifting system in thrusters of two different sizes.

In the thesis, an electric lifting system, operated by electric cylinders, was selected for research. The concept replicates the current hydraulic lifting system's functions for the most part. The choice of the concept was made based on its advantages, possibilities, as well as flexibility. The outcome of the study shows that the same electric lifting system can be used on thrusters of different sizes if the cost between the hydraulic and electric lifting systems can be matched.

Keywords:

Azimuth thruster, electric cylinder, design, concept, modularity

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	6
1 JOHDANTO	7
2 OPINNÄYTETYÖN TAUSTA	8
2.1 Nykytilanne ja työn tavoitteet	8
2.2 Aineisto ja rajaukset	9
3 POTKURILAITTEET	10
3.1 Yleisesti	10
3.2 ULE-potkurilaite	11
4 POTKURILAITTEEN SÄHKÖNOSTO	13
4.1 Nostotapojen vaihtoehdot	13
4.2 Sähkönoston toteutustapa	18
4.3 Potkurilaitteen noston toiminta	19
4.4 Sähkösylinterin rakenne ja toiminta	20
4.5 Sylinterien mitoitus ja vaatimukset	21
4.6 Sähkönoston yhtenäistäminen tuoteperheelle	24
5 SÄHKÖSYLINTERIEN SIJOITUKSEN SUUNNITTELU	26
5.1 Sähkösylinterien sijoituksen ongelmat	26
5.2 Tarvittavat muutokset sähkösylinterien sijoitukselle	30
5.3 Sähkösylinterien sijoitus potkurilaitteeseen	31
5.4 Sähkönoston toiminnan varmistaminen	33
6 SÄHKÖNOSTON VERTAILU HYDRAULINOSTOON	36
7 TULOKSET JA YHTEENVETO	41
8 JATKOKEHITYS	43
LÄHTEET	45

KAAVAT

Kaava 1. Dynamiikan peruslaki (Insinöörin fysiikka, osa 1 2016).	23
--	----

KUVAT

Kuva 1. ULE-potkurilaite yläasennossa (Kongsberg Maritime Finland Oy sisäinen tietokanta 2021).	10
Kuva 2. ULE-potkurilaite ala-asennossa (Kongsberg Maritime Finland Oy sisäinen tietokanta 2021).	11
Kuva 3. ULE-potkurilaitteiden tekniset tiedot (Kongsberg Maritime, PDF-dokumentti 2021).	12
Kuva 4. Teleskooppinen suojus ruuvitangolle (Hennig 2021).	14
Kuva 5. Hammaspyörälaitteisto (Orientalmotor 2021).	15
Kuva 6. Sähkösylinterijärjestelmän rakenne (Tolomatic 2020).	21
Kuva 7. ULE 155 -potkurilaitteen toiminnallinen kuva ylä- ja ala-asennossa.	26
Kuva 8. ULE 205 -potkurilaite ala-asennossa tuettuna pohjakaivon kylkiin.	27
Kuva 9. Potkurilaitteen tuenta pohjakaivon reunoihin kulmarautaohjaimilla.	28
Kuva 10. Sähkönostolaitteiston sijoitus pohjakaivonkannen päälle nykyisen hydraulisylinterin kiinnityspaikalle.	33

TAULUKOT

Taulukko 1. Nostomekanismien vertailutaulukko (Luciano 2021; Tang 2019).	17
Taulukko 2. Sähkö- ja hydraulisylinterin vertailu (Goluba 2001; Industrial Devices 2022; Luciano 2021; Majumdar 2003; Norrhydro 2021; Zaske 2021).	38

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

Combi	Combined thruster, yhdistetty potkurilaite
CP	Controllable Pitch, säätösiipipotkuri
CRP	Contra-Rotating Propeller, kaksi erisuuntiin pyörivää kiinteälapaista potkuria
EMC	Electromagnetic compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus
EtO	Engineer to Order, tilaukselle suunnittelu
FP	Fixed Pitch, kiinteälapainen potkuri
PLC	Programmable Logic Controller, ohjelmoitava logiikka
UL	Underhull liftable, potkurilaitteen tuotenimitys
ULE	Underhull liftable electric, potkurilaitteen tuotenimitys

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty toimeksiantona Kongsberg Maritime Finland Oy:lle, joka on yksi maailman johtavista Azimuth-potkurilaitteiden valmistajista. Opinnäytetyössä tutkitaan ULE-potkurilaitteen hydraulinosolle mahdollista korvaavaa sähkönostolaitteistoa. Sähkönostosta esitellään mahdollisia toteutuksen konsepteja. Opinnäytetyössä keskitytään tarkemmin valittuun nostotavan konseptiin ja sen toteutusmahdollisuuteen. Valitusta nostotavan konseptista tutkitaan sen ominaisuuksia ja etuja verrattuna nykyiseen hydraulinosolaitteistoon.

ULE-potkurilaitteet ovat laskettavia ja nostettavia potkurilaitteita, joita käytetään laivojen ja alusten apuohjaukseen ja manöverointiin. Näiden potkurilaitteiden nosto ja lasku tapahtuvat hydraulisyliinterien avulla Kongsberg Maritimen suunnittelemissa potkurilaitteissa. Potkurilaitteiden hydraulinoson korvaaminen sähköisellä nostolaitteistolla on tulevaisuuden kannalta järkevää tutkia. Sähköistyminen ja fossiiliperäisistä tuotteista eroon pääseminen on yleisesti tulevaisuuden kannalta oleellista. Toimeksiantajayrityksen tavoite on mahdollistaa kestävä kehityksen ratkaisuja meritekniikan alalla.

Nostolaitteiston uudistamisella halutaan saavuttaa alemmat kustannukset sekä edistää laitteiston energiatehokkuutta ja tuoteperheen potkurilaitteiden modulaarisuutta. Opinnäytetyössä tutkinnan kohteina ovat erilaiset nostomekanismit ja laitteistotyypit. Näiden välisiä ominaisuuksia vertailemalla tavoitellaan edullista ja potkurilaitteisiin soveltuvaa uutta sähkönoston toteutustapaa. Nykyistä hydraulinosolaitteistoa tulee käyttää vertailukohteena uudelle sähkönostolaitteistolle.

2 OPINNÄYTETYÖN TAUSTA

2.1 Nykytilanne ja työn tavoitteet

Kongsberg Maritime Finland Oy:n valmistamien ULE-potkurilaitteiden nosto ja lasku toimivat tällä hetkellä hydraulikan avulla. Nykyisen hydraulinostolaitteiston korvaaminen sähköisellä nostolaitteistolla edistäisi potkurilaitteen sähköistämistä kokonaisuudessaan. Useampi ULE-potkurilaitte-tuoteperheen pienimpien potkurilaitteiden nosto haluttaisiin mahdollisesti toteuttaa samalla sähkönostotyypillä. Yhtenäisellä sähkönostomodulilla edistettäisiin potkurilaitteiden modulaarisuutta, yhtenäistettäisiin tuoteperheen tuotteita sekä yksinkertaistettaisiin potkurilaitteen rakennetta. Tällä muutoksella tavoitellaan myös alempia kustannuksia, energiatehokkuutta ja haetaan kilpailuetua.

Opinnäytetyön tavoitteena on konseptoida mahdollinen nostolaitteiston toteutus ja kerätä tietoa potkurilaitteen sähkönoston toteutuksen vaikutuksista ja siitä mahdollisesti saavutetuista eduista. Opinnäytetyössä selvitetään mitä asioita tulee ottaa huomioon uutta nostolaitteistoa suunnitellessa ja miten tämän laitteiston toimivuudesta varmistutaan pitkällä aikajanelalla. Työssä valitaan yksi sähkönostolaitteiston toteutustapa, johon perehdytään tarkemmin.

Hydraulinoston korvaaminen sähkönostolla on motivoitu yrityksen toimesta lähinnä mahdollisuutena saada alennettua kuluja. Laitteiston muutoksella pyritään yksinkertaistamaan ja yhtenäistämään tuoteperheen potkurilaitteita, jolla on vaikutusta muun muassa myynnin, huollon ja suunnittelun työhön. Mahdollisuus suunnitella eri kokoluokan laitteet käyttämään samaa sähkönostolaitteistoa edistää potkurilaitteiden modulaarisuutta. Nostolaitteistojen yhtenäistämällä potkurilaitteiden välillä saadaan nostolaitteistojen tuotantomäärät kasvatettua, jolloin tuotteen hintaa saadaan alennettua kasvavan volyymin ansiosta. Sähköön siirtyminen fossiilisten polttoaineiden käytön sijasta nostaa myös yrityksen imagoa ympäristöystävällisempänä. Hydrauliiikkaöljyistä eroon pääseminen nostolaitteistossa edistää kestäväen kehityksen mukaista toimintaa, joka on yksi toimeksiantajayrityksen tavoitteista.

2.2 Aineisto ja rajaukset

Opinnäytetyön tutkimusmenetelminä käytetään yrityksen sisäisiä tietolähteitä, yrityksen työntekijöiden haastatteluja, kolmannen osapuolen tietoja ja kirjallisuutta.

Työ rajataan koskemaan ULE-potkurilaitteiden nostolaitteistoja. Työssä selvitetään sähkönoston mahdollistamista ja soveltamista eri laitekokoihin samassa potkurilaitte tuoteperheessä. Laajempia osa- ja kokoonpanokokonaisuuksia ei suunnitella potkurilaitteelle, eikä valmista nostojärjestelmää tai laitetta tulla opinnäytetyössä valmistamaan. Työssä ei esitellä absoluuttisia hintoja tai tarkastella kaikkia osien tai laitteistojen mittoja ja niihin aiheutuvia muutoksia nostolaitteiston käyttöönotosta. Työssä ei myöskään oteta kantaa potkurilaitteen tai mahdollisen sähkönostolaitteiston osien lujuusteknisiin ominaisuuksiin.

3 POTKURILAITTEET

3.1 Yleisesti

Azimuth-potkurilaitteet ovat kääntyviä potkurilaitteita, joissa laite kääntyy 360° vertikaaliakselinsa ympäri, mikä mahdollistaa työnnon, ohjauksen ja hyvän käsiteltävyyden. Yksinkertainen ja luotettava suunnittelu sekä ylläpito takaa hyvän toimintavarmuuden ja alhaiset kustannukset laitteen eliniän ajaksi. Potkurilaitteet ovat suunniteltu sekä diesel- että sähkökäytölle. Nosto- ja laskusekvenssi voidaan aloittaa kauko-ohjauksella komentosillalta. Potkurilaitteissa on myös mahdollisuus valita, toimiiko laitteen kääntö hydraulisesti vai sähköisesti. Potkurilaitteisiin on kolme erityyppistä potkurivaihtoehtoa (FP, CP ja CRP). FP-potkuri (Fixed Pitch) eli kiinteälapainen potkuri, CP-potkuri (Controllable Pitch) eli säätösiihipotkuri ja CRP-potkuri (Contra-Rotating Propeller) eli kaksi erisuuntiin pyörivää kiinteälapaista potkuria. (Kongsberg Maritime 2021).



Kuva 1. ULE-potkurilaitteet yläasennossa (Kongsberg Maritime Finland Oy sisäinen tietokanta 2021).

3.2 ULE-potkurilaite

ULE-potkurilaite eli Underhull Liftable Electric -potkurilaite on erikseen laskettava ja nostettava potkurilaite, joka toimii apulaitteena laivoissa muun muassa ankkurointia tai muuta apuohjausta varten. ULE-potkurilaitteen ollessa poissa käytöstä nostetaan se ylös laivan rungossa olevaan pohjakaivoon, jossa se ei tuota alukselle ylimääräistä virtausvastusta. Potkurilaite kiinnitetään pultiliitoksin aluksen runkoon hitsattuun pohjakaivoon. ULE-potkurilaite saa käyttövoimansa sähköisestä päämoottorista. ULE-potkurilaitteiden nosto ja lasku on toteutettu hydraulii-
kan avulla. ULE-potkurilaitteet ovat saatavana CP- ja FP-potkureilla. (Kongsberg Maritime 2021.)



Kuva 2. ULE-potkurilaite ala-asennossa (Kongsberg Maritime Finland Oy sisäinen tietokanta 2021).

ULE-potkurilaitteita on saatavilla eri kokoisina eri sovelluksiin. Näiden potkurilaitteiden koko vaihtelee tehon mukaan ylettyen 880 kW tehosta aina 5000 kW asti. Kongsberg Maritimen valmistamien ULE-potkurilaitteiden teknisiä tietoja on esitelty kuvassa 3. Yleisesti nämä potkurilaitteet suunnitellaan ja varustellaan EtO (Engineer to Order) tyyppisesti asiakkaan tarpeiden mukaan.

ULE-potkurilaitteista on myös vielä erikseen Combi-malleja, jotka ovat niin sanottuja yhdistettyjä potkurilaitteita, jotka yhdistävät ULE- ja tunnelipotkurilaitteen toiminnot. Niillä voidaan ajaa normaalin ULE-potkurilaitteen tapaan potkurilaitteen ollessa ala-asennossa tai potkurilaitte voidaan nostaa yläasentoon, jossa se toimii tunnelipotkurilaitteena.

	VERTICAL DRIVE MOTOR (TYPE ULE/ULE COMBI)						
	ULE 155P12	ULE 155P14	ULE 205	ULE 255	ULE 305	ULE 355	ULE 60
Max. input power kW (non DNW)	1100	1300	2000	2500	3300	3800	5000
Max. input power kW (DNW)	880	950	1500	2200	3000	3700	5000
Input speed rpm	900- 1000	800- 900	720- 750	720- 750	720- 750	720- 750	720- 750
Prop. dia mm	1800	2000	2500	2800	3000	3500	3800
Weight tons	18	25	32	43	70	97	120
Open water thrust (kN)	195	232	355	458	577	701	890

Kuva 3. ULE-potkurilaitteiden tekniset tiedot (Kongsberg Maritime, PDF-dokumentti 2021).

4 POTKURILAITTEEN SÄHKÖNOSTO

4.1 Nostotapojen vaihtoehdot

Opinnäytetyön tavoite on löytää hydraulnostolle korvaava sähkönoston toteutus-tapa tai päätyä syyhyn, miksi nykyistä hydraulnostoa ei tarvitse korvata. Potkuri-laitteelle sähköinen nostolaitteisto voidaan toteuttaa monien erilaisten konseptien mukaisesti. Meriveden läheisyydessä toimivat sähköiset komponentit kuitenkin voivat aiheuttaa ongelmia sähkönoston toteutuksessa, jos niiden toimintaa ei turvata. Sähkömoottorin ja vaihteen ollessa kuivassa tilassa on kuitenkin varaudut-tava veden pääsyyn kuivaan tilaan runkoputken tiivisteiden välistä. Sähkölaittei-den toiminta taataan kuivassa tilassa tarpeellisella koteloinnilla, eli ne tiivistetään soveltuvan IP-luokituksen mukaisesti. IP-luokitus eli Ingress protection tarkoittaa kansainvälistä kotelointiluokitusta, joka määrittää laitteen pölyn- ja vedensietoi-suuden (International Electrotechnical Commission 2021). IP-luokitukset perus-tuvat IEC 60529 -standardiin. Koteloinnin avulla sähkölaitteiden tulisi sietää me-riveden roiskeet. Tälle toteutukselle soveltuva IP-luokitus on IP 55. Tällöin lait-teen tulisi sietää pölyisen olosuhteen lisäksi alhaisen paineen vesiroiskeet.

Ensimmäisenä tutkittavana sähkönoston toteutuksen vaihtoehtona on nykyistä nostotapaa jäljittelevä sähkönosto käyttäen sähkösylintereitä. Sähkönostolait-teisto poikkeaa hydraulnostolaitteistosta energianlähteen ja laitteiston rakenteen osalta. Nostotapahtuma tulisi kuitenkin olemaan samankaltainen sähkönostolait-teistoa käyttäessä. Hydraulnoston jäljittely sähkösylintereillä olisi kohtuullisen edukasta, sillä tällöin nykyisen hydraulisen nostotavan toimivaksi todettuja omi-naisuuksia voidaan jäljitellä laajalta osin. Tällöin myös potkurilaitteen rakenne ei tarvitsisi laajempaa uudelleensuunnittelua.

Toinen sähkönoston toteutustapa olisi mahdollista toteuttaa käyttäen nostojärjes-telmässä ruuvitankoa. Pohjakaivonkannen päälle tulisi asettaa laakeripesä, johon kiinnitettäisiin potkurilaitteen nostava ruuvitanko. Ruuvitanko lävistäisi pohjale-vyn, johon on asetettu staattinen kuularuuvi. Kuularuuvin pyöriminen ruuvitangon mukana estetään, joka määrittää pohjalevyn liikkeen ylös tai alas riippuen

ruuvitangon pyörimissuunnasta. Potkurilaitteen muut nostettavat ja laskettavat osat ovat kiinnitetty pohjalevyyn, jolloin pohjalevy määrittää potkurilaitteen liikkumisen ylä- tai ala-asentoon samalla tavalla kuin nykyisessäkin nostossa. Tästä nostotavasta olisi myös toinen mahdollinen toteutustapa, jossa ruuvitanko olisi staattinen osa. Tällöin pohjalevyssä olevaa laakeria tulisi pyörittää sähkömoottorin voimin, jolloin pohjalevy nousisi tai laskisi riippuen laakerin pyörimissuunnasta. Toteutuksen idea on samankaltainen kuin sähkösylinteriä käyttävä. Sähkömoottorin muodostama pyörivä liike muunnetaan toimilaitteen lineaarisesti liikkeeksi. Koska ruuvitankoa ei voida hyödyntää ohjaavana tukena, tulee potkurilaitte tukea myös ulkoisilla ohjaintangoilla. Ruuvitangolla toteutettavan noston toimintavarmuus likaisissa olosuhteissa voi kuitenkin muodostua ongelmalliseksi. Lika ruuvitangon pinnalla tai kuularuuveissa luo ylimääräistä kitkaa ja altistaa pintojen nopeamman kulumisen, joka voi lyhentää nostolaitteen käyttöikää tai aiheuttaa ennenaikaisen hajoamisen (Thomson 2021). Ruuvitanko olisi kuitenkin mahdollista suojata metallisilla teleskooppisilla suojuksilla tai kumisilla haitarimaisilla suojuksilla.



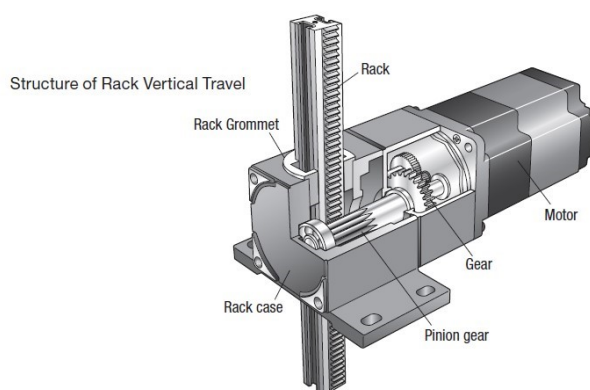
Kuva 4. Teleskooppinen suojus ruuvitangolle (Hennig 2021).

Teleskooppisen suojuksen käyttö potkurilaitteessa voi olla haasteellista, sillä ruuvitangon tulisi olla suojattuna pohjalevyn molemmilla puolilla. Suojuksen käyttö edellyttää niille tarvittavan tilan kasaantumiselle. Suojat kasaantuvat kokoon suojatun alueen pientyessä ja alueen suurentuessa suojat levittäytyvät. Lisäksi suojuksen täytyisi olla pinnoitettu korroosionkestäväksi.

Kolmaskin sähkönoston toteutuksen vaihtoehto hyväksikäyttää sähkömoottorin pyörivän liikkeen muuttamista lineaarisesti liikkeeksi. Nosto toteutetaan

pyörittämällä sähkömoottorilla hammaspyörää. Hammaspyörä on kosketuksissa hammastankoon. Hammaspyörän pyöriessä nostettava laite liikkuu hammastankoa pitkin tangon suuntaisesti. Hammaspyörän pyörimissuunta määrittää laitteen liikkumissuunnan joko alas- tai ylöspäin.

Kyseisen nostolaitteen sähkömoottori ja hammaspyöräyksikkö kiinnitettäisiin pohjalevyn päälle. Hammastangot ovat laitteistossa staattinen osa, jotka kiinnitetään pohjakaivonkannen ja laivan rungon välille. Hammastangot itsenäen eivät luo riittävää tuentaa potkurilaitteen yläosalle, joka edellyttää lisätuennan tarpeen. Potkurilaitteen yläosan tuenta toteutettaisiin ohjaintangoilla. Alaosan tuenta on mahdollista toteuttaa pohjakaivossa olevilla ohjaintangoilla tai käyttämällä pohjakaivon reunoihin hitsattuja kulmarautaohjaimia. Combi-potkurilaitteiden ollessa yläasennossa pohjakaivossa olevat ohjaintangot aiheuttavat virtausvastusta, jolloin on tutkittava, onko kannattavampaa käyttää kulmarautaohjaimia potkurilaitteen alaosan tuentaan. Tällöin pohjakaivo saataisiin vapautettua tukirakenteista.



Kuva 5. Hammaspyörälaitteisto (Orientalmotor 2021).

Poiketen kuvasta (Kuva 5) nostolaitteen toteutus potkurilaitteessa hammaspyörällä ja hammastangolla vaatii suuremmat hammasvälykset ja kestävämmät osat liikutellakseen potkurilaitteen massaa. Osien kestävyys saadaan taattua karkaisulla. Karkaisua käytetään parantamaan osien kovuutta ja vahvuutta (Bodycote 2019). Tämä nostolaite kokonaisuus on yksinkertainen ja kompakti rakenteeltaan, sisältäen vain pienen määrän osia (Tang 2019). Negatiivisena ominaisuutena tässä nostolaitteistossa on joustavuuden puute. Nostolaitteella saavutetaan

esitellyistä konsepteista heikoin tarkkuus, sillä potkurilaitteen korkeutta voidaan säätää vain hammasvälyksien mukaan. Nostoliikkeen ollessa kuitenkin tarkkuutta vaatimaton, voidaan tätä konseptia silti pitää kelvollisena vaihtoehtona.

Hammaspyörällä ja hammastangolla toteutettava nosto edellyttää potkurilaitteen moduulien uudelleensuunnittelua. Hammastangot tullaan kiinnittämään pohjakai-vonkannen ja laivan rungon välille. Hammaspyörät ja sähkömoottoriyksikkö kiinnitettäisiin pohjalevyyn. Potkurilaitteen välisosassa olevat ohjaintangot tulee sijoittaa uuteen paikkaan pohjakaivonkannen päälle tukemaan laitteen nostoa yläosassa. Potkurilaitteen alaosan tukeminen tapahtuisi pohjakairossa joko ohjaintankojen tai kulmarautaohjainten avulla.

Ruuvitangolla toteutettava nostolaitteisto vaatii laajan pohjakaivonkannen uudelleensuunnittelun, jotta sähkömoottori ja ruuvitanko laakeripesineen saataisiin kiinnitettyä siihen. Pohjakaivonkannen rakenteen muutos vaikuttaa myös mahdollisesti siihen kiinnitettäviin osiin. Yleisellä tasolla pohjakaivonkannen uudelleensuunnittelu ei kuitenkaan ole suuri työ sen rakenteen ollessa yksinkertainen. Lisäksi pohjalevyn rakenne tulisi muuttumaan. Rakenteelliset muutokset ovat välttämättömiä, jotta ruuvitanko saadaan lävistämään pohjalevykokonaisuus. Ruuvitankoa välittävät kuularuuvit tulee kiinnittää pohjalevyyn ruuvitangon lävistypisteisiin. Potkurilaitteen alaosan tuenta pohjakairossa tulisi toteuttaa samankaltaisesti kuin hammaspyörää nostomekanismina käyttävässä konseptissa. Ruuvitankoa käyttäessä tulee potkurilaitteen yläosan tuenta vahvistaa ohjaintangoilla ruuvitankojen ollessa riittämättömät yläosan tuennalle.

Sähkösylintereillä toimiva sähkönosto saadaan toteutettua useamman konseptin mukaisesti. Sähkösylinterien käyttöä voidaan verrata nykyiseen hydraulisynterien avulla toteutettavaan nostoon näiden toimintojen ollessa samankaltaisia. Sähkösylintereitä käyttäessä laajempia rakennemuutoksia potkurilaitteen moduuleihin ei edellytetä. Suurimmat muutokset tulisivat koskemaan sylinterien kiinnitystä ja yhteensopivuutta olemassa olevien osien ja sähkösylinterien välillä.

Tärkeänä ominaisuutena nostettavan potkurilaitteen nostolaitteistolle on sen lukitseminen. Lukitseminen saadaan tehtyä joustavimmin sähkösylintereitä ja

ruuvitankomekanismia käyttämällä. Näissä lukitus mahdollistetaan itsenäisesti mihin vain asemaan jarrun avulla. Hammaspyörää käyttäessä tulee lukinta mahdolliseksi vain hammasvälien määräämiin asemiin. Potkurilaitteen nostoliikkeessä tulee lukinta tapahtumaan kuitenkin vain liikeradan ääriasentoihin.

Nostomekanismien käyttö yhteisesti kahdessa eri potkurilaite kokoluokassa vaatii nostomekanismeilta joustavuutta. Hammaspyörää käyttäen saavutetaan esiteltyistä mekanismeista heikoin tarkkuus (Tang 2019). Hammaspyörää käyttäessä yhtenäistäminen kahden eri laitekoon välillä muodostuisi hankalaksi samoja toimilaitteita käyttäen. Yhtenäistäminen ruuvitankomekanismin avulla on mahdollista. Yhtenäistämässä tulee kuitenkin ottaa huomioon ruuvitankomekanismin heikko kyky luoda kustannustehokasta toteutustapaa pitkälle liikeradalle (Tang 2019). Sähkösylintereitä käyttäessä mahdollistetaan laitteiston ja sen toiminnan joustavuus ja mukautuvuus (Zaske 2021). Laitteiston toiminnan joustavuus on oleellista laitteiston yhtenäistämässä kahden potkurilaite kokoluokan välille.

Esiteltyjen kolmen nostomekanismin toteutuksen ominaisuuksia, etuja ja haittoja tulee verrata. Näiden vertailujen pohjalta saadaan potkurilaitteen noston toteutukselle valittua soveltuvin nostomekanismi. Näistä ominaisuuksista on kerätty lyhyt yhteenveto vertailutaulukkoon (Taulukko 1.)

Taulukko 1. Nostomekanismien vertailutaulukko (Luciano 2021; Tang 2019).

	Sähkösylinteri	Ruuvitanko	Hammastanko
Edut	Tarkkuus. Liikkeen, nopeuden, iskupituuden muokkaus. Hiljainen, välitön diagnostiikka, skaalautuva voiman tarpeeseen	Tarkkuus, toistettavuus. Kuularuuvien mahdollisuus pitää kuormaa päällään. Saavutettavissa pitkä iskupituus liisäämättä osia.	Yksinkertainen rakenne, vähäinen osien määrä. Yksinkertainen toiminta. Karkaisulla varmistetaan osien lujuus.
Haitat	Moottorit voivat olla suuria, alkukustannukset suuria, ei sovellu kaikkiin käyttöoloihin	Laitteiston korkeat kustannukset. Hidas nostoliike. Pinta-ala vaatimus.	Tarkkuus ja väljyys. Tuennan vaatimus. Osien kuluminen. Pinta-ala vaatimus.

Eri mekanismeilla ja noston toteutustavoilla on omat etunsa ja haittansa. Taulukossa 1 on esitetty pintapuolisesti näiden esiteltyjen nostomekanismien etuja ja haittoja. Parhaimman nostomekanismin valinta muodostuu käyttökohteen mukaan (Tang 2019). Nostotavoista parhaaksi nähty sähkönoston toteutustapa potkurilaitteelle tulee tarkemman käsittelyn alle. Valinta parhaasta nostomekanismista potkurilaitteen nostolle pohjautuu omaan arvioon.

4.2 Sähkönoston toteutustapa

Toimeksiantajan puolelta sähkönostolle ei ole rajattu tiettyä toteutustapaa, joka halutaan toteuttaa. Sähkönoston edellytetään olevan kilpailevien valmistajien laitteistoja parempi sekä sillä toivotaan saavutettavan kilpailuetua. Lisäksi tavoitteena uudella nostolaitteistolla on saavuttaa tuotannon kustannusetuja ja hyötyjä yrityksen toiminnan eri osa-alueisiin. Esitellyistä sähkönoston konsepteista valitaan yksi, jota tarkastellaan tarkemmin sen toiminnan, kuin myös eroavaisuutensa puolesta nykyiseen nostolaitteistoon verrattuna.

Nostettavan potkurilaitteen perusedellytyksiin kuuluu laitteiston anturointi paikannmittausta varten. Anturoinnilla saadaan määriteltyä potkurilaitteen sen hetkinen sijainti. Esiteltyjen sähkönoston toteutuksien välillä anturoinnissa ei ole suurta eroa. Toteutuksien paikoitusta ja potkurilaitteen liikettä voidaan seurata absoluuttiantureilla ja rajakytkimillä. Absoluuttiantureilla saadaan seurattua pyörivän liikkeen kierrosmäärää ja kohdennettua laitteen tarkka sijainti ilman ulkoisia sensoreita (Tang 2019). Rajakytkimillä saadaan seurattua laitteiden liikkeitä ääriasennoista toiseen sekä asetettua tietyt raja-arvot liikeradoille. Raja-arvoja lähestyttäessä tai ylittäessä saadaan muun muassa liike pysäytettyä. Rajakytkimet toimivat nostolaitteessa niin sanottuna turvapiirinä. Nykyisen hydraulinnoston nostoliikkeiden seuranta on toteutettu rajakytkimillä. Hydraulinnostossa rajakytkimet määrittävät lukituslaitteiden auki- ja kiinni olon sekä määrittävät onko potkurilaitte ylä- vai ala-asennossa.

Nykyisessä toteutuksessa potkurilaitteen lukitus tapahtuu ohjaintangoissa ja pohjakaivonkannen päällä olevilla ulkoisilla lukituslaitteilla vain potkurilaitteen

ääriasentoihin. Sähkösylintereitä käyttäessä lukitus mahdollistetaan sähkömoottorin yhteydessä olevalla jarrulla, jonka avulla sylinteri saadaan lukittua mihin tahansa asentoon liikeratansa alueella. Sähkösylinterin jarru saadaan avattua sähkövirralla. Jarrun lukitseminen tapahtuu katkaisemalla virta jarrulta. Vikatilanteessa sähkövirran katketessa jarru tulee myös lukittumaan. Lopullisen sähkösylinterikonseptin varmistuessa tulee tutkia sähkösylinterin jarrun jarruvoiman riittävyys potkurilaitteen pidolle. Jarruvoiman ollessa liian alhainen tulee ulkoiset lukituslaitteet pitää potkurilaitteessa varmistamassa lukituksen kestävyys. Jarruvoiman riittävyys tulee huomioida mahdolliset lisärasitteet, jotka voivat esiintyä esimerkiksi jäälohkareen osuessa potkurin lapaan.

Opinnäytetyön tarkemman tarkastelun kohteeksi on valittu sähkönoston toteutus käyttäen sähkösylintereitä nostolaitteina. Sähkösylinterit mahdollistavat monipuolisen ja joustavan tavan toteuttaa potkurilaitteen nosto erilaisien konseptien mukaisesti. Sähkösylinterit takaavat energiatehokkaamman laitteiston niiden vaatiessa virran vain toimintoja ajaessa sekä mahdollistaen hukkaenergian talteenoton. Sähkösylinterien iskupituuden muokkaaminen ja itsenäinen lukittautuminen mahdollistavat niiden käytön eri kokoluokan potkurilaitteissa.

4.3 Potkurilaitteen noston toiminta

ULE-potkurilaitteen nosto ja lasku nykyisellä nostolaitteistolla tapahtuu seuraavasti. Kun potkurilaite halutaan laskea alas tai nostaa aluksen pohjakaivon sisälle, käynnistetään lasku- tai nostoprosessi komentosillalta käsin. ULE-potkurilaitteessa moottori on asennettu vertikaalisesti, joka mahdollistaa sen, ettei moottoria, eikä vetoakselia tarvitse irrottaa noston tai laskun ajaksi. Laite vapautetaan lukituksesta ja lasketaan ala-asentoon, jossa laite lukitaan paikalleen ja siitä tulee käyttövalmis. Nostettaessa potkurilaite vapautetaan lukituksesta ja nostetaan ylös, missä se lukitaan myös paikalleen yläasennossa. Lasku- ja nostovaiheessa potkuria ei käännetä eikä käytetä, sillä kaikki toiminnot ajetaan aina eri aikaan.

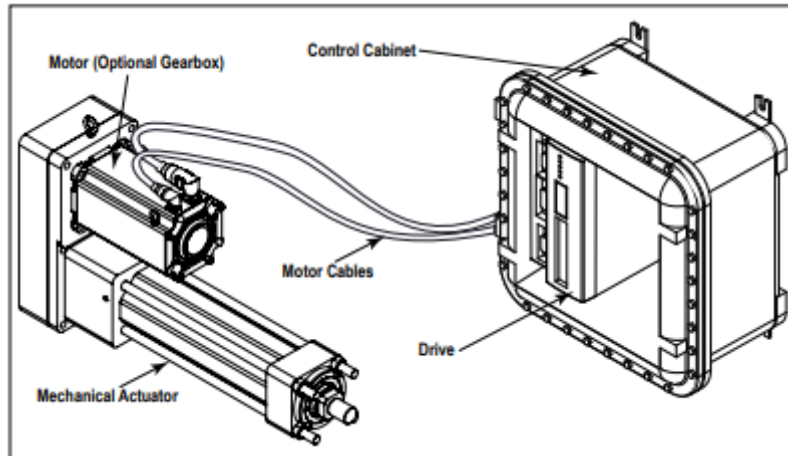
ULE-potkurilaitteiden nostolaitteiston muutos hydraulisesta sähköiseksi muuttaa nostolaitteiston rakennetta ja toimintaa. Nostolaitteiston toimintatapa kuitenkin

jäljittelee nykyistä toteutusta eikä nostossa ilmene suuria eroavaisuuksia. Nostolaitteiston uudistuksen myötä myös nostolaitteiston ohjaus tulee uudistumaan. Sähköisen nostolaitteiston ohjauksesta tulee joustavampi verrattuna nykyiseen hydraulinoston ohjaukseen. Sähköisen nostolaitteiston ohjauksella pystytään määrittämään toimilaitteiden iskupituutta, toimintanopeutta, kiihtyvyyttä ja hallitsemaan lähtövoimaa (Tolomatic 2020). Uuden nostolaitteiston ohjauksen joustavuuden osana esiintyy myös sähkösylinterien mahdollistava lukitus mihin tahansa asentoon sylinterin liikeradan alueella.

Toimeksiantajan toimesta tutkittavaksi ehdotettiin myös uuden sähkönostolaitteiston sähkömoottorin toiminnasta konseptia, jossa sähkömoottoria, jota käytetään potkurilaitteen nostoon, käytettäisiin myös potkurilaitteen kääntöön. Konseptissa sähkömoottorin rikkoutuessa, kumpikaan nostosta tai kääntämisestä ei toimisi, joka jättäisi laitteen jumiin sen hetkiseen tilaan. Sähkövirran katketessa jarrulta jarru tulisi myös lukitsemaan sylinterin paikoilleen. Hyvien suunnitteluperiaatteiden puitteissa yhdelle laitteelle asetetaan vain yksi toiminto, tällöin useampi toiminto ei ole riippuvainen yhdestä laitteesta. Vaihtoehtoisesti sähkömoottori on mahdollista kahdentaa laitteiston toimintavarmuuden turvaamiseksi. Tätä sähkömoottorin käytön konseptia ei kuitenkaan huomioida opinnäytetyössä konseptin kehityksen ollessa keskeneräisessä vaiheessa.

4.4 Sähkösylinterin rakenne ja toiminta

Sähkölineaariaktuaattori, toisella yleisemmällä nimityksellä sähkösylinteri on sähkö- tai servomoottorilla ohjattava sylinteri. Sähkösylintereillä sähkömoottorin pyöriävä liike muutetaan sylinterin lineaariseksi liikkeeksi. (DGRelectriccylinder 2019.) Sähkölineaariaktuaattorin rakenne poikkeaa valmistajasta ja käyttökohteesta riippuen. Sähkösylinterikokonaisuuteen kuuluu karkeasti rajattuna sähkömoottori, jarru, vaihteet, sylinterin runko ja männänvarsi. Tässä opinnäytetyössä perehdytään sähkösylintereihin, jotka ovat kuularuuvilla välitetyjä ja kolmivaihe sähkömoottoreilla ajettavia. Kuvassa 6 on esitelty esimerkki sähkösylinterijärjestelmän rakenteesta.



Kuva 6. Sähkösylinterijärjestelmän rakenne (Tolomatic 2020).

Sähkösylinterin toiminta on kohtalaisen yksinkertainen. Sähkömoottori pyörittää moottorin sisällä olevaa akselia, jonka pyörivä liike muunnetaan kuularuuvivälityksellä männänvarren lineaariseksi liikkeeksi. Kuularuuvin pyöriminen akselin kanssa on estetty, jolloin kuularuuvi liikkuu lineaarisesti akselin suuntaisesti. Tällöin akselin pyörivä liike saadaan muutettua männänvarren lineaariseksi liikkeeksi. Riippuen akselin pyörimissuunnasta sylinteri joko työntää tai vetää. (DGRelectriccylinder 2019.)

Tässä sovelluksessa sähkösylinteriä ohjataan kolmivaiheisella vaihtosähkömoottorilla. Yleisesti sähkösylintereitä ajetaan askel- ja servomoottoreilla (Heason Technology Ltd. 2020). Tässä sovelluksessa ei kuitenkaan vaadita toimilaitteen äärimmäistä tarkkuutta, jolloin voidaan käyttää yksinkertaisempaa ja edullisempaa sähkömoottoria.

4.5 Sylinterien mitoitus ja vaatimukset

Hydraulisyylinterit korvaavat sähkösylinterit tulee mitoittaa vaatimusten mukaisesti. Sähkösylinterit tullaan tilaamaan kolmannelta osapuolelta, joka mitoittaa ja varmistaa sylinterin lujuuden. Kuitenkin tätä sylinterien korvausta täytyy lähteä kartoittamaan potkurilaitteen valmistajan puolelta, jotta voidaan määrittää tarvittavat spesifikaatiot sylinterin valmistajalle. On määriteltävä tarvittava nostovoima,

liikerata, olosuhteet ja muut rakenteiden rajoittavat ominaisuudet. Tärkeänä ominaisuutena pidetään kestävyyttä ja toimintavarmuutta vaikeissa olosuhteissa, joka tässä tapauksessa altistaa laitteiston korroosiolle. Veden varassa toimiminen myös vaatii varman tiivistyksen niin sylinterin kuin muidenkin osien osalta potkurilaitteessa.

Samaa sähkösylinteriä ja sähkönoston toteutusta haluttaisiin käyttää eri kokoluokan potkurilaitteissa muun muassa ULE 205- ja ULE 155 -potkurilaitteissa. Sähkönostoa haluttaisiin myös käyttää mahdollisesti UL 205- ja UL 155 -potkurilaitteissa. Jotta sylinterin ominaisuudet ovat riittävät kaikille sähkönostolla toteutettaville laitteille, tulee mitoitus tehdä näistä painavimmalle potkurilaitteelle, joka tässä tapauksessa on ULE 205 CP. Potkurilaitteen nostettava massa tullaan arvioimaan painavimman varustuksen kanssa. ULE 205 CP -potkurilaitte täytettynä öljyllä saa kokonaisuudessaan nostettavaksi massakseen noin 60 tonnia. Nostettavaan massa on sisällytetty potkurilaitteelle tarkoitettu painavin moottori ja mahdollisille lisävahvistuksille ja -laitteille on varattu lisäpainoa. Nostettava massa on hieman yliarvioitu varmistaakseen nostolaitteelta riittävä nostovoima. Nostolaitteilta vaadittava nostovoima saadaan selville kertomalla laitteen nostettava massa nostolaitteiden varmuuskertoimella. Varmuuskerrointa käytetään, koska nostossa ja laskussa ilmenee kitkaa ja muita ulkoisia voimia, joiden määrää on vaikea arvioida kokonaisuudessaan. Nostolaitteiden varmuuskerroin, jota toimeksiantajayrityksessä käytetään, on 1,5. Varmuuskerroin tekee lopullisesta nostettavasta massasta noin 90 tonnia. Potkurilaitteeseen tullaan sijoittamaan kaksi sylinteriä, jolloin yhdelle sylinterille tulee nostettavaa 45 tonnia.

ULE 205 CP -potkurilaitteen liikerata yläasennosta ala-asentoon on 3250 mm. Tämä on sylinterin maksimi liikerata, mutta koska sylinterillä halutaan mahdollisesti ajaa myös pienempien potkurilaitteiden lyhyemmät liikeradat, tulee lukittavuus mihin tahansa pisteeseen tärkeäksi ominaisuudeksi. Sylinterin vaaditaan myös saavuttavan 15 mm/s liikenopeus tälle liikeradalle, jotta ääri-asennoista päästään toimintakykyyn sopivassa ajassa.

Sylinteriltä vaadittava voima nostaa ULE 205 CP -potkurilaitte saadaan laskettua kaavan yksi (1) mukaisesti dynamiikan peruslailla (Hautala & Peltonen, 2016).

Laskussa nostettavaan massa on jo huomioitu kitkojen ja muiden ulkoisten vaikuttavien voimien kumoava varmuuskerroin 1,5.

$$F = m \cdot a \quad (1)$$

$$F = 90\,000 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Laskulla saadaan tarvittavaksi nostovoimaksi $F = 882,9 \text{ kN}$, joka tarkoittaa, että yhden sylinterin nostovoima tulee olla $F = 441,45 \text{ kN}$, olettaen, että nostettava massa jakaantuu tasan näille sylintereille. Edellä mainittujen arvojen perusteella sylinterin valmistaja esitti sylintereille sopivaksi nostovoimaksi 450 kN. Sylinterin valmistaja arvioi nostovoiman muodostamiseksi 15 mm/s liikenopeudella tehontarpeen sähkömoottorilta olevan kyseisessä konseptissa 12–15 kW.

Potkurilaitteelle oletetaan 20 vuoden käyttöikä. On ennustettu, että potkurilaitteelle tulee päivittäin muutamia nosto- ja laskusyklejä. Neljällä nostolla ja laskulla päivässä normaalilla käyttöpäivä määrällä 20 vuoden aikana saadaan $4 \cdot 255 \cdot 20 = 20\,400$ nostoa ja laskua eli yhteensä 40 800 liikettä laitteen eliniän aikana. Nosto- ja laskusyklien määrä päivittäin ei ole vakio, jolloin syklien määrä halutaan myös kertoa varmuuskertoimella. Tässä tapauksessa noin 1,25 varmuuskerroin on riittävä, jolloin saadaan varmistettua, että laite tulee kestävänsä vähintään 50 000 liikettä elinikänsä aikana. Sylinterin valmistajalle käyttömäärän määrittäminen on tärkeää, jotta suunnitteluvaiheessa osien rakenteellisilla ominaisuuksilla pystytään varmistamaan laitteen käyttöikä.

Sähkösylinterin rungon vaaditaan toimivan myös tarvittaessa ohjaavana pintana, jolloin rungon vaaditaan olevan rakenteeltaan tukeva. Ohjaavana pintana toimiva sylinterin runko vaatii hyvän kulutuksenkeston, alhaisen kitkan sekä haponkestävyyden. Kitkan pienentäminen ja kulutuksenkeston parantaminen saadaan mahdollistettua kovakromauksella. Kovakromausta käytetään myös yleisesti männänvarsien pinnoituksissa sen hyvän kulutuksenkeston vuoksi. (Valmistajat 2021.) Sylinterin rungon ja männänvarren kovakromauksen lisäksi voidaan niiden pinnat, jotka ovat kosketuksissa meriveteen pinnoittaa myös haponkestäviksi.

Sähkösylintereissä olevan sähkömoottorin luoma teho välitetään männälle vaihteen kautta. Vaihde sijoittuu pohjalevyn ja pohjakaivonkannen väliin, jossa sille on rajattu tila korkeussuunnassa. ULE 205 -potkurilaitteissa tilaa vaihteelle löytyy 209 mm ja ULE 155 -potkurilaitteessa vain 189 mm. Samaa sähkösylinteri kokonaisuutta käytettäessä näissä potkurilaitteissa tulee sylinterin vaihde suunnitella sopivaksi pienempään väliin. Myös muut rakenteet tulee suunnitella pienemmän laitteen rajoittavien mittojen mukaisesti, jos samaa laitteistoa hyväksikäytetään molemmissa kokoluokissa.

4.6 Sähkönoston yhtenäistäminen tuoteperheelle

Sähkönoston yhtenäistämisen kahden eri potkurilaitte kokoluokan välillä halutaan tutkia. Nostolaitteiston yhtenäistämistä tutkitaan ULE 205- ja ULE 155 -potkurilaitte kokoluokissa. Tutkimuksen alkuolettamuksena on, että yhtenäistämällä saavutettaisiin kustannushyötyjä potkurilaitteiden rakennemuutoksista ja tuotantomäärän kasvusta.

Sähkönoston yhtenäistäminen luo etuja lisäksi yrityksen eri osa-alueiden toimintoihin. Tuoteperheen eri kokoluokkien laitteiden käyttäessä samoja nostolaitte moduuleja saadaan yksinkertaistettua muun muassa suunnittelun, huollon ja myyntin töitä. Suunnittelutyötunnit vähenevät ja suunnittelu muuttuu suoraviivaisemmaksi, mitä modulaarisemmaksi potkurilaitteet saadaan muokattua. Potkurilaitteiden modulaarisuus edistää myös myyntiä, sillä tällöin asiakkaalle saadaan räätälöityä sopiva laitteisto moduulien avulla jo myyntivaiheessa. Haluttujen moduulien ja spesifikaatioiden myötä laitteistosta saadaan esitettyä tarkka tarjous.

ULE 205- ja ULE 155 -potkurilaitteiden nostoliikeratojen ero on suurimmillaan 850 mm. Sähkösylinterien käytön joustavuus saavutetaan PLC-ohjauksen avulla, jolla pystytään määräämään sylinterin iskupituus. Lisäksi iskupituutta pystytään rajoittamaan rajakytkimillä ja muuttamalla sylinterin fyysistä pituutta. Suuremmalle potkurilaitteelle sopivaksi mitoitettu sähkösylinteri on siis täten käyttökelpoinen myös pienemmässä potkurilaitteessa. Huomioon täytyy kuitenkin ottaa EtO-suunnitelumallin mukaisuus, jossa potkurilaitteen tarkemmat spesifikaatiot määritellään

tilauksen yhteydessä. Projektikohtaisesti potkurilaitteet eroavat toisistaan myös nostosylinterien määrässä. Tässä työssä otetaan kuitenkin vain kantaa kahdella sylinterillä toimivaan nostoon.

Fyysisten vaatimusten lisäksi tulee varmistua kustannuksellisesta puolesta. Tullee tutkia, onko kustannustehokasta käyttää samoja sylintereitä eri kokoluokan potkurilaitteissa, vai tulisiko kokoluokille valmistaa yksilölliset sylinterit. Nykyisen nostolaitteiston osien kustannukset ovat karkeasti samaa kokoluokkaa. ULE 155 -potkurilaitteen ollessa fyysisesti pienempi, sen nykyisen nostolaitteiston osien hinnat ovat kuitenkin isompaa ULE 205 -potkurilaitetta noin 16 % korkeampia. Kustannuksiin sisältyy vain nostolaitteiston osat. Osien kustannukset voivat vaihdella riippuen muun muassa toimitusajasta, neuvotteluista sekä kysynnästä.

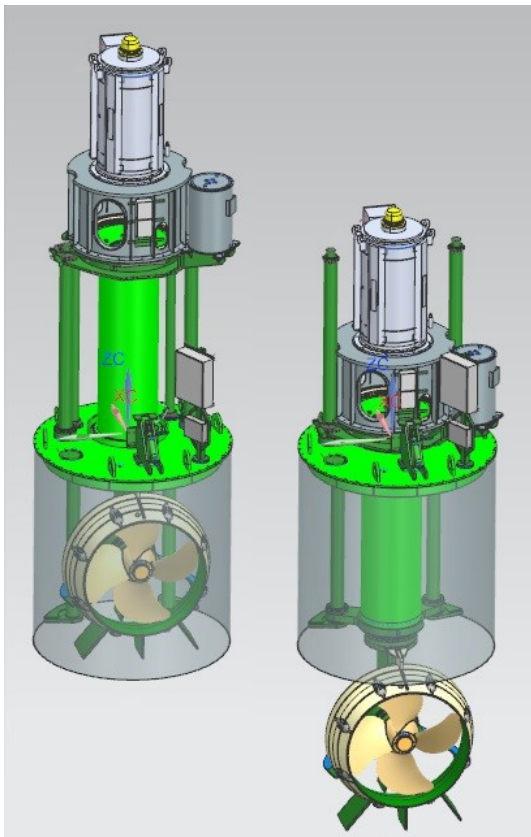
Potkurilaitteiden nykyisten laitteistojen ollessa kohtalaisen saman arvoisia, voidaan päätellä olevan kannattavaa tuottaa samoja sähkösylintereitä molempiin laitteisiin. Kahden eri laitekoon käyttämänä saadaan sähkösylintereitä tilattua suurempi määrä, jolloin isommalla tuotantomäärällä tuotteen kustannuksia saadaan tuotua alaspäin. Pienemmälle potkurilaitteelle olisi mahdollista valmistaa pienemmät sähkösylinterit, jolloin myös näiden hinta laskisi fyysisen kokonsa ja tehontarpeesta johtuen. Tällöin kuitenkin menetetään tuotantomäärästä aiheutuva kustannusten aleneminen. Lisäksi varaosien ja tarvittavien palvelujen määrä tulee kasvamaan uusien laitetyyppien mukana.

ULE 205 CP -potkurilaitteelle valmista konseptia sähkösylinteristä ei vielä tässä vaiheessa ole valmistettu, eikä konseptin kustannuksetkaan ole tiedossa. Sähkönostolaitteiston käyttöönotossa lopullisista kustannuksista on otettava huomioon toimeksiantajan kartoittama kustannussäästöjen mahdollisuus. Sähkösylintereitä käyttäessä toimilaitteina on arvioitu saavan jopa 20 % kustannussäästöjä potkurilaitteen rakennemuutoksista ja volyymin kasvusta. Kartoitus mahdollisista säästöistä on tehty suuremmalle potkurilaitteelle, jonka jälkeen on ennustettu, että pienempiä potkurilaitteita kuten muun muassa ULE 155- ja ULE 205 valmistettaisiin enemmän. Tämän johdosta siirryttiin kehittämään sähkönoston yhtenäistämistä kyseisille laitteille. Pienempien laitteiden suurempi valmistusvolyymi voi luoda kartoitettuja kustannussäästöjä suuremmat kustannusedut.

5 SÄHKÖSYLINTERIEN SIJOITUKSEN SUUNNITTELU

5.1 Sähkösylinterien sijoituksen ongelmat

Nykyisen potkurilaitteen hydraul nostolaitteiston nostosylinterit ovat sijoitettuna pohjakaivoon, jossa niiden tehtävänä on myös tukea potkurilaitteen alaosaa. Hydraulisyylinterit ovat kiinnitettyinä pohjakaivon reunoihin hitsattuihin tukiin. Hydraulisyylinteriestä tulevat männänvarret ovat kuivassa tilassa pohjakaivonkannen päällä kiinnitettynä pohjalevyn alle. Männillä työntäessä pohjalevyä ylöspäin potkurilaite saadaan nostettua ylös pohjakaivoon. Potkurilaite itseksään ei ole tarpeeksi vakaa, jonka vuoksi pohjakaivonkannen ja laivan rungon välille on kiinnitetty ohjaintangot. Ohjaintangot takaavat potkurilaitteen yläosan vakauden noston ja laskun aikana sekä ohjaavat pohjalevyn liikettä. Kuvasta 7 nähdään potkurilaitteen nykyinen kokoonpano sekä potkurilaitteen kaksi asemaa ylä- ja alasennessa.

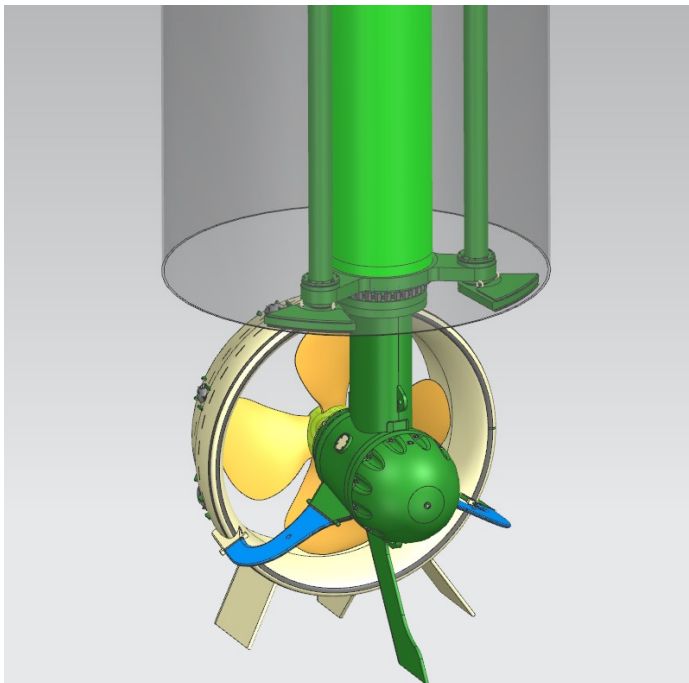


Kuva 7. ULE 155 -potkurilaitteen toiminnallinen kuva ylä- ja alasennessa.

Sähkönoston toteuttaminen sähkösylinterien avulla mahdollistaa noston toteutuksen erilaisten konseptien mukaisesti. Tässä opinnäytetyössä käsitellään vain kahta näistä noston toteutustavoista.

Ensimmäisenä tapana sähkösylinterillä on toteuttaa nosto nykyisen hydraulinosistolaitteiston toiminnan tapaisesti. Hydraulisyliinterit korvataan sähkösylinterillä, jolloin potkurilaitteen rakenne ja noston toimintatapa ei juuri muutu. Noston toteutus nykyisen nostotavan mukaisesti hyväksikäyttää jo nykyisessä toteutuksessa toimivaksi todettuja ominaisuuksia, kuten muun muassa potkurilaitteen tuentaa. Nykyisen potkurilaitteen alaosan tuenta pohjakaivossa on esitetty kuvassa 8 ja potkurilaitteen yläosan nykyinen tuenta näkyy kuvassa 7.

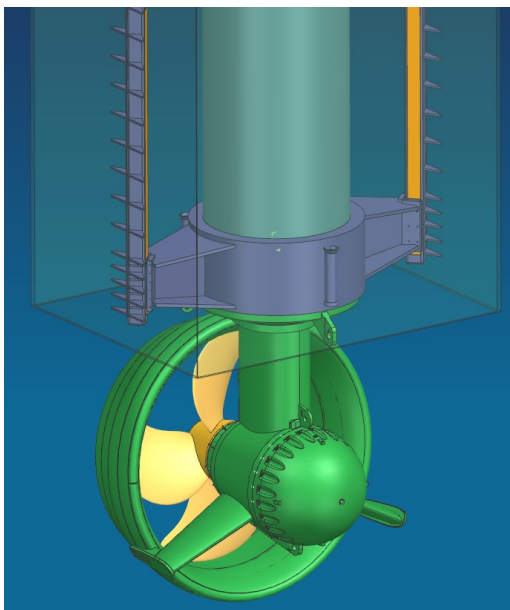
Konseptia toteuttaessa tulee huomioida osien yhteensopivuus. Yhteensopivuuden huomioimisella tarkoitetaan tarvittavien muutoksien tekemistä, jotta uusi sähkönostolaitteisto saadaan yhteensopivaksi potkurilaitteiden muiden osien, kuten muun muassa pohjakaivossa olevien tukien ja tukirenkaan kanssa. Sähkösylinterit tullaan kiinnittämään nykyisten hydraulisyliinterien tapaan alapäästään pohjakaivon reunoihin hitsattuihin tukiin ja yläpäästään pohjakaivonkanteen.



Kuva 8. ULE 205 -potkurilaitte ala-asennossa tuettuna pohjakaivon kylkiin.

Toinen sähkönoston toteutus sähkösylintereillä toimisi kääntämällä noston toiminta päinvastaiseksi nykyisestä. Tällöin potkurilaitteen nosto toimii vetämällä potkurilaitte yläasentoon ja työntämällä ala-asentoon. Sähkösylinterit sijoitettaisiin nykyisten ohjaintankojen paikalle pohjakaivonkannen päälle. Sähkösylinterit ottaisivat ohjaintankojen tehtävän ohjata potkurilaitteen liikettä yläpäässä. Sylinteristä esiin tulevat männät lävistäisivät pohjakaivonkannen ja ne kiinnitettäisiin päästään tukirenkaaseen.

Konseptia käyttäessä tulee tukirenkaan rakennetta tarkastella, sillä nykyisen tukirenkaan läpäisee vain horisontaaliset voimat, eikä se ole tarpeeksi kestävä potkurilaitteen nostoon siitä vetämällä. Potkurilaitteen tuentaa pohjakaivossa tulee myös tarkastella hydraulisynterien poistuessa. Laitteen alaosan tuenta voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla. Yksinkertaisin potkurilaitteen alaosan tuenta saavutetaan käyttämällä tukirenkaan lävistäviä ohjaintankoja, jotka kiinnitetään nykyisten sylinterien tapaisesti pohjakaivon reunoihin hitsattuihin tukiin. Toinen potkurilaitteen alaosan tuennan toteutustapa olisi mahdollista toteuttaa pohjakaivon reunoihin hitsattavilla kulmarautaohjaimilla. Tuennan toteutus kulmarautaohjaimilla on kuvattu kuvassa 9. Tällöin Combi-laitteen ollessa yläasennossa pohjakaivo vapautetaan tukirakenteista, joka edistää Combi-potkurilaitteiden työntöominaisuuksia.



Kuva 9. Potkurilaitteen tuenta pohjakaivon reunoihin kulmarautaohjaimilla.

Potkurilaitteen tuentaa käänteisellä nostotavalla tulee tutkia. Sähkösylinterien ja ohjaintankojen ollessa samassa linjassa potkurilaitteen vääntymistä voi esiintyä. Potkurilaitteen vääntymistä tapahtuu, koska potkurilaitteen keskipainopiste ei ole kohdassa, josta laitetta nostetaan. Tarve lisätä ohjaintankoja tai muuttaa olemassa olevaa tuentaa riittäväksi tulee kartoittaa nostolaitteiston ja potkurilaitteen jatkokehityksessä.

Molemmissa toteutustavoissa esiintyi myös yhteisiä ongelmia uuden nostolaitteiston sijoittamiselle. Pohjakaivonkannen päällä on rajattu tila, joka määrittelee sähkönosto- ja muiden laitteistojen rakenteiden mittoja. Lopullista konseptia ennen tulee tilan kartoituksen avulla suunnitella sähkösylinterikokonaisuuden rakenne sopivaksi. Pohjalevyn ja pohjakaivonkannen välissä oleva tila ala-asennossa määrittelee sähkösylinterin vaihteen maksimi korkeuden. Sähkösylinterin sähkömoottorin ja vaihteen viemä pinta-ala on kohtalaisen suuri, mutta moottorin ollessa vertikaalisessa asennossa saadaan kokonaisuus rajattua pienempään alueeseen. Pohjakaivonkannessa olevat nostokorvat tulevat kuitenkin aiheuttamaan ongelman sähkösylinterikokonaisuuden sijoittelussa. Nostokorvat estävät sähkömoottorin, vaihteen ja kiinnitysalustan kiinnityksen nykyisellä layoutilla. Tämä edellyttää nostokorvien paikoituksen uudelleensuunnittelun.

Käänteinen nosto, jossa männät ovat veden varassa on erittäin altis korroosiolle, sillä sylinterin tiivistys tulee vaikeutumaan huomattavasti. ULE-potkurilaitteet voivat olla jopa 30 metrin syvyydessä merivedessä, jolloin pelkästään jo hydrostaattinen paine on noin 3 baaria. Hydrostaattinen paine altistaa sylinterin tiivistyksen kovalle rasitukselle. Pelkkä sähkösylinterin tiivistys aiheuttaa niin laajan ongelman, että konsepti ei ole toimintavarma vaihtoehto pitkällä aikajanelalla, altistaen sähkösylinterin vuodoille ja korroosiolle tiivisteiden ennenaikaisen kulumisen johdosta. Lähtökohtana potkurilaitteen sähkönoston toteutukselle on asettaa mahdollisimman vähän korroosiolle altista liikkuvaa osaa veden varaan. Näiltä ei voida missään toteutuksessa kuitenkaan välttyä kokonaan, joka korostaa tiivistyksen ja korroosionkeston tärkeyttä laitteistossa.

5.2 Tarvittavat muutokset sähkösylinterien sijoitukselle

Sähkönoston toteutus vaatii useita potkurilaitteen rakenteen muutoksia osille, jotka ovat yhteydessä nostolaitteistoon. Riippuen valitusta sähkönoston konseptista, muutoksien määrä vaihtelee. Nostolaitteiston korvaaminen potkurilaitteessa on yleisesti iso projekti, jolloin pienien yksityiskohtien tutkiminen tässä työssä ei ole mahdollista. Potkurilaitteen jatkokehityksessä koko potkurilaite tulee käsitellyn kohteeksi, jolloin pienetkin yksityiskohdat suunnitellaan uudelleen tai varmistetaan toimiviksi. Tässä opinnäytetyössä perehdytään pintapuolisesti vain osiin, jotka liittyvät nostolaitteistoon. Tärkeämpää tässä vaiheessa on huomata ongelmakohdat ja tehdä niiden suunnitteluun huomiot ja ehdotukset jatkokehitystä varten. Muutokset tulevat koskemaan lähinnä pohjankaivonkantta, tukirengasta, tiivisteitä ja muita kiinnityselimiä, joilla sylinteri ja männät tullaan kiinnittämään potkurilaitteeseen.

Potkurilaitteen alavaihteen ja väliosan moduuleissa sijaitsevien osien koneistetut hydraulilinjat hydraulinosistolaitteille poistetaan, koska uudessa nostolaitteessa näille ei ole tarvetta. Sähkösylinterit ja koko sähkönostolaitteisto ovat rakenteeltaan yksinkertaisempia kuin hydraulinosistolaitteisto. Rakenteen yksinkertaisuus helpottaa kiinnitysten suunnittelua potkurilaitteeseen. Sähkösylinterien kiinnitys riippuu valitusta konseptista. Käänteisessä nostossa sylinterit kiinnitetään yläpäästään laivan runkoon ja alaosaan pohjakaivonkanteen ruuviliitoksia. Nykyistä nostotapaa jäljittelevässä toteutuksessa kiinnitys tapahtuu sylinterien yläpäästä pohjakaivonkanteen ruuviliitoksia ja alaosaan ne kiinnitetään pohjakai-vossa oleviin tukiin.

Hydraulisyliinterit ovat halkaisijaltaan 208 mm. ULE 205 CP -potkurilaitteeseen mitoitettua sähkösylinterin konseptia ei ole vielä suunniteltu, jolloin varmuutta sähkösylinterien halkaisijasta ei ole. Sähkösylinterin halkaisija tulee huomioida uuden nostolaitteen tiivistyksen, laakeroinnin ja kiinnityksen suunnittelussa. Sylinterin halkaisijalla on vaikutusta pohjakaivossa olevien tukien, tukirenkaan ja pohjakaivonkannen reikien halkaisijaan ja välyksiin. Lisäksi tiivisteiden ja liuku-laakereiden materiaalivalinnat pitää tutkia, jotta varmistetaan osien hyvästä

kulutuksenkestosta ja mahdollisimman pitkästä eliniästä. Lopulliset vaadittavat muutokset ja osat, joita muutokset tulevat koskemaan varmistuvat vasta kun lopullinen sähkönoston konsepti on päätetty ja konseptisuunnittelu sylintereille on toteutettu.

Tarkemman tarkastelun alle jatkokehityksessä täytyy huomioida muun muassa ULE 205 -potkurilaitteet, jotka ovat entuudestaan suunniteltu nostettavaksi yhdellä hydraulisynterillä. Yhden sylinterin nosto on määritelty projektikohtaisesti. Sähkösyntereillä tapahtuvaa nostoa ei kuitenkaan ole mitoitettu toimivaksi yhdellä sylinterillä. Yhtä sylinteriä hyödyntävä nosto kuitenkin on mahdollista toteuttaa, kunhan sähkösynterin tuottama voima on riittävä potkurilaitteen nostoon. Projektikohtaisesti potkurilaitteissa voidaan käyttää suurempia sähkö- tai hydraulisyntereitä yksin nostolaitteena, mutta tähän ei oteta kantaa opinnäytetyössä.

5.3 Sähkösynterien sijoitus potkurilaitteeseen

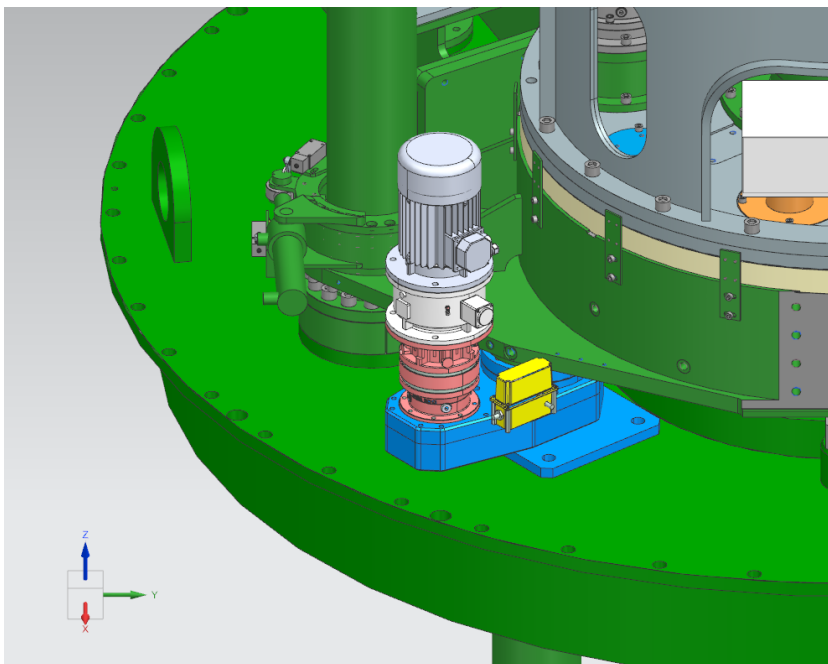
Konsepteja suunnitellessa ja niitä vertaillaessa, työssä päädyttiin tutkimaan sähkönostoa, joka toteutettaisiin nykyisen hydrauliston tapaan. Sähkönostossa hydraulisynterit korvataan sähkösyntereillä, jotka sijoitetaan hydraulisynterien paikoille pohjakaivon veden varaan. Tällöin potkurilaitteen nostolaitteiston yläosa jää nykyisen toteutuksen mukaiseksi, kuitenkin sisältäen pieniä muutoksia. Muutoksia ja suunnittelutyötä on pyritty minimoimaan tällä konseptivalinnalla.

Konsepteja vertaillaessa sylinterin tiivistys asettui yhdeksi suurimmista tekijöistä. Hydrostaattisen paineen aiheuttama rasitus tiivistykselle vaikeuttaa huomattavasti tiivistyksen toimintavarmuutta, altistaen sen ennenaikaiselle kulumiselle. Nykyisen toteutuksen mukaisesti tiivistys ei altistu tällaiselle paineelle. Tämä johti toteutuksen nykyisen nostotavan mukaisesti suunniteltavaksi. Tämä helpottaa potkurilaitteen alaosan tuennan suunnittelua, sillä kiinnitys pohjakaivon reunoihin tapahtuisi nykyisen toteutuksen tapaisesti. Kyseistä noston toteutustapaa käyttämällä myös tukirenkaan ja muiden liikkuvien osien rakenteelle ei tarvitse tehdä suuria muutoksia.

Pohjakaivonkansi on yksi suurimmista yksittäisistä kokoonpanoista potkurilaitteessa. Nykyisen nostotavan mukainen sähkönoston toteutus tulisi pitämään pohjakaivonkannen rakenteen kohtalaisen samanlaisena. Konsepteja suunniteltaessa, käänteisen noston toteutustapa olisi muokannut pohjakaivonkannen rakennetta laajasti. Pohjakaivonkanteen olisi tullut muutoksia sylinterien, mäntien ja ohjaintankojen sijoituksen myötä. Nämä tekijät vaikuttaisivat pohjakaivonkannen jäykistykseen, jolloin kannen jäykistys tulisi tehdä uudelleen ja todeta riittäväksi lujuuslaskennalla. Vaikka pohjakaivonkannen rakenne tulisi muuttumaan, ei pohjakaivonkannen uudelleensuunnittelu ole haasteellista toteuttaa sen rakenteen ollessa yksinkertainen. Kuten aiemmin mainittu, pohjakaivonkannen muutoksilla on vaikutusta myös siihen kiinnitettävien osien ja pohjakaivonkannen yhteensopivuuteen. Lähtökohtaisesti uuden nostolaitteiston toteutuksesta aiheutuu osien ja komponenttien yhteensopivuuksille välttämättömiä muutoksia. Uuden noston toteuttamisella muilta laajemmilta potkurilaitteen moduulien rakennemuutoksilta vältytään.

Sähkönostolaitteistossa oleva vaihde ja laitteiston kiinnitysalusta vievät suurimman tilan pinta-alallisesti. Nämä nähdään mallissa sinisellä värillä (kuva 10). ULE 205 -potkurilaitteen pohjalevyn ja pohjakaivonkannen välissä on 209 mm tilaa, kun taas ULE 155 -potkurilaitteessa on vain 189 mm, joka määrittelee vaihteelle sallitun maksimaalisen korkeuden. Pohjakaivonkannen päällä olevia hydraulilaitteita tullaan poistamaan, joka luo lisää tilaa sähkönostolaitteistolle. Toteutuksessa kuitenkin sähkömoottori ja jarru asennetaan vertikaalisesti kiinnitysalustan päälle, jolloin ne vievät minimaalisen pinta-alueen pohjakaivonkannen päältä.

Pohjakaivonkannen päälle kiinnitetyt nostokorvat ovat tuotantoa ja potkurilaitteen asennusta varten. Näistä korvista pohjakaivonkantta saadaan nostettua turvallisesti. Nostokorvat jäävät pysymään myös asennuksen jälkeen kannessa kiinni. Nostokorvat ovat kuitenkin rajoittamassa sähkömoottorin ja kiinnitysalustan paikoitusta. Nostokorvien uusi paikka tulisi mitoittaa ja suunnitella, jotta ne eivät estä sähkösylinterin kiinnitystä. Alla on kuvattu mahdollinen sähkönostolaitteiston sijoittaminen pohjakaivonkannen päälle, josta on poistettu yksi nostokorva, joka törmäsi vaihteen ja kiinnitysalustan kanssa (Kuva 10).



Kuva 10. Sähkönostolaitteiston sijoitus pohjakaivonkannen päälle nykyisen hydraulisynterin kiinnityspaikalle.

Potkurilaite on todettu vakaaksi ja hyvin tuetuksi molemmissa ääriasennoissa nykyisellä toteutuksella. Tätä kokonaisuutta on tällöin helppo hyväksikäyttää ja varmistua toimivasta kokoonpanosta vakauden ja tuennan osalta. Potkurilaitteen nykyisen tuennan käyttö uuden nostolaitteiston kanssa vähentää huomattavan määrän suunnittelutyötunteja. Uuden sähkönoston ja nykyisen tuennan toimivuus yhdessä tulee kuitenkin tutkia jokaisessa laitekoossa erikseen.

5.4 Sähkönoston toiminnan varmistaminen

Sähkösynterien ja nostolaitteiston toimivuus pitkällä aikavälillä on tarpeellista tutkia luotettavuuden ja toiminnan varmistamiseksi. Kyseiset sähkösynterit halutaan toimivan potkurilaitteen käyttöajan eli 20 vuotta. Potkurilaitteen kokoisia laitteita ei voida varsinaisesti testata kokonaisuudessaan, eikä pienemmän skaalan prototyyppinä luoda testauksia varten. Laitteiston ylläpidon takaamiseksi tulee laitteistolle kehittää myös kunnossapito- ja kunnonvalvontasuunnitelma.

Laitteita käyttäessä vaihtelevissa lämpötiloissa ja korroosiolle altistavassa ympäristössä on tarpeellista varmistaa sähkösylinterien ja muiden laitteiden toiminta kyseisissä olosuhteissa. Sylinterien tulee ylläpitää toimintonsa vaihtelevissa lämpötiloissa ja olosuhteiden vaihtuessa. (Industrial Devices 2022.) Toiminta varmistetaan vaikeissa olosuhteissa niihin soveltuvilla materiaalivalinnoilla ja pinnoituksilla. Nostolaitteita voidaan käyttää maailmanlaajuisesti, eli toimintavarmuus tulisi taata niin kylmissä kuin lämpimissä ympäristöissä. Sähkösylinterien ja muiden osien maalaukset ja pinnoitukset tulee myös tarkistaa ennen käyttöä projektikohtaisesti määritellyllä tavalla. Nämä tarkistukset tehdään tuotantovaiheessa.

Sähkökomponentit tulee testata ennen käyttöönottoa. Testausten kohteina ovat muun muassa virtalähde, virtajohdot, signaalikaapelit ja ohjaussignaalit. Sähkömagneettinen yhteensopivuus tulee testata standardien mukaisesti (Industrial Devices 2022). Tarkoittaen, että sähkölaitteiden tulee toimia luotettavasti toimintaympäristössään täyttäen standardien määräämät vaatimukset. Sähkömagneettinen yhteensopivuus EMC (Electromagnetic compatibility) määräytyy IEC 61000 -standardiperheen mukaisesti. Sähkömagneettisen yhteensopivuuden testaukseen IEC 61000 -standardiperheessä kuuluu muun muassa standardeja:

- IEC 61000-4-2: Electrostatic discharge immunity test
- IEC 61000-4-4: Electrical fast transient/burst immunity test
- IEC 61000-4-5: Surge immunity test

Lisäksi laitteiden tulee sisältää CE-merkintä. Tässä tilanteessa, jossa sähkölaitteet tilataan kolmannelta osapuolelta ovat he valmistajana vastuussa sähkölaitteiden testauksista ja toimivuuden varmistamisesta sekä tarpeellisista merkkauksista, kuten muun muassa CE-merkinnästä. Sähkölaitteiden toiminta meriveden läheisyydessä sekä asennus telakan epäpuhtaissa tiloissa varmistetaan jo aiemmin mainitulla IP-luokituksella eli laitteiden, kuten sähkömoottorin kotelointiluokituksella.

Käyttöympäristössään sähkösylinterit voivat altistua erilaisille kemikaaleille ja öljyille. Nostolaitteistossa varsinkin hydraulioöljy ja konehuoneessa mahdollisesti oleva diesel tai muut voiteluaineet eivät saisi vahingoittaa nostolaitteiston osien

pintoja. Sylinterien tulisi kestää erilaisia kemikaaleja, jonka varmistamiseksi sähkösylintereille tehdään kemikaalisia testejä. Kemikaalisissa testeissä sylinterit altistetaan asianmukaisille kemikaaleille (Industrial Devices 2022). Sähkösylinterit ja männät kovakromataan sekä vähintään vedessä olevat osat myös pinnoitetaan haponkestäväksi. Pinnoituksella pyritään välttämään kemikaaleista aiheutuvia haitallisia vaikutuksia laitteiden ja osien pinnoilla.

Nostolaitteistolle tulee tehdä niin mekaanisia-, kuin myös rasiustestauksia ennen kuin sylinterit asennetaan paikoilleen. Sylinterien mekaanisiin testauksiin lukeutuu muun muassa värinä- ja iskutestauksia (Industrial Devices 2022). Testauksilla varmistetaan, ettei esimerkiksi sähkösylinterin välys hakkaa kuularuuviin johtaen kuularuuvien ennenaikaiseen mekaaniseen rikkoutumiseen. Sylinterien linjaus on myös oleellisessa roolissa nostolaitteiston eliniän takaamisessa. Sylinterin oikea linjaus tulee varmistaa asennusvaiheessa. Epäonnistunut linjaus voi aiheuttaa kuularuuvien epätasaista kulumista (Thomson 2021). Jos edellä mainituissa testeissä ilmenee ongelmia, tuottaa se mahdollisesti sylinterin tai nostolaitteistossa olevien komponenttien mekaanisen kulumisen ennenaikaisesti, eikä siinä tapauksessa laitteiston tavoiteltu käyttöikä toteudu.

Sylinterien lukitustoiminnot tulisi testata ennen käyttöönottoa. Testauksissa tulisi varmentua siitä, että sähkösylinterin jarru pystyy pitämään potkurilaitteen nostettavan massan päällään. Jarrun toiminnot myös vikatilanteessa tulisi testata, jotta varmistutaan oikeanlaisesta toiminnasta virran katketessa. Lisäksi testauksissa tulee varmistua siitä, että sylinterillä saadaan ajettua potkurilaitte ääriasetoihinsa. Sylintereiden tulee olla ohjattavissa niiden asennusvaiheessa myös potkurilaitteen linjausta varten.

6 SÄHKÖNOSTON VERTAILU HYDRAULINOSTOON

Hydrauli- ja sähkönoston ominaisuuksien vertailu ja analysointi on tärkeä osa nostolaitteiston toimilaitteen valintaprosessia. Vertailussa tullaan saamaan molempien toteutuksien etuja ja haittoja esille, joiden perusteella pystytään tekemään johtopäätöksiä laitteiston uudistuksen suhteen.

Hydraulisyliinterit vaativat hydrauliöljyn toimiakseen. Hydraulisyliintereihin pumpataan hydrauliöljyä, joka luo paineen sylinterissä. Paine sylinterissä saa männän liikkumaan. Nykyisessä toteutuksessa hydrauliöljyä ohjataan sylinteriin ja pois sylinteristä paine- ja on/off -venttiilien kautta. Hydraulinosistolaitteistoon kuuluu muun muassa monia venttiilejä, hydraulipumppu ja sähkömoottori. Hydraulisyliinterin toimintavarmuus riippuu sen kunnossapidosta. Hydraulisyliinterin tärkein toiminnan edellytys on puhdas hydrauliöljy ja hydrauliöljyn paineen ylläpito. Lika ja muut hydrauliöljyyn kuulumattomat partikkelit vaikuttavat sylinterin ja muiden hydrauliliikkakomponenttien toimintaan ja elinikään altistaen hydraulilaitteiston ennenaikaiselle rikkoutumiselle (Hydraulics Online 2019). Sähkösylinterissä tällaista kunnossapidon tarvetta ei löydy. Toimintavarmuus sähkösylinterillä taataan oikeanlaisella linjauksella, käytöllä ja ylläpidolla.

Sähkösylinterin rakenteen ollessa yksinkertaisempi, on myös nostolaitteen asennus yksinkertainen toteuttaa. Sähkösylinterien asennuksessa nostolaite kiinnitetään potkurilaitteeseen, jonka jälkeen sylinteri johdotetaan liittäen sylinteri ohjaukseen ja virtaverkkoon. Laivan päävirtalinja kulkee potkurilaitteelle, josta myös tarpeellinen sähkövirta saadaan sähkönostolaitteistolle. Sähkösylinterin toiminnan ohjaaminen PLC-ohjauksella on suoraviivaista liikkeiden ollessa yksinkertaisia. Hydraulinosistolaitteiston asennus vaatii laajempia toimia. Nostohydraulikassa komponenttien määrä, niiden yhteys toisiinsa ja tehonsiirtoon käytetty hydrauliöljy tekee laitteiston asennuksesta monimutkaisemman sekä enemmän tilaa vaativan verrattuna sähköiseen nostolaitteistoon. (Industrial Devices 2022.) Molempien laitteistojen anturointi kuitenkin on yksinkertainen.

Sähkösylinterillä toimiva sähkönosto valittiin sen etuihin ja joustavuuteen perustuen. Sähkönostolaitteiston joustavuus ja sen luomat edut muodostavat

edistyksellisemmän kokonaisuuden hydraulisylintereillä toteutettavaan nostoon verrattuna. Sähkösylinterien ajaminen ja lukitseminen mihin tahansa asentoon mahdollistaa sylinterin käytön monissa erilaisissa toteutuksissa myös UL- ja ULE-potkurilaitte toteutuksien ulkopuolella. Nykyisellä noston toteutuksella potkurilaitte on mahdollista lukita vain sen ääriasentoihinsa ulkoisilla lukituslaitteilla. Sähkönostolaitteistoa suunniteltaessa tulee tutkia ulkoisten lukituslaitteiden tarpeellisuutta potkurilaitteessa. Sähkösylinterikokonaisuudessa olevan jarrun tulee pitää potkurilaitteen nostettava massa jarrun varassa. Suurempien rasitteiden aiheutuessa lukituksen tulee olla riittävä ja estää mahdolliset potkurilaitteen ei-toivotut liikehdinnät. Ulkoisia lukituslaitteita voidaan käyttää myös sähkönoston toteutuksessa turvaamaan potkurilaitteen riittävä lukitus sen ääriasennoissa.

Hydraulisylinterin, tiivisteiden tai muun hydraulikkakomponentin rikkoutuessa on riski hydraulioöljyn vuodolle. Öljyvuodot on pyrittävä minimoimaan ja mahdollisesti eliminoimaan. Öljyvuoto voi aiheuttaa sylinterissä paineen alenemisen, jolloin sylinteri ei toimi kuten suunniteltu. Paineen aleneminen voi aiheuttaa sylinterin tehon menetyksen. Paineen kadotessa potkurilaitte alkaa valua alaspäin männän vetäytyessä, tämän estämiseksi potkurilaitteessa käytetään ulkoisia lukituslaitteita. Lisäksi öljyvuodot voivat aiheuttaa konehuoneessa epäpuhtautta ja vaaratilanteita sekä aiheuttaa merivedessä ympäristölle haittaa. Sähkösylinterit ovat lähes öljyttömiä, jolloin öljynvuodon mahdollisuus on lähes mitätön. (Tolomatic 2020.)

Hydrauli- ja sähkönoston vertailulle edukasta on vertailla nostolaitteistossa käytettyjen sylinterien yleisimpiä ja tärkeimpiä ominaisuuksia. Samassa yhteydessä esitetään sylinterien ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä. Toimilaitteiden ominaisuuksia, eroja ja yhteneväisyyksiä esitellään taulukossa (Taulukko 2). Taulukossa esiteltyjä tietoja on kerätty useista ulkoisista lähteistä, haastatteluista ja käytetty toimeksiantajayrityksen nykyisen laitteiston tietoja.

Taulukko 2. Sähkö- ja hydraulisyylinterin vertailu (Goluba 2001; Industrial Devices 2022; Luciano 2021; Majumdar 2003; Norrhydro 2021; Zaske 2021).

	Sähkösyylinteri	Hydraulisyylinteri
Kokoonpano	Yksinkertainen johdotus, rakenne ja kiinnitys. Sähkömoottori voi olla iso.	Vaatii paljon hydraulisia komponentteja, tilan vaatimukset
Tarkkuus	Erittäin tarkka, toistettavuus jopa ± 0.0127 mm, sijaintitieto absoluuttianturilla	Asennon paikantaminen ääri-asennoissa rajakytkimillä, ei tarkkaa sijaintitietoa
Ohjausjärjestelmä	Yksinkertainen PLC-ohjaus ja toiminta. Voidaan ohjelmoida nopeasti	Sovelluksesta riippuva PLC-ohjauksen monimutkaisuus. Nykyinen noston sekvenssi suoraviivainen.
Luotettavuus	Vähäinen huollon vaatimus, sähkön katketessa lukittuu, välitön data diagnostiikasta ja ylläpidosta	Öljyn puhtaus määrittelee, venttiilien jumiutuminen, ei laajaa diagnostiikkaa, komponentteja ei seurata
Nostovoima	Jopa 2 000 kN, molempiin suuntiin. Voimantarve sovellukselle täyttyy.	Tuottaa erittäin suuria voimia. Voimantarve sovellukselle täyttyy.
Nostonopeus	Nopeus ja voima ohjattavissa PLC:n avulla. Vaatimus n. 15 mm/s toteutuu.	n. 15 mm/s nostonopeus, hydraulikka paine- ja on/off -venttiileillä.
Elinajanodote	Väärinkäyttö, voitelun puute, ylikuumentuminen, vähäinen huollontarve	Öljyn puhtaus, tiivisteiden eheys, hydr. komponenttien kuluminen, voitelun puute
Ympäristö	Puhdas, energiatehokas, hiljainen, kylmänkestävyys, toimii hankalissa olosuhteissa	Öljyvuodot kriittisiä, toimii likaisissa ja märissä olosuhteissa, öljyn lämmitys kylmässä
Käyttökustannukset	Alhaiset käyttökustannukset, helppo asentaa ja ylläpitää	Kallis asennus ja ylläpito. Kunnonvalvonta. Säännölliset huollot
Hyötysuhde	80 – 90 %, energian talteenotto mahdollista	Sylinterin hyötysuhde 90 – 95 %, hydraulilaitteiston hyötysuhteen ollessa 40 – 55 %

Nykyisessä hydrauliston toteutuksessa komponenttien toimintaa ei seurata, eikä niiltä kerätä laajempaa diagnostiikkatietoa. Hydraulista nostotapahtuman logiikkaa ohjataan sensoreilla. Hydrauliston sekvenssi on saatu yksinkertaiseksi yksinkertaisen anturoinnin ja logiikan ohjauksen myötä. Sähkösyylinteriä käytettäessä on mahdollista kerätä komponenteilta ja sylinterin toiminnasta aktiivisesti

dataa ja diagnostiikkatietoja. Sähkösylinterit toimivat suljetussa piirissä tietojen keräämisen helpottamiseksi (Tolomatic 2020). Sähkösylinterien ohjaus PLC:n ja rajakytkimien avulla on yksinkertaisempi hydrauliston sekvenssiin verrattuna. Rakenteen ollessa yksinkertaisempi ja nostoon tarvittavien komponenttien määrän ollessa vähäisempi noston aikaisia toimintoja tulee vähemmän toteutettavaksi yksinkertaisten sähkösylinterien ohjauksen.

Monet tekijät vaikuttavat hydraulisynterien hyötysuhteeseen ja tehokkuuteen, mukaan lukien lämpötila, paine, tiivisteiden eheys ja järjestelmävuodot (Zaske 2021). Sähkösylinterin hyötysuhteen aleneminen aiheutuu muun muassa kitkasta ja ylikuumenemisesta. Kyseisessä sovelluksessa ei kuitenkaan liiallista lämpenemistä pääse tapahtumaan kummallakaan sylinterityypillä normaalissa toiminnassa. Sähkösylintereitä käyttävä nostolaitteisto on hydraulisyntereitä käyttävää energiatehokkaampi. Hydraulisynterit muodostavat hukkaenergiaa laitteiston vaatiessa öljynpaineen ylläpidon. Öljynpaineen ylläpito vaatii moottorin ja pumppun päälläolon. Sähkösylinterin ollessa lepotilassa paikan pitäminen jarrun avulla ei vaadi sähkömoottorilta virtaa. Virran tarvetta esiintyy vain ajotoimintojen aikana sähkösylintereitä käyttäessä. (Tolomatic 2020.) Sähkösylinterit mahdollistavat myös energian talteenoton (Norrhydro 2021). Energian talteenotolla tarkoitetaan hukkanergian, kuten esimerkiksi lämpöenergian talteentottoa. Talteen otettua energiaa voidaan uudelleenkäyttää laitteiston toimintoihin.

Nostolaitteiston käyttöympäristöllä on vaikutusta toimilaitteelta vaadittuihin ominaisuuksiin. Sähkösylintereille ominaista on parempi kylmän sietoisuus. Sähkösylinterit voidaan voidella olosuhteisiin tarkoitettulla voiteluöljyllä. Voitelulla säävytetaan toimintojen normaali ylläpito vaikeissa olosuhteissa, kuten kylmässä. Sähkösylinterit ovat yleisesti voideltu koko eliniäkseen, mutta tarvittaessa huolto-toimenpiteenä ne voidaan uudelleen voidella. Hydraulisynterien toiminta on riippuvainen hydraulioöljyn lämpötilasta. Liian korkea öljyn lämpötila voi vahingoittaa tiivisteitä ja nopeuttaa öljyn heikentymistä. Kylmä öljy aiheuttaa hidasta ja epävaakaata toimintaa kunnes öljy lämpenee. (Tolomatic 2020.)

Alkukustannukset sähkösylintereillä ovat suuremmat kuin hydraulisyntereillä. Sähkösylinterien joustavuus yhdistettynä siihen, että sähkökomponenttien hinta

on laskenut tasaisesti vuosien varrella, tekee niistä suositumman valinnan kuin aikaisemmin. (Luciano 2021.) Toimilaitteen eliniän aikaisiin kustannuksiin tulee huomioida laitteen alkukustannuksien lisäksi myös toimilaitteen joustavuus, toimintakyky, hyötysuhde ja käyttökustannukset, jotka sisältävät kunnossapidon. Sähkösylinterin käyttöiän kustannukset ovat kuitenkin huomattavasti pienemmät verrattuna hydraulisyntereihin, jos parempi hyötysuhde, järjestelmän joustavuus, alhaisempi ylläpito, prosessin parannukset ja pienemmät käyttökustannukset otetaan huomioon (Zaske 2021).

Kunnossapidon määrä hydraulisyntereillä on suurempi kuin sähköisillä. Hydraulisynterien optimaalinen toiminta varmistetaan toistuvilla huolloilla, joissa muun muassa vaihdetaan öljyä ja öljysuodattimia. Lisäksi sylinterin tiivisteiden eheys on avain optimaalisen toiminnan saavuttamiseen. Samanlaisia väliajoin tapahtuvia huoltoja ja kunnossapitoa ei sähkösylintereille suoriteta. Männänvarren tiiviste sähkösylintereissä suojaa toimilaitteen sisäisiä komponentteja vedeltä, pölyltä ja muilta ympäristöperäisiltä epäpuhtauksilta. Hydraulisyntereiden tiivisteiltä vaaditaan epäpuhtauksien suojauksen lisäksi paineen ylläpitoa toimilaitteessa. Paineen ylläpito on edellytys toimilaitteen toimintaan. Sähkösylinterin vääränlaisesta linjauksesta aiheutunut epätasainen kuormitus voi aiheuttaa sylinterissä olevien tiivisteiden kulumista ja heikentää kuularuuvien elinikää. Tiivisteiden hajotessa epäpuhtaudet voivat päästä sähkösylinterin sisälle ja aiheuttaa ennenaikaisen vian. Tiivisteiden eheys on siis taattava joka tapauksessa sylinterityypistä riippumatta laitteiston kunnossapidon edellyttämiseksi. (Tolomatic 2020.)

Nykyistä potkurilaitteen hydraulinostoa hydraulisyntereillä on parannettu vuosien saatossa. Pienemmän kitkan saavuttaminen tiivisteiden ja männänvarren välillä on mahdollistettu kovakromauksella, joka on edistänyt tiivisteiden pitkäkestoisuutta ja vähentänyt ennenaikaista kulumista. Nostolaitteistossa osien materiaalien ja pinnoitusten muutoksilla on myös edistetty toimilaitteen toimintaa ja osien elinikää. (Ruostemaa 2022.) Näitä huomioita aikaisemmista ongelmista on hyväksikäytettävä sähkönostolaitteiston suunnittelussa, jotta niiltä vältytään uudessa nostolaitteistossa.

7 TULOKSET JA YHTEENVETO

Opinnäytetyössä haluttiin selvittää, onko olemassa olevan hydrauliston korvaaminen sähkönostolla ULE-potkurilaitteissa kannattavaa ja kuinka sähkönosto toteutettaisiin. Konseptiksi valittiin nykyistä nostotapaa vastaava sähkösylinterillä toimiva sähkönosto, jossa sylinterit sijoitettaisiin pohjakaivoon meriveden varaan. Päätös konseptin valinnasta tehtiin konseptin joustavuuden ja sillä saavutettavien etujen pohjalta. Kyseisellä nostotavalla saadaan edistettyä nostolaitteiston energiatehokkuutta sekä yksinkertaistettua nostolaitteiston rakennetta ja ohjausta. Sähkönostolaitteiston hyötyjä ovat myös vähempi kunnossapidon ja huollon tarve sekä näistä aiheutuvat laitteiston pienemmät eliniän kustannukset.

Kyseisessä konseptissa veden varaan saadaan sijoitettua mahdollisimman vähän liikkuvia osia ja sähkösylinterien tiivistys saadaan varmimmin toteutettua. Potkurilaitteen tuenta nykyisessä nostotavassa on todettu toimivaksi. Tätä hyväksikäyttäen konsepti ei vaadi uuden tuennan suunnittelua sekä konseptia käyttäessä potkurilaitteen muidenkin osien rakennemuutokset jäävät minimaaliseksi.

Opinnäytetyössä esiteltyjen sähkönoston toteutuksien valinnan varmistuttua siirryttiin suunnittelemaan sähkönostolaitteiston yhtenäistämistä eri kokoluokan potkurilaitteissa. Sähkösylinterikonsepti valittiin sen joustavuuden vuoksi, sillä se mahdollistaa samojen sylinterien käytön eri kokoisissa potkurilaitteissa säätämällä sylinterien iskupituutta ja mahdollistamalla sylinterin lukituksen mihin tahansa asentoon liikeratansa alueella. Sähkönoston toteutukselle haluttujen potkurilaitteiden joukosta valittiin joukon painavin potkurilaitte, jonka mukaan sähkösylintereilä vaadittava nostovoima mitoitettiin. Nostettavan massan arvio on hieman yliarvioitu, sillä laitetta ULE 205 CP ei ole koskaan toimitettu asiakkaalle kyseisellä varustuksella, eikä potkurilaitteen lopullista massaa ole varmistettu. Projektikohtaisesti määritellyt spesifikaatiot ja lisävarusteet vaikuttavat lopulliseen potkurilaitteen massaan. Potkurilaitteeseen varattiin painavin moottori, ylimääräistä painoa lisälaitteistolle ja lisättiin öljyn muodostama massa. Arvioinnit laitteen massasta perustuvat olemassa olevien osien ja laitteiden massoihin.

Potkurilaitteen arvioitu nostettava massa on varmistettu 1,5 varmuuskertoimella, jota käytetään nostolaitteistojen varmuuslaskennoissa toimeksiantajayrityksessä

Lähtökohtana nostolaitteistojen yhtenäistämiseksi käytettiin vertailukohteina nykyisiä hydraulinosolaitteita, joiden kustannuksia verrattiin toisiinsa. ULE 205- ja ULE 155 -potkurilaitteiden nykyisiä hydraulinosolaitteiston osien hintoja vertaillessa pienemmän ULE 155 -potkurilaitteen nostolaitteen osat olivat noin 16 % ULE 205 -potkurilaitteen osia kalliimpia. Kustannukset kuitenkin vaihtelevat riippuen monista ulkoisista vaikuttajista, joita ovat muun muassa raaka-aineen hinta, toimitusajat, toimittaja ja kysyntä. Tuloksena nykyisten hydraulinosolaitteiston osien hintavertailussa todettiin olevan mahdollista käyttää samaa sähkösylintereillä toimivaa sähkönostoa kyseisten potkurilaitteiden välillä kustannustehokkaasti ehdon täytyttyä. Ehtona kustannustehokkuudelle on, että sähkönostolaitteiston kustannuksien tulisi saavuttaa enintään sama tai alempi kustannustaso nykyisen ULE 205 -potkurilaitteen hydraulinosolaitteiston kanssa.

Mitoitetulle ULE 205 CP -potkurilaitteelle tarkoitettuja sähkösylintereitä ei ole konseptoitu lopullisesti, jolloin myös lopullisia kustannuksia toimilaitteelle ei ole käytettävissä, joka estää kustannusvertailun nykyisten laitteiden kanssa. Konseptin valmistuessa tulee kustannuksia vertailla, jolloin lopullinen tulos kustannustehokkuudesta saadaan arvioitua. Kustannustehokkuuteen tulee huomioida toimeksiantajan kartoittamat mahdolliset 20 % kustannussäästöt potkurilaitteen rakenneuutoksista ja volyymin kasvusta. Kustannustehokkuuden arvioinnissa on myös huomioitava sähkönostolaitteiston alemmat käyttö- ja kunnossapitokustannukset.

8 JATKOKEHITYS

Opinnäytetyössä kerätyt tiedot esitellään toimeksiantajalle ja niiden pohjalta tehdään esitys sähkönostolaitteiston toteuttamiselle. Jatkokehitysvaiheessa potkurilaitteen osien ja uuden sähkönostolaitteiston yhteensopivuus sekä muut työssä esiin nousseet huomiot otetaan tarkastelun kohteeksi. Tarkastelun kohteina tulee olemaan potkurilaitteen osien rakenteilta vaadittavat muutokset sähkönostolaitteiston integroimista varten potkurilaitteeseen. Sähkönostolaitteiston lopullisen konseptin suunnittelu ja integroiminen potkurilaitteeseen tulee tapahtumaan yhteistyössä nostolaitteiston valmistajan kanssa.

Jatkokehityksessä sähkösylinterien rakenteet tulevat tarkastelun kohteeksi, sillä opinnäytetyön aikana sylinterien lopullisen konseptin mittoja ei ollut saatavilla. Päädyttäessä käyttämään samoja sähkösylintereitä ULE 155- ja ULE 205 -potkurilaitteissa tulee näiden fyysistä kokoa tarkastella. Toteutettavasta konseptista riippuen on huomioitava tilanne, missä sähkösylinterit voivat olla liian pitkiä tullaan esiin pohjakaivosta tai mahtuakseen konehuoneeseen. Alun perin nostolaitteistoa on suunniteltu ULE 205 CP -potkurilaitteelle, jonka pohjakaivo on syvempi kuin ULE 155 -potkurilaitteessa. Tällöin sähkösylinterien mahdollinen esiintulo ULE 155 -potkurilaitteen pohjakaivosta on estettävä joko rajoittamalla sähkösylinterin fyysistä kokoa tai muuttamalla sylinterin kiinnitystapaa.

Tuotannossa pohjakaivonkantta saadaan liikuteltua helpommin ja turvallisesti käyttäen nostokorvia. Nostokorvat ovat kuitenkin tässä tapauksessa paikoitettava uudelleen, sillä kaksi nostokorvista estää sähkösylinterien sijoituksen. Sylinterin kiinnitysalustan ja nostokorvien törmäys estetään niiden uudelleen sijoittamisella. Näille soveltuvat uudet paikoitukset tulee tarkastella potkurilaitteen väliosan kokoonpanoa suunniteltaessa. Nostokorvien uudelleen sijoittelu ja muut pohjakaivonkannen muutokset tulevat olemaan osa jatkokehitystä.

Opinnäytetyössä konseptoidussa sähkösylinterien toimintatavassa sähkömoottorilla toteutetaan vain potkurilaitteen nosto ja lasku. Toimeksiantajan ajatus hyväksikäyttää samaa sähkömoottoria potkurilaitteen nostoon ja kääntämiseen tutkitaan jatkokehitysvaiheessa. Tätä tutkitaan yhteistyössä sähkömoottorin ja

nostolaitteiston valmistajan kanssa. Mahdollinen noston ja käynnön toteutus samalla sähkömoottorilla vaatii laitteistolta hyvän toimintavarmuuden. Toimintavarmuuden saavuttaminen edellyttää sähkömoottorin kahdentamisen tai muun tavan ylläpitää nostolaitteiston toimintakyky vikatilanteessa.

Sähkö- ja hydraulisyliinterien toiminta mahdollisissa vikatilanteissa eroaa toisistaan. Nykyisessä toteutuksessa laitteiston hydraulioiljyn vuotaessa tai sylinterin paineen alentuessa potkurilaitte voi lähteä laskeutumaan, jos se ei ole lukittuna. Koska potkurilaitteen kriittisimmät toiminnot ovat sen ollessa ala-asennossa, on laitteistolle tärkeää mahdollistaa toimintakyvystä riippumatta potkurilaitteen laskeminen ja varmistua laskun turvallisuudesta. Hydraulisyliinterillä tämä on mahdollistettu joko käsipumpulla tai hydrauliiikan kahdentamisella. Laskemisen toimintatapa vikatilanteessa on huomioitava myös sähkönostolaitteiston suunnittelussa. Vikatilanteessa potkurilaitteen lasku turvallisesti on mahdollistettava joko takaamalla moottorin toimintavarmuus esimerkiksi sähkömoottorin kahdentamisella tai erillisellä mekaanisella laskutavalla. Sähkövirran katketessa sylinterien jarru tulee lukittumaan, jolloin oleellinen vaatimus uudelle nostolaitteistolle on mahdollistaa vikatilanteessa jarrun lukituksen ohittaminen, mahdollistaen potkurilaitteen laskun.

Sähkösylinterien jarrun jarruvoima tulee jatkokehityksessä tarkastelun kohteeksi. Potkurilaitteelle oleellista on saada se lukittua ylä- ja ala-asentoon turvallisesti. Sähkönostolaitteistossa olevan jarrun jarruvoima tulee olla riittävä pitääkseen potkurilaitteen nostettava massa päällään lukituksessa. Kuitenkin jarruvoiman riittävyys tulee vaikuttamaan ulkoisten lukituslaitteiden tarpeellisuuteen. Lukituksen saavuttaminen ilman ulkoisia lukituslaitteita vaikuttaa sylinterin rakentamiseen. Jatkokehityksessä siis tutkitaan, tullaanko ulkoisia lukituslaitteita käyttämään jatkossakin potkurilaitteen lukitukseen sylinterin jarrun lisäksi.

Opinnäytetyössä kerätyillä tiedoilla saadaan jatkokehitykselle jo hyvä pohja tiedostetuille ongelmille, joita uuden nostolaitteiston suunnittelussa ja tuotannossa voi ilmetä. Nostolaitteiston uudistamisessa on hyvä varautua suuriin rakenteiden muutoksiin potkurilaitteessa ja myös mahdollisiin odottamattomiin ongelmiin suunnittelu- ja tuotantovaiheessa sekä uuden laitteiston käyttöönotossa.

LÄHTEET

Bodycote 2019. Neutraalikarkaisu. Viitattu 21.2.2022 <https://www.bodycote.com/fi/palvelut/lampokasittely/karkaisu-ja-paasto/neutraalikarkaisu/>

DGRElectriccylinder 2019. Principle of Electric Linear Actuator and How it Works. Viitattu 9.9.2021 <https://www.dgrelectriccylinder.com/electric-linear-actuator-working-principle/>

Goluba, R. 2001. Designing Motion-Control Systems With Electric Cylinders. Machine Design 25.1.2001. Viitattu 25.10.2021 <https://www.machine-design.com/archive/article/21817612/designing-motioncontrol-systems-with-electric-cylinders>

Hautala, M. & Peltonen, H. 2016. Insinöörin fysiikka. Osa 1. Saarijärvi: Saarijärven Offset.

Heason Technology Ltd. 2020. How does a Linear Actuator work? Viitattu 9.9.2021 <https://www.heason.com/news-media/technical-blog-archive/how-does-a-linear-actuator-work->

Hydraulics Online 2019. Viitattu 22.2.2022. <https://hydraulicsonline.com/technical-knowledge-hub/about-hydraulic-cylinders/hydraulic-cylinder-maintenance-and-repairs/>

IEC 60529:1989+AMD1:1999+AMD2:2013 CSV Consolidated version. Degrees of protection provided by enclosures (IP Code).

IEC 61000-4-2:2008. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test.

IEC 61000-4-4:2012. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-4: Testing and measurement techniques – Electrical fast transient/burst immunity test.

IEC 61000-4-5:2014+AMD1:2017. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test.

Industrial Devices (GB) Ltd. 2022. Electric linear actuators. Viitattu 13.1.2022 <http://www.actuators-electric.co.uk/electric-linear-actuators-faqs/>

International Electrotechnical Commission 2021. IP ratings. Viitattu 29.11.2021
<https://www.iec.ch/ip-ratings>

Kongsberg Maritime 2021. Azimuth thrusters. Viitattu 9.9.2021
<https://www.kongsberg.com/maritime/products/propulsors-and-propulsion-systems/thrusters/azimuth-thrusters/>

Kongsberg Maritime 2021. Retractable Azimuth thruster. Viitattu 9.9.2021
<https://www.kongsberg.com/maritime/products/propulsors-and-propulsion-systems/thrusters/azimuth-thrusters/retractable-azimuthing-thruster/>

Luciano, M. 2021. Pros & Cons of Hydraulic, Pneumatic, and Electric Linear Actuators. Progressive Automations 18.3.2021. Viitattu 22.1.2022 <https://www.progressiveautomations.com/blogs/products/pros-cons-of-hydraulic-pneumatic-and-electric-linear-actuators>

Majumdar, S. R. 2003. Oil Hydraulic systems: Principles and maintenance. New York: McGraw-Hill.

Norrhydro 2021. Sähkömekaaniset sylinterit. Viitattu 22.1.2022
<https://www.norrhydro.com/fi/motiomax>

Ruostemaa, E. Sähköpostiviesti 27.1.2022. [Ei saatavilla]

Tang, J. 2019. Benefits of an Absolute Rack and Pinion System. Orientalmotor 2.7.2019. Viitattu 7.12.2021 <https://blog.orientalmotor.com/benefits-of-an-absolute-rack-and-pinion-system>

Thomson 2021. What may cause premature failure of ball screws or ball nuts. Viitattu 22.2.2022 <https://www.thomsonlinear.com/en/support/tips/what-may-cause-premature-failure-of-ball-screws-or-ball-nuts>

Tolomatic 2020. Electric Rod Actuators vs. Hydraulic Cylinders: A comparison of the pros and cons of each technology. Viitattu 24.1.2022 <https://www.tolomatic.com/info-center/resource-details/electric-rod-actuators-vs-hydraulic-cylinders>

Valmistajat 2021. Kovakromaus. Viitattu 12.10.2021 <https://valmistajat.fi/menettelmat/pintakasittely/kovakromaus-2>

Zaske, A. 2021. Comparing Electric and Fluid-Power Actuators. Machine Design 23.4.2021. Viitattu 22.1.2022 <https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/article/21162074/tolomatic-inc-comparing-electric-and-fluidpower-actuators>