



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

TEEMU LEPPÄNEN

Kunnonvalvonnan lisäys potkuri- laitteeseen

KONETEKNIIKAN KOULUTUSOHJELMA
2021

Tekijä(t) Leppänen, Teemu	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Helmikuu 2021
	Sivumäärä 34	Julkaisun kieli Suomi
Julkaisun nimi Kunnonvalvonnan lisäys potkurilaitteeseen		
Tutkinto-ohjelma Konetekniikan koulutusohjelma		
Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia SKF FOS- ja Kongsberg Metapower-kunnonvalvontajärjestelmien lisäämistä Kongsberg UUC 455- potkurilaitteeseen. Lisättyjen järjestelmien antamaa informaatiota hyödynnetään tuotekehityksessä ja Digital Twin-projektissa. Työ tehtiin Kongsberg Maritime Finland Oy:lle.</p> <p>Käytännöntyö suoritettiin NX 9.0 ja SolidWorks suunnitteluohjelmistojen avulla. Työ aloitettiin tutustumalla potkurilaitteiden toimintaperiaatteeseen. Teoriaosuudessa käytiin läpi kunnossapito, kunnonvalvonta ja lisättyjen järjestelmien toimintaperiaatteet.</p> <p>Kehittämällä potkurilaitteista aikaisempaa suorituskykyisempiä ja luotettavampia, yritys voi saavuttaa yhä kilpailukykyisemmän aseman markkinoilla. Luotettavalle sekä helposti ja edullisesti toteutettavalle kunnonvalvontajärjestelmälle on markkinoilla kysyntää.</p> <p>FOS-järjestelmän laakereista lähetettävän informaation testausta varten suunniteltiin kuorirakenne vastaamaan laitteen realistisia muotoja, jota ei kustannussyistä toteutettu standardiosilla. FOS-järjestelmän asennus potkurilaitteeseen tapahtui onnistuneesti ja sen toimivuus testattiin kokoonpanon aikana. Olemassa oleva väliakselin suojateline 3D-mallinnettiin ja FEA-laskettiin. Tulosten perusteella todettiin, että telinettä käytettäisiin osana Metapower-järjestelmän käyttöönottoa.</p>		
Asiasanat Kunnonvalvonta, potkurilaitte, 3D-mallinnus		

Author(s) Leppänen, Teemu	Type of Publication Bachelor's thesis	Date February 2021
	Number of pages 34	Language of publication: Finnish
Title of publication Condition monitoring systems addition to the azimuth thruster		
Degree programme Mechanical engineering		
Abstract <p>The purpose of this thesis was to inspect SKF FOS- and Kongsberg Metapower- condition monitoring systems addition to Kongsberg UUC 455 azimuth thruster. The information provided by the added systems will be utilized in product development and in Digital Twin- project. This thesis was done for Kongsberg Maritime Finland Inc.</p> <p>Practical part of the thesis was done with NX 9.0 and SolidWorks design softwares. It was started by learning how azimuth thrusters are built. In theoretical part of the thesis, maintenance, condition monitoring and principle of added systems were reviewed.</p> <p>By developing the azimuth thrusters more efficient and reliable, the company can achieve increased competitive position on the market. Condition monitoring system that is reliable, easy to install and profitable has demand on the market.</p> <p>Realistic shape shell-structure was designed to test the wireless data transferring from FOS- system bearings, which was more economical than manufacturing of standard parts. Installation of FOS- system to azimuth thruster was successful and tested during the assembly. Input shaft had existing protective rack that was 3D modeled and FEA calculated. Based on the results, the rack could be used as part of the Metapower- system commissioning.</p>		
Keywords Condition monitoring, azimuth thruster, 3D modeling		

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 TOIMEKSIANTAJANA KONGSBERG	2
2.1 Kongsberg Konserni	2
2.2 Kongsberg Maritime	2
2.3 Kongsberg Maritime Finland Oy	3
2.3.1 Historia	3
2.3.2 Rauman toimipiste	4
3 RAUMAN YKSIKÖN TUOTTEET	6
3.1 Potkurilaitteiden esittely	6
3.2 Potkurilaitteen toimintaperiaate lyhyesti	7
3.3 UUC- Potkurilaitteet	8
4 KUNNOSSAPITO	9
4.1 Yleisesti	9
4.2 Kunnossapitolajit	9
4.3 Strategiat	11
4.4 Kongsbergin kunnossapito	12
5 KUNNONVALVONTA	13
5.1 Yleisesti	13
5.2 Kongsberg Maritime Finland Oy:n kunnonvalvonta	14
5.3 Digital Twin (Digitaalinen kaksonen)	16
5.3.1 Yleisesti	16
5.3.2 Digital Twin-Projekti Kongsberg Maritime Finland Oy:ssä	17
6 SKF FOS	18
6.1 Järjestelmän toimintaperiaate	18
6.2 Valokuidun toimintaperiaate	19
6.3 Langattoman tiedonsiirron testaus	20
6.4 Suunnittelu ja mallinnus	22
6.5 Toteutus laitteeseen	23
7 KONGSBERG METAPOWERS	26
7.1 Komponentit	26
7.2 Toimintaperiaate	26
7.3 Ulkopuolisten värähtelyiden vaikutus väännönmittaukseen	28
7.3.1 Heräte	29
7.3.2 Potkurilaitteen pakkovärähtelytaajuudet	29
7.4 Telineen suunnittelu	31

7.5 Telineen ominaisvärähtelytaajuuden määrittäminen simuloimalla.....	32
8 YHTEENVETO	34

LÄHTEET

LIITTEET

KÄSITTEET

CMS	Condition Monitoring System – kunnonvalvontajärjestelmä
DP	Dynamic Positioning – dynaaminen paikannus
DTW	Digital Twin – fyysistä laitetta vastaava vir- tuaalinen kaksonen
FBG	Fiber Bragg Grating - anturityyppi
FEA	Finite Element Analysis - elementtianalyysi
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis - riski- analyysi
FOS	Fiber Optic Load Sensing – valokuitukaape- lilla toteutettu kuormien tarkastelujärjes- telmä
FP	Fixed Pitch – kiinteälapainen potkuri
HT	High Thrust – tuotenimi standardilaitetta korkeamman työntövoiman potkurilaitteelle
Hz	Hertz, hertsi – taajuuden yksikkö
IoT	Internet of Things – teknisten laitteiden au- tomaattinen tiedonsiirto, etäseuranta ja oh- jaus internetin avulla
kW	Kilowatti, tehon yksikkö
LEAN	Ajattelutapa ja johtamisfilosofia, pyrkii minimoimaan tuottamattomia toimintoja
MPa	Megapascal, paineen yksikkö
Rpm	Revolutions per minute – kierrosta minuutissa
US	Underhull Stationary – potkurilaitetyyppi
UUC	Underhull Underwater Complete – potkuri- laitetyyppi vedenalaiseen asennukseen
3D	Three-Dimensional – kolmiulotteinen

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty Kongsberg Maritime Finland Oy:n toimeksiantamana syksyllä 2020 osana Satakunnan ammattikorkeakoulun insinööritutkintoa. Työn ohjasi Satakunnan ammattikorkeakoulun konetekniikan lehtori Jarmo Juuso.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tarkastella kunnonvalvonnan komponenttien jälkiasennusta UUC 455- potkurilaitteeseen. Työssä käsitellään lisättyjä kunnonvalvonnan komponentteja, niiden toimintaperiaatteita ja niiden vaatimia muutoksia potkurilaitteeseen. Kunnossapitoa tarkastellaan kunnonvalvonnan näkökulmasta.

Ennen määräaikaishuoltoa vikaantuva tai hajoava potkurilaitte aiheuttaa taloudellisia tappioita sekä asiakkaalle, että potkurilaitteen myyneelle yritykselle. Tästä syystä kunnonvalvontaa halutaan toteuttaa ja kehittää laitteissa. Tarkasteltava laite on varalaitte, joka vaihdetaan asiakkaan yhden kahdentoista laitteen tilalle.

Opinnäytetyö on osa yrityksen Digital Twin- projektia. Projektin avulla pyritään kehittämään uudenlainen kunnonvalvonnan tuote, jota voitaisiin myydä tulevaisuudessa lisäpalveluna asiakkaalle. Tarkoituksena on asentaa anturi ainoastaan yhdelle akselille ja erilaisten algoritmien avulla seurata koko laitteiston käyttäytymistä.

FOS-järjestelmän laakereista saatavan informaation siirtäminen toteutettiin langattomasti. Muut signaalit ja tehonsyöttö kulkevat potkurilaitteessa jo olemassa olleen liukurenkaan läpi. Työn tavoitteena oli toteuttaa potkurilaitteen kunnonvalvonnan lisäysmekaniikan näkökulmasta. Työstä on rajattu pois järjestelmän käyttöönotto, koska se tapahtuu vasta testattavan potkurilaitteen vaihdon jälkeen tammi- helmikuun vaihteessa 2021.

2 TOIMEKSIANTAJANA KONGSBERG

2.1 Kongsberg Konserni

Kongsberg Våpenfabrikk (Kongsberg Asetehdas) perustettiin alkuvuonna 1814 Poul Streenstrup'n toimesta. Hän halusi luoda uusia työpaikkoja sen ajan Norjaan, joka pyrki itsenäiseksi valtioksi kansan kuitenkin samanaikaisesti taistellessa köyhyyttä vastaan. Vuonna 1892 yrityksen kehittämästä Krag-Jørgensen kivääristä tuli maailmankuuluisa Yhdysvaltojen varustaessaan armeijansa niillä. Tehtaalla valmistettiin ensisijaisesti kyseistä kivääriä ensimmäisen maailmansodan loppuun 1918. (Kongsberg www-sivut 2020a.)

Nykyisin Kongsberg konserni on asiakaskeskeinen organisaatio, joka työskentelee vaativien asiakkaiden kanssa puolustus-, meri-, öljy-, kaasu-, ja ilmailuteollisuudessa. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Kongsbergin kaupungissa Norjassa. Vuonna 2020 yrityksellä oli yhteensä 10,621 työntekijää. Vuoden 2019 liikevaihto oli 24,1 miljardia Norjan kruunua (NOK). (Kongsberg www-sivut 2020a.)

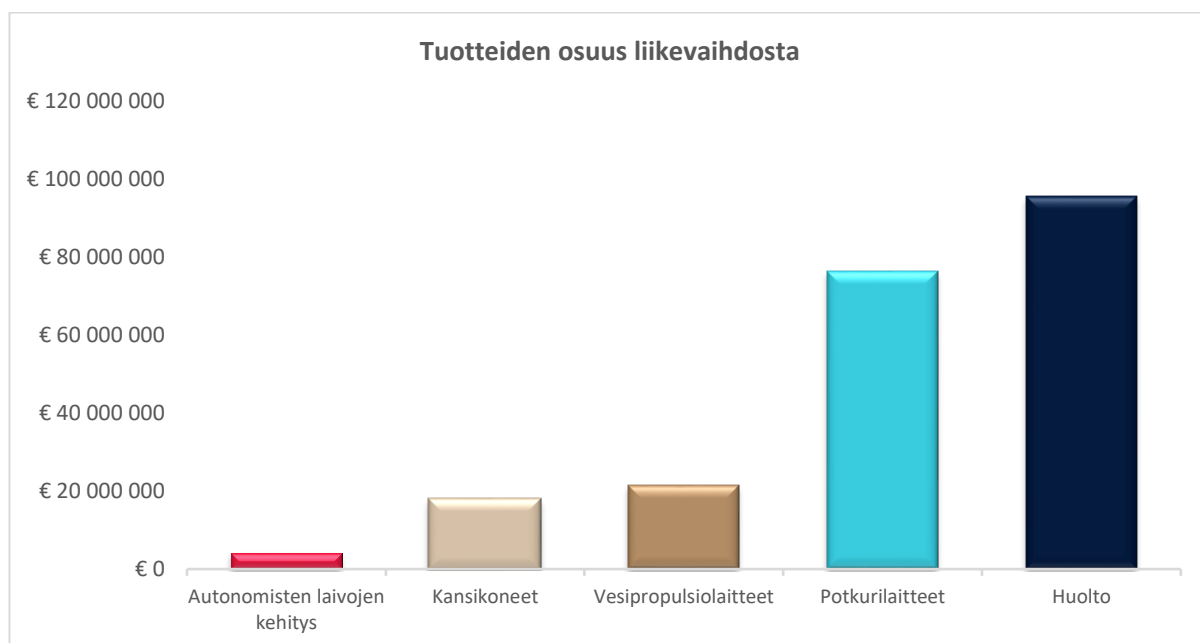
Kongsberg konserni on listattuna Oslon pörssissä. Konserni on jakautunut kolmeen toimialueeseen; Kongsberg Maritime, Kongsberg Defence & Aerospace sekä Kongsberg Digital. Yrityksellä on lisäksi muita pienempiä tytäryhtiöitä. Yrityksen suurin omistaja on Norjan valtio 50,01% omistuksella. (Kongsberg www-sivut 2020a.)

2.2 Kongsberg Maritime

Kongsberg Maritime tuottaa palveluita meriteollisuuden tarpeisiin niin yrityksille kuin sotilaskäyttöön. Yritys tarjoaa yli 150 vuoden kokemuksella ratkaisuja merenkulun haasteisiin. Tuotteet ja palvelut kattavat sekä on-, että offshore- teollisuuden. Yritys tarjoaa lisäksi erilaisia koulutustapahtumia ja ympärivuorokautisen asiakastuen. Kongsberg Maritime:n tuottamia palveluita on käytössä yli 30 000 aluksessa ympäri maailmaa. Vuonna 2019 Kongsberg Maritime:lla oli yhteensä 7275 työntekijää 117 toimistolla 34 maassa. (Kongsberg Maritime www-sivut 2020.)

2.3 Kongsberg Maritime Finland Oy

Raumalla, Kokkolassa ja Turussa toimiva Kongsberg Maritime Finland Oy on osa Kongsberg konsernia. Raumalla valmistetaan pääasiassa azimuth-potkurilaitteita. Toiminta pitää sisällään uudislaitteet, huollon ja myynnin. Kokkolassa keskitytään vesipropulsiolaitteisiin ja Turussa autonomisten laivojen kehittämiseen. Kongsberg Maritime Finland Oy työllisti vuonna 2018 yli 520 henkilöä liikevaihdon ollessa 246M€ (taulukko 1). (Kongsberg Maritime Finland Oy. 2019a, 3.)



Taulukko 1. Kongsberg Maritime Finland Oy:n liikevaihdon rakenne (Kongsberg Maritime Finland Oy. 2019a, 5.)

2.3.1 Historia

Rauman yksikkö juontaa juurensa vuoteen 1945, kun ensimmäiset vintturit valmistettiin. Konepaja Hollming ja kansikonetehtas Rauma-Repola yhdistyivät vuonna 1988 muodostaen Aquamaster-Rauman. Vuonna 1995 Aquamaster-Rauma siirtyi Englantilaisen Vickers plc:n omistukseen. Rolls-Royce plc osti Vickers plc yhtiön kokonaisuudessaan vuonna 1999. Suomalainen FF-JET yhdistyi Rolls-Royceen vuonna 2001. Keväällä 2019 Rolls-Royce Marine plc:n liiketoiminta siirtyi Kongsberg Maritime:n omistukseen. (Kongsberg Maritime:n www-sivut 2020.)

2.3.2 Rauman toimipiste

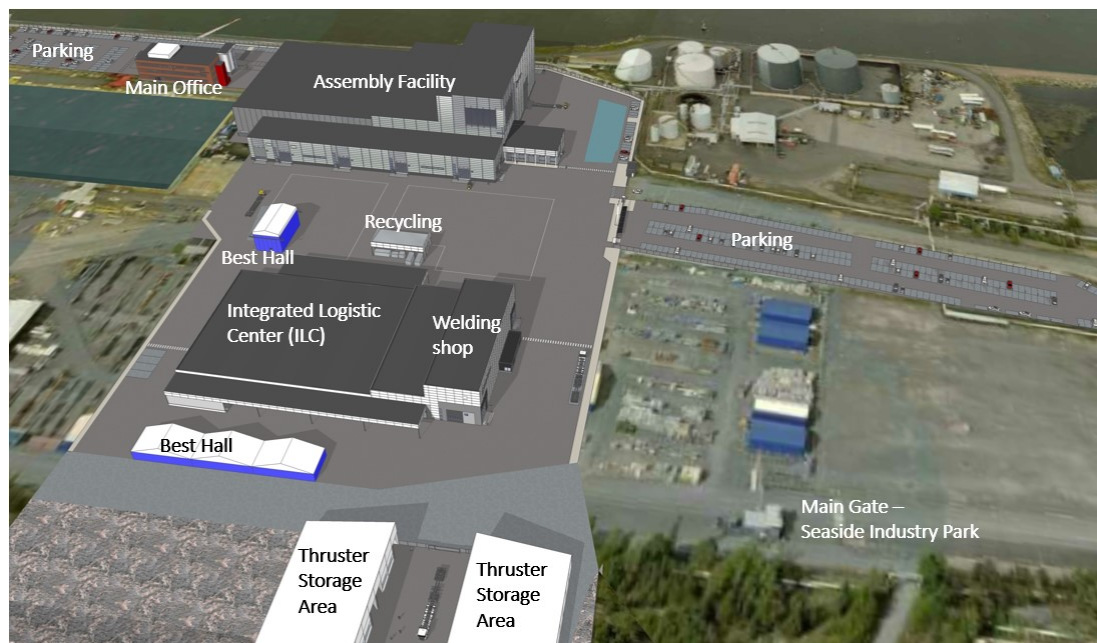


Kuva 1. Rauman telakka-alue, Kongsberg Maritime Finland Oy:n toimitilat ympäröity keltaisella (Kongsberg Maritime Finland Oy. 2019b, 3.)

Potkurilaitteiden toimituskapasiteetti on 600 laitetta/vuosi nykyisellä laitteistolla. Kapasiteettia on mahdollisuus nostaa 900 laitteen vuosituotantoon lisälaitteistoinvestoinneilla. Kokoonpano- ja testauslaitteisto riittävät 200 tonnin kuormille ja 24 metrin pituisille laitteille. Rolls-Royce Plc investoi vuosina 2015-2018 Rauman yksikköön 57.8M euroa. Kaikki työpisteet keskitettiin lähelle toisiaan (kuvat 1 & 2). Yrityksen ajatusmallina on LEAN-ajattelu, jonka tarkoituksena on kasvattaa tuotteiden laatua, lyhentää läpimenoaikaa ja parantaa tuottavuutta. (Kongsberg Maritime Finland Oy. 2019b, 5-6.) LEAN-malli tarkoittaa myös sitä, että tuotteet on myyty, kun niiden valmistus aloitetaan. Tuotteet toimitetaan sovittuna aikana asiakkaalle ilman pitkiä varastointiaikoja. (Laine 2010, 97.)

Huomioitavaa on myös tuotannon pysyminen Suomessa. Syitä ovat:

- Insinööriosaaminen
 - Projektinhallinta
 - Tuotteistaminen
 - Energiatehokkuus, ympäristö
 - Elektroniikka, automaatio- ja tietotekniikka
 - Uusien teknologioiden luominen
 - tuotannon suunnittelu/tehostaminen
- Prosessien kehitysosaaminen
- Globaali hankintaprosessi (Kongsberg Maritime Finland Oy. 2015, 34.)

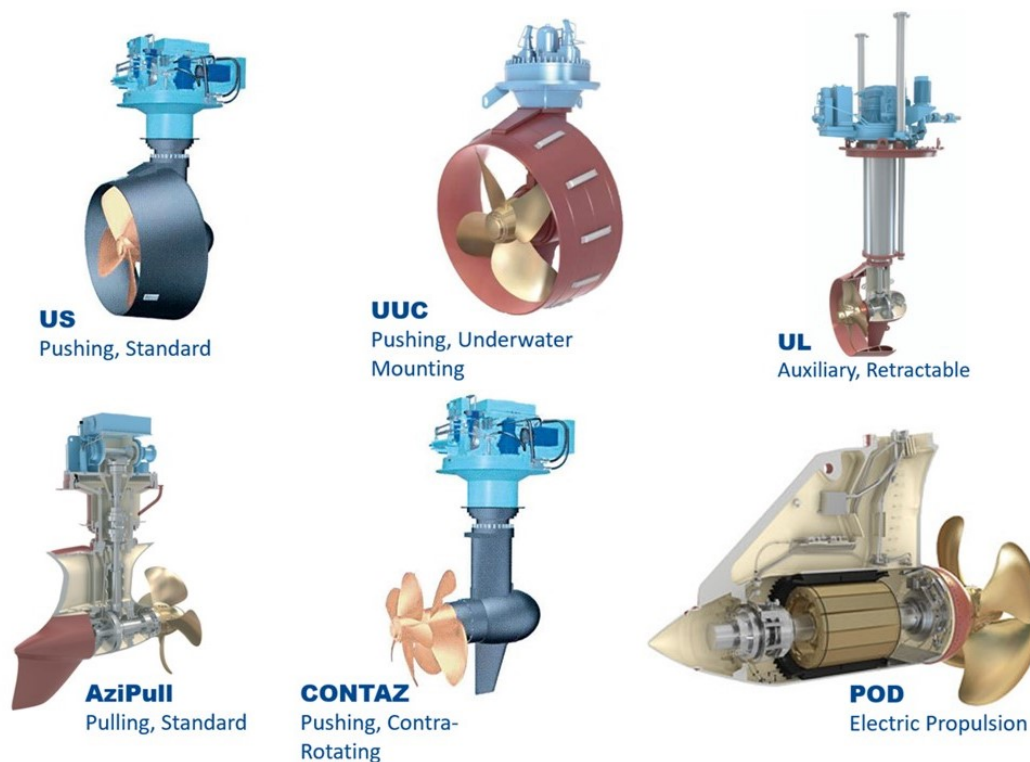


Kuva 2. Kongsberg Maritime Finland Oy:n toimitilat nimettyinä (Kongsberg Maritime Finland Oy. 2019b, 4.)

3 RAUMAN YKSIKÖN TUOTTEET

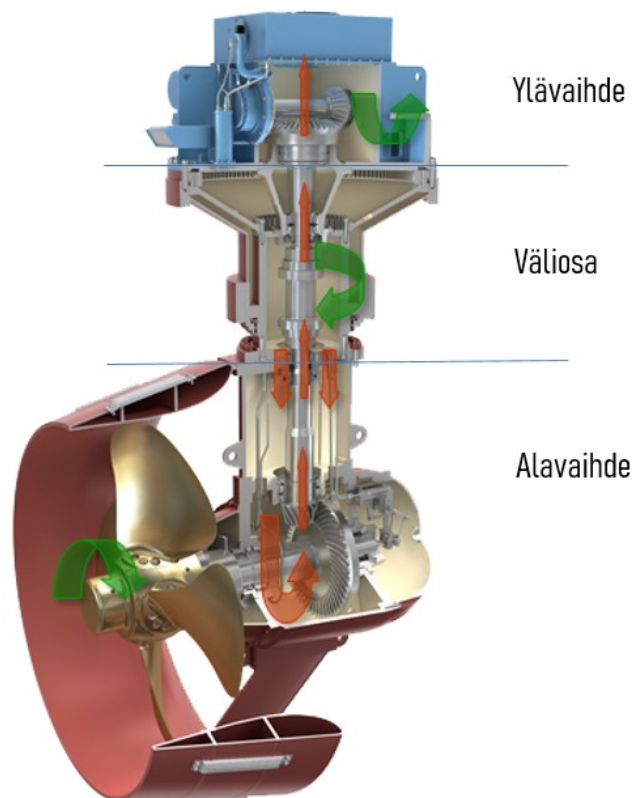
3.1 Potkurilaitteiden esittely

Kompakti potkurilaitte korvaa laivan perinteisen potkurilaittejärjestelmän, johon kuuluvat tyypillisesti peräsin koneistoinen ja akselilinja vaihteistoinen. Potkurilaitteista on kehitetty erilaisia versioita eri käyttötarkoituksiin (kuva 3). Potkurilaitteiden lukumäärä ja sijoitus laivaan on aina tapauskohtaista. Jos esimerkiksi aluksen syväys halutaan matalammaksi, voidaan kaksi isompaa potkurilaitetta korvata neljällä pienemmällä. Tehoalue on pienimmillään 250kW ja jäänmurtajalaitteet yltyvät jopa 7500kW tehoihin. Potkurilaitteiden voimanlähde on tyypillisesti joko diesel-, sähkömoottori tai näiden yhdistelmä. (Kongsberg Maritime Finland Oy. 2012a, 4-14.)



Kuva 3. Yrityksen valmistamia potkurilaitteita (Kongsberg Maritime Finland Oy. 2015, 18.)

3.2 Potkurilaitteen toimintaperiaate lyhyesti



Kuva 4. Potkurilaitteen toimintaperiaate (Kongsberg Maritime Finland Oy. 2019c, 13.)

Potkurilaite koostuu tyypillisesti kolmesta osakokonaisuudesta (kuva 4):

- Alavaihte sisältää potkurin, joka vedessä pyöriessään aiheuttaa työntövoiman. Hammaspyöräparin avulla välitetään energiaa voimanlähteestä potkuriakselille. Hammaspyöräpari toimii vaihteistona muuttaen välityssuhdetta. Pystysuuntaista akselia kutsutaan pinion-akseliksi.
- Väliosan tarkoituksena on mahdollistaa laitteen vapaa pyöriminen pystyakselinsa ympäri. Väliosassa on kääntökehä, jota pyöritetään usealla kääntövaihteella. Kääntövaihteet ovat sähkö-, tai hydraulikkakäyttöisiä.
- Ylävaihteen tarkoituksena on kääntää pystysuuntainen pyöriminen vaakasuuntaiseksi. Ylävaihteessa on kytkin, joka voi olla malliltaan päällä/pois tai luis-tava. Ylävaihdetta ei tarvita, mikäli käytävä moottori sijaitsee laitteen yläpuolella.

Kuvan vihreät nuolet kuvaavat akseleiden pyörimissuuntia. Punaiset nuolet kuvaavat laitteen itsenäiseksi toteutettua sisäistä öljynkiertoa.

3.3 UUC- Potkurilaitteet

UUC-potkurilaitteet (kuva 3) ovat suunniteltu vedenalaiseen asennukseen ilman kuivatelakointia. Tämä ominaisuus on kustannusten näkökulmasta äärimmäisen tärkeä asiakkaille. Kaikki tarvittavat tulpat, sulkulevyt ja -kuvut toimitetaan aina potkurilaitteen mukana laitteen asennusta ja irrotusta varten. Kääntökehä on integroitu potkurilaitteen sisälle. UUC-potkurilaitteen tyypillisiä käyttökohteita ovat puoliuppo öljynporauslautat sekä -laivat, tuotantolaivat ja muut isot laivat. Potkurilaitetyyppejä käytetään usein DP-käytössä, eli potkurilaitteita ohjataan siten, että esimerkiksi öljynporauslautta pysyy porauksen aikana paikoillaan. Aluksiin vaikuttavat merellä esimerkiksi tuuli, virtaukset ja aallokko. UUC-potkurilaitteita on asennettu yhteensä yli 1200 kappaletta erilaisiin käyttökohteisiin ympäri maailmaa. (Kongsberg Maritime Finland Oy. 2012a, 14; Kongsberg Maritime Finland Oy. 2012b, 13.)

UUC-potkurilaitteissa on aina suulake, joka voi olla joko kallistettu tai kallistamaton. Potkuri on tyypiltään FP, eli sen lapakulmat eivät ole säädettävissä. UUC-potkurilaitteiden isoin standardimalli UUC 505 on potkurihalkaisijaltaan 4,5m ja teholtaan 6500kW. Teoreettinen työntövoima on noin 122 tonnia. UUC-potkurilaitteista on kehitetty entistäkin suorituskykyisempiä HT-versioita (kuva 5). Niissä on aikaisempaa isommat potkurihalkaisijat, jolloin sama työntövoima saadaan aikaan pienemmillä kierrosnopeuksilla. HT-potkurilaitteet ovat vaihdettavissa olemassa olevien potkurilaitteiden tilalle (405 => 355 HT, 455 => 405 HT). Energiantarve vähenee tapauskohtaisesti 18,5-23,0%, jonka ansiosta polttoainesäästöt ovat pitkällä aikavälillä merkittäviä. (Kongsberg Maritime Finland Oy. 2018, 12-14.)

Conventional UUC				UUC High Thrust		
Size	Power, kW	Propeller diameter, m	Estimated bollard pull, mtons	Size	Power, kW	Propeller diameter, m
405	4500	3,8	86	355	3800	4,5
455	5500	4,1	103	405	4510	5,0
505	6500	4,5	122	455	5300	5,5

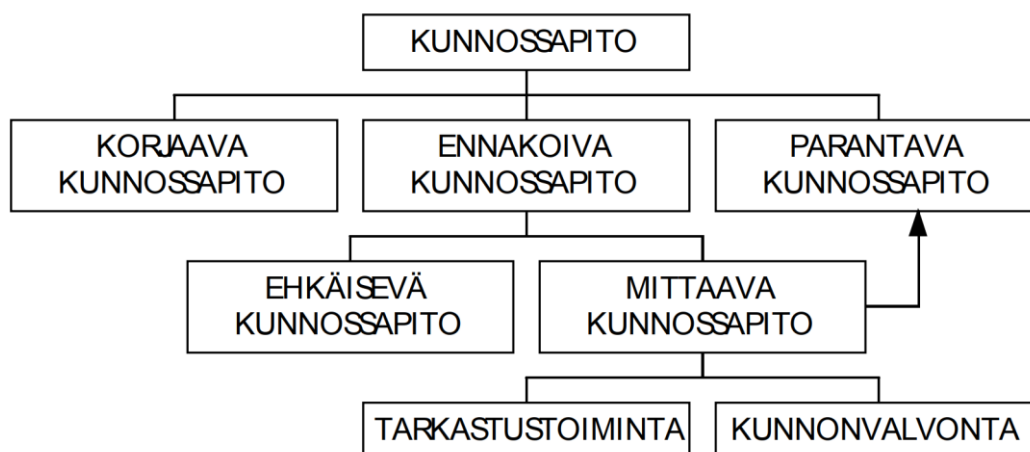
Kuva 5. Muunnostaulukko standardi UUC-potkurilaitteiden vastaavuuksista UUC HT- potkurilaitteisiin. (Kongsberg Maritime Finland Oy. 2018, 15.)

4 KUNNOSSAPITO

4.1 Yleisesti

Joskus käy niin, että palveluita tuottava koneisto ei toimi suunnitellulla tavalla. Tapauskohtaisesti tällöin ei välttämättä keskeydy ainoastaan kyseinen palvelu, vaan uhatuna saattaa olla jopa koko olemassaolomme. Esimerkkeinä suurista onnettomuuksista, jotka ovat johtuneet laitteen tai koneen rikkoontumisesta: Estonia (laiva), Tšernobyl (ydinvoimala) ja Bhopal (teollisuusonnettomuus)... Kunnossapidon voidaankin ajatella olevan riskienhallintaa. Kunnossapito vaikuttaa turvallisuuden ja tuottavuuden lisäksi yrityksen maineeseen sekä luotettavuuteen. (Järviö 2000, 8-9.)

4.2 Kunnossapitolajit



Kuva 6. Esitystapa kunnossapitolajien riippuvuuksista (ABB 2000, 2.)

Jakamalla kunnossapito eri lajeihin (kuva 6) voidaan kunnossapidon tehokkuutta seurata vertaamalla kustannuksia tehtyihin työtunteihin. Kunnossapidon viisi aluetta:

1. Huolto ylläpitää laitteen tai koneen käyttöominaisuuksia ja palauttaa heikentyneen suorituskyvyn ennen vian syntymistä tai estää vaurion syntymisen. Jakotettu huoltotiheys määräytyy käyttöajan tai -määrän mukaan. Huomioon otetaan myös käytön rasittavuus. Esimerkiksi: kohteen tarkastus, säätö, puhdistus, rasvaus, öljynvaihto tai suodattimen vaihto.

2. Ehkäisevä kunnossapito ylläpitää laitteen tai koneen käyttöominaisuuksia enakoivasti. Pyrkii vähentämään vikaantumisen todennäköisyyttä tai laitteen toimintakyvyn heikkenemistä. Säännöllistä tai sitä tehdään tarpeen vaatiessa. Tulokset mahdollistavat kunnossapidon suunnittelun ja aikataulutuksen. Esimerkiksi: tarkastukset, kunnonvalvonta (kuntoon perustuva kunnossapito), testaaminen/toimintakunnon toteaminen ja vikaantumistietojen analysointi.
3. Korjaavan kunnossapidon tarkoituksena on palauttaa laite tai kone tilaan, jossa se voi toteuttaa vaaditun komennon. Korjaava kunnossapito eli laitteen korjaus voi olla joko suunnittelematon häiriökorjaus tai suunniteltu kunnostus. Esimerkiksi: vian määrittäminen, tunnistus, paikallistaminen, korjaus tai väliaikainen korjaus sekä toimintakunnon palauttaminen.
4. Parantavan kunnossapidon tarkoituksena on parantaa kohteen luotettavuutta tai sen kunnossapitoa, kuitenkin muuttamatta kohteen toimintoa. Kolme pääryhmää.

Ryhmä 1: Korvataan alkuperäiset komponentit uudemmilla. Vanhat komponentit vaihdetaan uusiin nykyaikaisempiin.

Ryhmä 2: Uudelleensuunnittelut ja ryhmitykset. Tarkoituksena parantaa laitteen luotettavuutta eikä niinkään suorituskykyä.

Ryhmä 3: Modernisaatiot. Laitteen Suorituskykyä muutetaan. Esimerkiksi vanhentuneen koneen uudistus ja päivitys kilpailukykyiseksi.
5. Vikojen ja vikaantumisten selvittämisen tarkoituksena on selvittää vian perus-syy ja vikamuoto, eli miten kohteen kykenemättömyys ilmenee. Esimerkiksi: vika-analyysit, simulointi, mallintaminen, juurisyyn selvittäminen, materiaalien ja suunnittelun analyysit ja vikaantumispotentiaalien kartoitukset. (Järviö 2012, 49-52.)

4.3 Strategiat

Liikkeenjohtamiseen ja kunnossapitoon on kehitetty erilaisia kunnossapidon strategioita eli toimintakehyksistä, jotka voidaan jakaa kolmeen osa-alueeseen:

1. Laatujohtannaiset

-Laatuohjelmat ja järjestelmät (esimerkiksi Six Sigma, joka tarkoittaa prosessin ja tuotteen stabilointia eliminoimalla laatuvariaatioita).

2. TPM

Total Productive Maintenance eli kokonaisvaltainen tuottava kunnossapito. Pyrkii motivoimaan koneen käyttäjää sekä kunnossapitoon, että yrityksen sisäiseen yhteistyöhön osastojen välillä.

3. RCM, SRCM ja Asset Management

-RCM (Reliability Centered Maintenance) eli luotettavuuskeskeinen kunnossapito. Käytetään, kun vaatimustasot korkealla.

-SRCM (Steamlined RCM), eli ”virtaviivaistettu” tai ”kevyempi” RCM, joka on yritykselle halvempi toteuttaa kuin RCM.

-Asset Management, joka huomioi kunnossapitotarpeen muutokset eri käyttöasteiden mukaan (kysynnän ja tarjonnan vaihtelu). (Järviö 2012, 111-130.)

Koska RCM-menetelmä on kallis toteuttaa, sitä käytetään vain noin 10% teollisuudessa käytettävistä koneista. Koneet ovat prosessin kannalta niin kriittisiä ja/tai kalliita, että menetelmän käyttäminen maksaa itsensä takaisin. Kevyempää SRCM-menetelmää käytetään noin 30% koneista, koska menetelmä on halvempi, nopeampi ja antaa riittävän hyvän tuloksen. Usein loppulaitteistolle riittää toimintaohjeet, joiden mukaan laitteen rikkoentuessa toimitaan. Vaatimusten kasvaessa, strategioiden painoa voidaan siirtää enemmän RCM-menetelmiin (esimerkiksi lentokoneet, atomivoimalat ja off-shore öljylautat). (Järviö 2012, 111-130.)

4.4 Kongsbergin kunnossapito

Kongsberg Maritime Finland Oy suorittaa potkurilaitteilleen kaikkia aikaisemmin käsiteltyjä kunnossapidon lajeja (4.2). Potkurilaitteiden käyttöympäristö eli merivesi ja käytöstä syntyvä lämpö rasittavat potkurilaitteita niiden koko käyttöiän ajan. Potkurilaitteiden ulkopinnoille tarttuu esimerkiksi koteloita ja erilaisia kasvustoja (kuva 7).

Jaksotettuja määräaikaishuoltoja eli haalauksia suoritetaan potkurilaitteille tyypillisesti viiden vuoden välein. Kuluvat osat kuten laakerit, tiivisteet ja teräksen korroosiovaurioita estävät, uhrimetallina toimivat sinkki-palat vaihdetaan uusiin. Uudelleen kasaukseen liittyy olennaisesti myös komponenttien putsaaminen liasta ja esimerkiksi ruuvilukitteesta. Samalla vaihdetaan uudet vaihteistoöljyt.

Ehkäisevä kunnossapito toteutuu yrityksessä CMS- eli kunnonvalvontapalvelujen tarjoamisena ja Digital Twin- projektien kehittämisenä. Pienemmät huoltotyöt, kuten tiivisteiden tai sinkkianodi-palojen vaihto onnistuvat ilman laitteen irrotusta laivasta ja ovat korjaavaa kunnossapitoa. Aikaisemmin käsitellyt HT-potkurilaitteet ovat osa parantavaa kunnossapitoa. Lisäksi Kongsberg Maritime Finland Oy tutkii toistuvasti rikkoontuneiden komponenttien rikkoontumisten juurisyitä ja vian aiheuttajia. Mitä, miten ja miksi vikaantuminen tapahtui.



Kuva 7. UUC-potkurilaite odottamassa määräaikaishuoltoa

5 KUNNONVALVONTA

5.1 Yleisesti

”Jos haluat parantaa jotakin, mittaa sitä
Asiaa, jota ei voida mitata, ei ole olemassa”

(Laine 2010, 112).

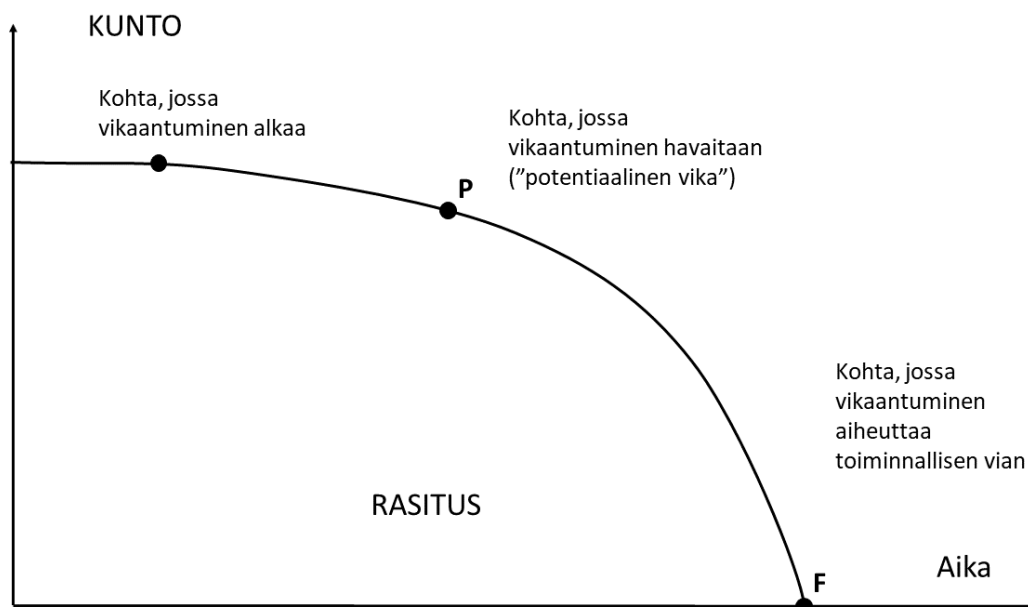
Kunnonvalvontatoimenpiteillä tarkoitetaan oirehtivien vikojen tarkastamistoimenpiteitä, joiden perusteella voidaan ryhtyä muihin toimenpiteisiin estäen toiminnalliset viat tai vikojen seuraukset. Mikäli syntymässä oleva vika onnistutaan havaitsemaan riittävän ajoissa, vähenevät hävikit selvästi, koska korjaus pystytään siirtämään seuraavaan säännönmukaiseen huoltoseisokkiin. Hyvänä muistisääntönä voidaan pitää, että suunnittelemattoman korjauksen työtunti maksaa viisinkertaisen summan suunniteltuun työtuntiin nähden. (Järviö 2000, 65; Laine 2010, 51.)

Kunnonvalvontamittaukset voidaan luokitella:

- Aistinvaraiset tarkistukset
 - Ihmisaistit kuten näkö-, kuulo-, haju-, ja tuntoaistit
- Fysikaaliset perussuureet
 - Lämpötila, paine ja dimensiot
- Sähköiset perussuureet
 - Jännite, virta, teho ja resistanssi
- Ainetta rikkomattomat testaukset
 - Ultraääni ja röntgenkuvaus
- Värähtely- ja äänimittaukset
 - Värähtelymittaus ja iskusysäys
- Öljyanalyysit
 - Hiukkanalyysi ja kemiallinen analyysi. (Ansaharju 2009, 303.)

Koska tuotantolaitteen vikaantumistodennäköisyys riippuu useissa tapauksista hyvin vähän laitteen iästä, ne antavat usein kuitenkin ennakkovaroituksen vikaantumisen alkamisesta. Tapahtuma voidaan kuvata P-F-käyrän (Point-Failure) avulla (kuva 8).

Käyrästä nähdään, miten vikaantuminen alkaa ja etenee kohtaan, jossa se voidaan havaita. Huononeminen jatkuu, kunnes toiminnallinen vika syntyy. (Järviö 2000, 64.)



Kuva 8. P-F- kuvaaja (Järviö 2000, 64.)

5.2 Kongsberg Maritime Finland Oy:n kunnonvalvonta

Yrityksen mittaavan kunnossapidon voidaan ajatella alkaneen vuonna 2009, kun ensimmäiset kiihtyvyyssanturit asennettiin. Nykyään yrityksellä on kokonaan erillinen CMS-osasto, joka työskentelee kunnonvalvonnan parissa. CMS-osaston työtehtäviin kuuluvat datan keräys, analysointi ja valvominen. Valvomisella pyritään välttämään ilman valvomista syntyvät vauriot. Merellä käytettävien alusten kuntoa valvovat erilaiset luokituslaitokset. Jos esimerkiksi öljynporauslautta joutuu keskeyttämään toimintansa potkurilaitteen huollon takia, ovat kustannukset kalliit. Luokituslaitoksen on mahdollista antaa lupa jatkaa poraustoimintaa perustuen kunnonvalvontaraportteihin. Ilman kunnonvalvontajärjestelmää haalaus- eli huoltoväli olisi maksimissaan viisi vuotta. (Henkilökohtainen tiedonanto Peltonen, 10.12.2020.)

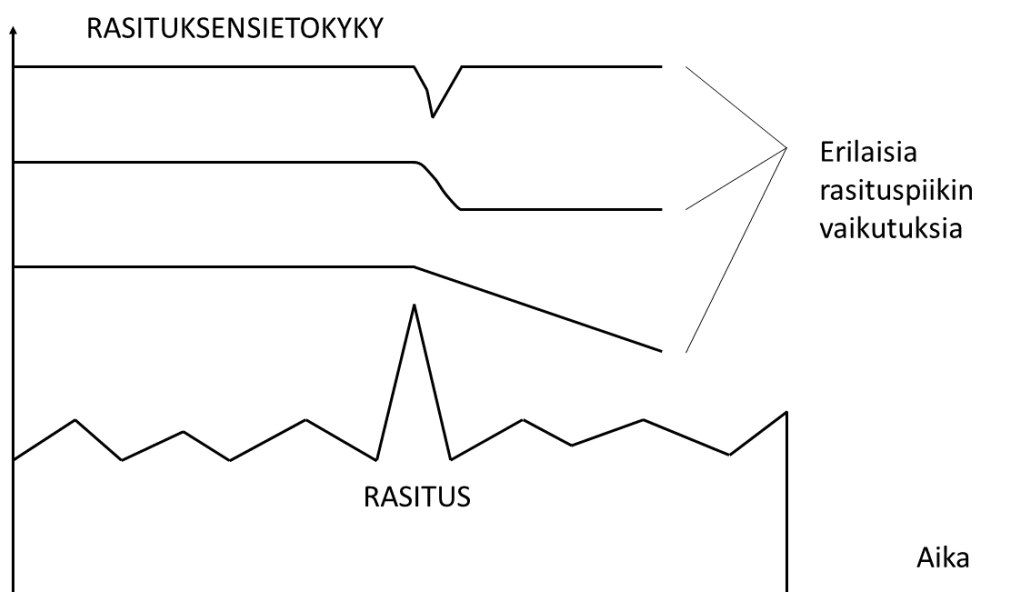
Kongsberg Maritime Finland Oy:n valmistamiin standardilaitteisiin on asennettu:

- Kiihtyvyyssanturit (8kpl)
- OPC (Oil Particle Counter) - öljyn partikkelilaskuri
- WCA (Water Content Analyzer) - vesipitoisuuslaskuri
- Endoskooppiputket

Kiihtyvyyssanturit sijaitsevat kahdessa eri kohdassa potkuriakselia sekä pinion-akselin tukilaakerissa ja pinion-akselin niskalaakerissa. Jokaiselle anturille on asennettu vara-anturi, joka otetaan käyttöön, jos ensisijainen anturi vikaantuu. Öljynpartikkelilaskurilla tutkitaan vaihteistoöljyssä olevien partikkelien, kuten laitteen käytöstä syntyvän metallipölyn määrää. Vesipitoisuuslaskurilla mitataan öljyssä esiintyvän veden määrää esimerkiksi vuotavan tiivisteiden havaitsemiseksi. Endoskooppiputkien avulla voidaan kuvata esimerkiksi hammaspyöräpari. Saatujen tulosten perusteella päätetään, voidaanko laitteen käyttöä turvallisesti jatkaa vai täytyykö laite huoltaa. (Henkilökohdainen tiedonanto Peltonen, 10.12.2020.)

Koska alavaihde pyörii suhteessa ylärunkoon, on laitteisiin lisätty liukurengaspaketti. Liukurenkaan tarkoituksena on pyöriä alarungon mukana ja miesluukun reunaan kiinnitetty kelkka pysyy paikallaan. Liukurenkaan avulla alarungon kunnonvalvontakomponenttien data saadaan siirrettyä laitehuoneeseen tiedonkeruulaitteelle. Tiedonkeruulaite lähettää datapaketteja sähköpostimuodossa 12/24 tunnin välein. (Peltonen henkilökohtainen tiedonanto 10.12.2020)

Kunnonvalvonta auttaa ymmärtämään laitteeseen syntyviä kuormituksia ja toimii työkaluna tuotekehityksessä. Vierasesineen, esimerkiksi uppotukin osuminen potkuriin aiheuttaa iskumaisen rasisuspiikin, joiden suuruuksia ja vaikutuksia laitteen elinikään ei tarkasti tunneta. Erilaisia rasisuspiikin vaikutuksia on kuvattu kuvassa 9.



Kuva 9. Rasisuspiikin vaikutuksia rasisuksensietokykyyn (Järviö 2000, 61.)

Käytännössä laitteet joutuvat vaihtelevien ja monimutkaisten rasiusten kohteeksi. Rasitusta voivat aiheuttaa myös virheellinen asennus, virheellinen käyttö tai laitteen lähellä tapahtuvat muiden laitteiden vauriot. (Järviö 2000, 60.)

5.3 Digital Twin (Digitaalinen kaksonen)

5.3.1 Yleisesti

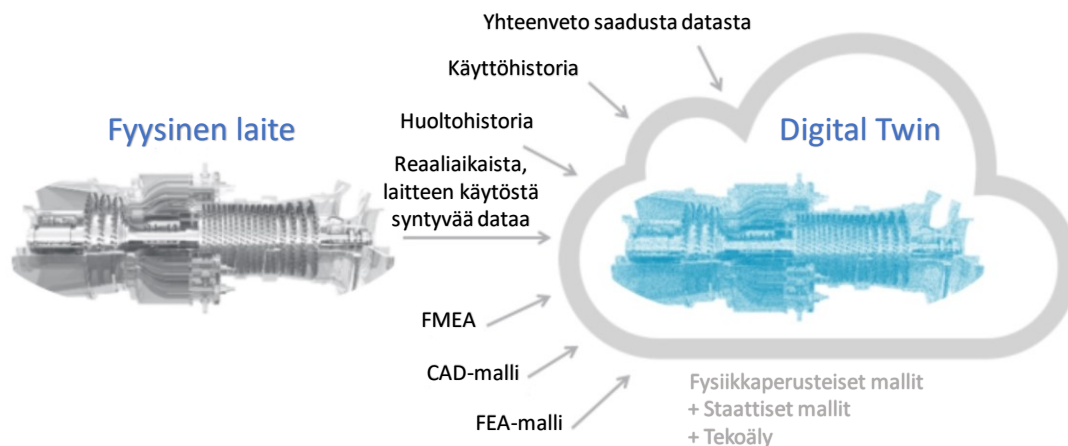
Digital Twin- konsepti on syntynyt pääosin NASA:n kehittämäksi. Järjestelmä kehitettiin ongelmaratkaisun työkaluksi kehitys- ja kunnossapitotarkoituksiin, koska laitteistoa ei voitu valvoa fyysisesti. Perimmäinen tarkoitus järjestelmän luomiselle oli luoda, testata ja rakentaa työkalu virtuaaliseen toimintaympäristöön. Järjestelmän tuli ennen tuotteen valmistusta toimia ensin virtuaalisesti halutuilla vaatimuksilla. (Rajput, 2018.)

IoT eli esineiden internetti on toiminut digitaalisen kaksonen perustana. Tulevaisuudessa useimmat IoT-alustat tukevatkin Digital Twin- teknologiaa. Koneopin, tekoälyn ja tiedon analysoinnin välillä tapahtuvan kommunikoinnin avulla ongelmia pystytään havaitsemaan ennen niiden näkymistä laitteistossa. Digital Twin mahdollistaakin käytännössä ennustamisen ja kyvyn toimia ajoissa. Järjestelmä auttaa käyttämään minimaalisen ajan esiintyvien ongelmien ratkaisussa. (Rajput, 2018.)

Digital Twin koostuu kolmesta osasta:

1. Todellinen, fyysinen tuote
2. Virtuaalinen tuote
3. Fyysisen ja virtuaalisen tuotteen välinen tiedonkulku, joka yhdistää tuotteet keskenään (IoT) (Rajput, 2018.)

Järjestelmä hyödyntää riskianalyysejä (FMEA), tietokoneavusteisia mallinnuksia (CAD) ja elementtianalyysejä (FEA). Laitteesta mitattava data näkyy reaaliajassa käyttöliittymässä sekä tallentaa lisäksi huoltohistorian ja käyttöhistorian. Järjestelmän luomasta yhteenvedosta voidaan todeta esimerkiksi eri komponenttien huoltotarve. Toimintaperiaate on havainnollistettu kuvassa 10. (Rajput, 2018.)



Kuva 10. Digital Twin- järjestelmän toimintaperiaate (Rajput, 2018.)

5.3.2 Digital Twin-Projekti Kongsberg Maritime Finland Oy:ssä

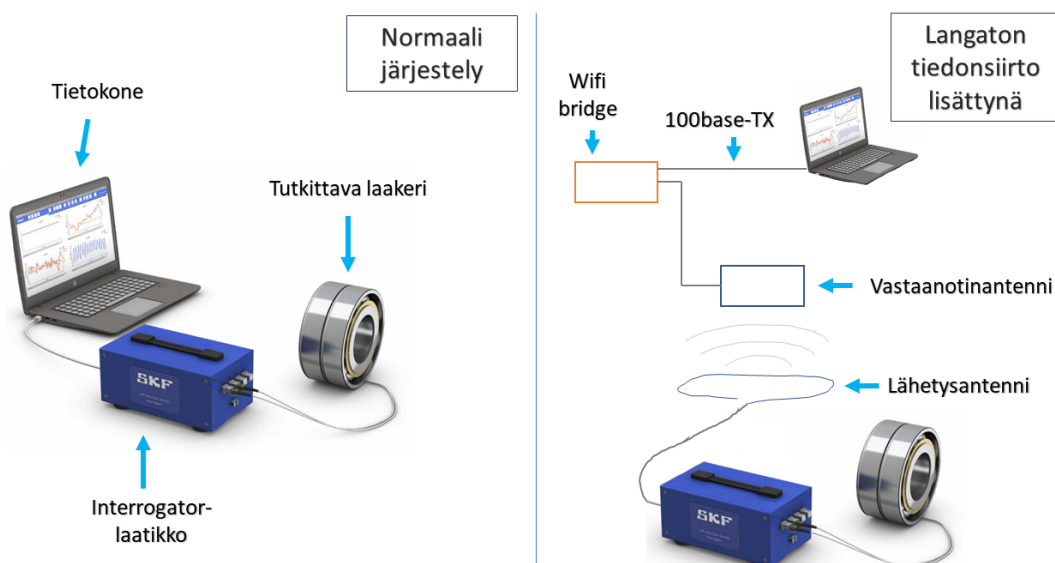
Yrityksen ensimmäinen DTW-projekti on toteutettu US 205- potkurilaitteeseen vuonna 2019. Koronaviruspandemiasta johtuen laivan rakennus viivästyi ja suunniteltu koematka on keväällä 2021. Ennen varsinaisia DTW-projekteja potkurilaitteita on tutkittu yrityksessä esimerkiksi lämpötila- ja venymäliuska-antureiden avulla. Tässä opinnäytetyössä käsiteltävä UUC 455- potkurilaite on yrityksen toinen DTW-projekti. (Henkilökohtainen tiedonanto Peltonen, 10.12.2020.)

Yrityksen tavoitteena on tuotteistaa DTW-projektien pohjalta mahdollisimman edullinen ja luotettava kunnonvalvontajärjestelmä myytäväksi asiakkaalle. Tällä hetkellä pyritään mittaamaan mahdollisimman paljon validointiantureiden avulla dataa, joka mahdollistaa algoritmien luomisen. Tulevaisuuden tavoitteena on mahdollistaa koko laitteen voimansiirtolinjan komponenttien tarkasteleminen yhden anturin avulla. Anturin tulee mitata kierrosnopeus ja momentti esimerkiksi input-akselista. Tarkoituksena on käsitellä mahdollisimman paljon dataa jo laivassa. Järjestelmä lähettäisi ainoastaan sellaisen datan, joka poikkeaa laitteen käytön perusteella tehdystä trendihistoriasta, jolloin tiedonsiirrosta syntyvät kustannukset saataisiin minimoitua. (Henkilökohtainen tiedonanto Peltonen, 10.12.2020.)

6 SKF FOS

FOS on nykyaikainen laakerivalmistaja SKF:n tarjoama kunnonvalvontatuote. Järjestelmän nimi tulee sanoista Fiber Optic Load Sensing. Valokuitukaapeli mahdollistaa reaaliaikaisen tiedonvälityksen ja uudenlaisen anturityypin.

6.1 Järjestelmän toimintaperiaate



Kuva 11. FOS-järjestelmän komponentit (SKF www-sivut 2020)

Kuvassa 11 on esitetty FOS-järjestelmän komponentit. Normaalisti järjestelmä koostuu FOS-laakerista, interrogator-laatikosta ja tietokoneesta. UUC 455- laitteeseen on mahdollista asentaa toinen liukurengaspaketti, jonka avulla tiedonsiirto olisi voitu toteuttaa, mutta tiedonsiirto haluttiin lähtökohtaisesti toteuttaa langattomasti. Langattoman tiedonsiirron mahdollistamiseksi järjestelmään lisättiin lähetysantenni, vastaanotinantenni ja wifi bridge. Järjestelmän komponentit on esitetty kuvassa 11.

Laakerin ulkovierintäkehällä on niin sanottu FBG-anturi, joka on hiljattain yleistynyt anturityyppi. FBG-anturi käyttäytyy käytännössä eräänlaisena optisena venymäliuskana. FBG-anturi voidaan ajatella suodattimena, joka heijastaa takaisin ainoastaan tiettyä aallonpituutta. Eri kuormituksilla heijastuvan valon aallonpituuden arvo muuttuu. Anturi on valmistettu valokuitukaapelin ytimeen, mitattavaan kohtaan laakeria ja sen valmistuksessa käytetään erikoislasertekniikkaa. Antureita voidaan valmistaa yhteen

valokuitukaapeliin useampia, joten FBG-anturit mahdollistavat samanaikaiset mitaukset yhden valokuitukaapelin avulla. Anturityypillä voidaan mitata käytännössä kaikkia sellaisia suureita, jotka voidaan muuttaa venymiksi. (SKF www-sivut 2020.)

Järjestelmällä pystytään seuraamaan seuraavia parametreja:

- Akselin suuntaiset voimat ja niiden suunnat
- Akselin säteen suuntaiset voimat ja niiden suunnat
- Pyörimisnopeus ja kuormituspulssit
- Lämpötila
- Venymät
- Värähtelyt
- Voiteluaineen ominaisuudet (SKF www-sivut 2020.)

6.2 Valokuidun toimintaperiaate

Valokuidun eli optisen kuidun toimintaperiaate perustuu taittumis- ja heijastumislakeihin kahden aineen rajapinnassa. Taitekerroimien ollessa $n_1 > n_2$, säde taittuu väliainesten rajapinnassa normaalista poispäin (kuva 12).

Valon taittuminen noudattaa Snellin lakia:

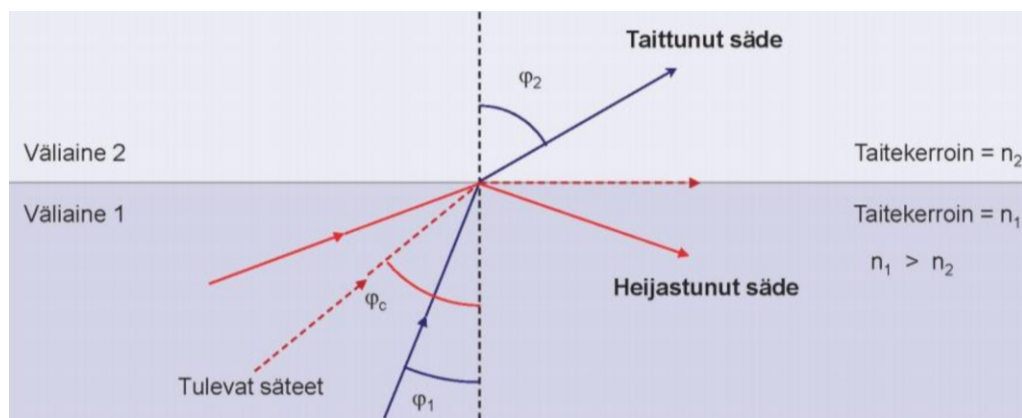
$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$$

Kuvassa 12 on esitetty:

Kulma φ_1 , jolla kokonaisheijastumista ei tapahtu (—)

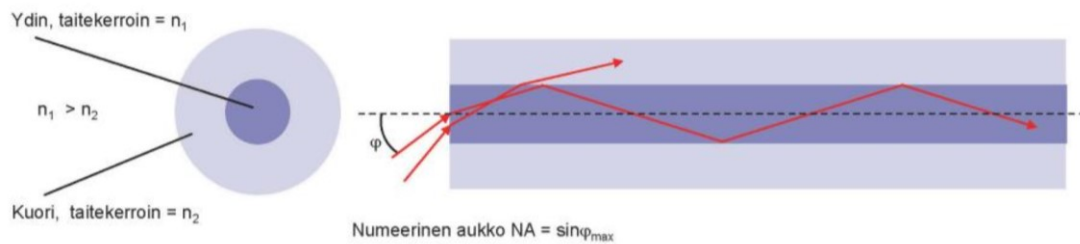
Kriittinen kulma φ_c , jolloin kokonaisheijastuminen tapahtuu (-----)

Kokonaisheijastuminen, kun kulma $> \varphi_c$ (—)



Kuva 12. Valokuidun toimintaperiaate (Nestor Cables 2015, 16.)

Optisen kuidun toiminta perustuu kokonaisheijastukseen. Kokonaisheijastuksen tapahtumiseksi valonsäteen tulokulma pitää olla riittävän pieni suhteessa kuidun akseliin (kuva 13). Tällöin valonsäde etenee kuidun ytimessä. Kuitu koostuu ytimestä ja kuoresta. Liian suuressa kulmassa suhteessa kuidun akseliin nähden tulevat valonsäteet eivät heijastu rajapinnassa vaan etenevät kuoreen (vaimenevat). (Nestor Cables 2015, 16-17.)

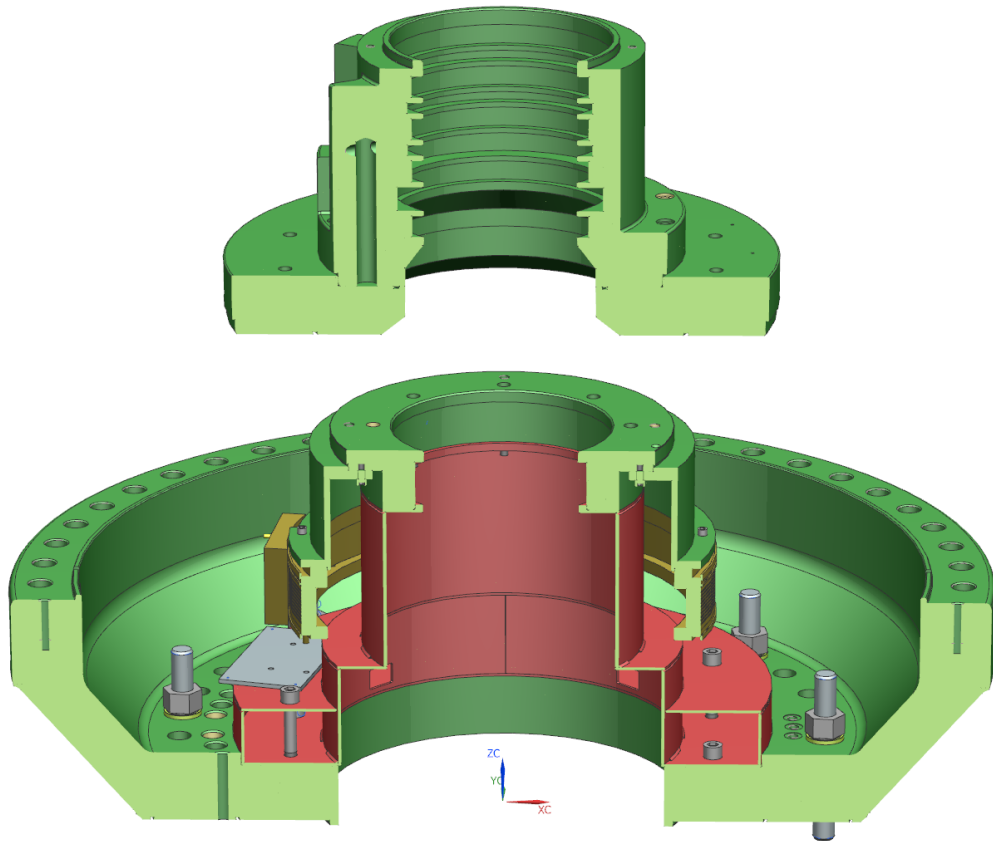


Kuva 13. Valokuidun poikki- ja pitkittäisleikkaus. (Nestor Cables 2015, 17.)

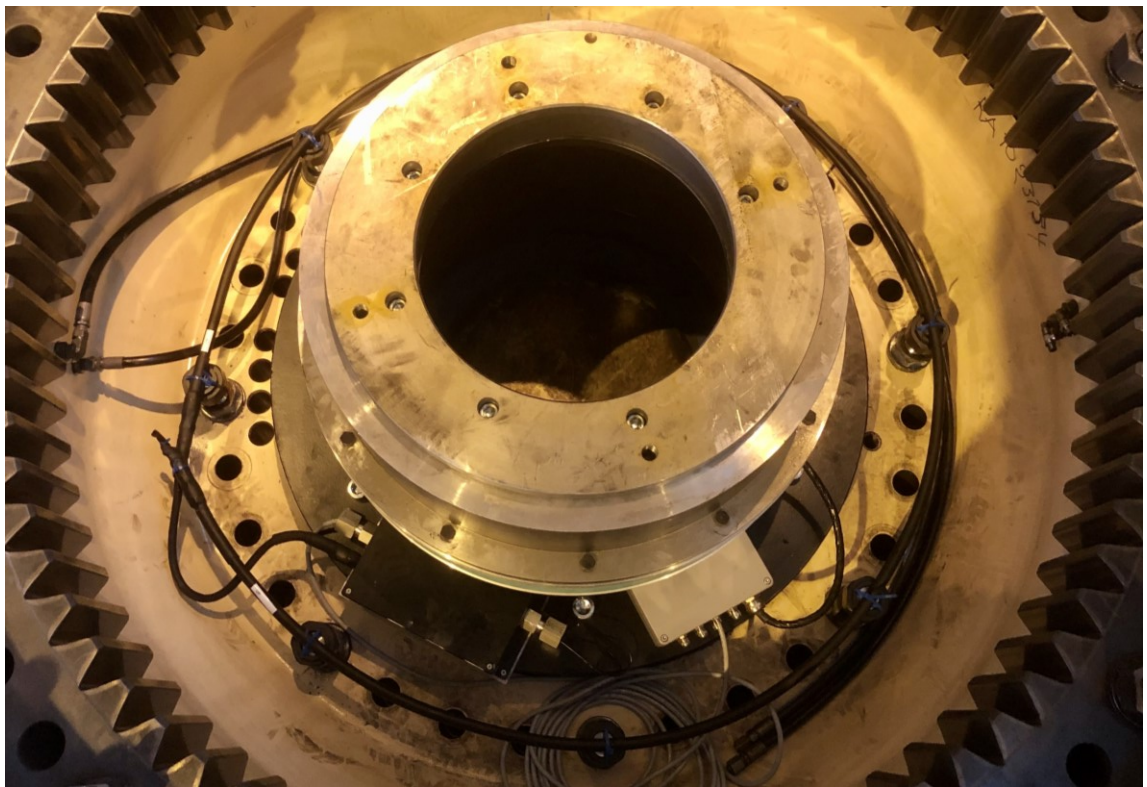
6.3 Langattoman tiedonsiirron testaus

Koska langatonta tiedonsiirtoa ei oltu aikaisemmin testattu vaihteistoöljyssä, haluttiin varmistua sen toimivuudesta ennen järjestelmän asentamista varsinaiseen potkurilaitteeseen. Yrityksellä on Rauman satamassa toimitilat, jossa järjestelmän testaus tapahtui. Testauksessa simuloitiin välisaa testipenkin avulla. Testipenkkiä on käytetty aikaisemmin esimerkiksi väliosan tiivisteiden tutkimisessa ja kehitystyössä.

Testipenkkiin tehtiin muutoksia tiedonsiirron testausta varten. Kahdeksan kappaletta kuusiokolopultteja korvattiin vaarnaruuveilla, pohjalevy hitsattiin umpeen ja tiivistepesän tilalle suunniteltiin niin sanottu kuorirakenne (kuva 14). Kuorirakenteen tarkoitus oli simuloida tiivistepesän sekä väliosan laipan muotoja. Tämä mahdollisti sekä todenmukaiset heijastuspinnat, että kytkentälaatikon kiinnityspaikat kustannustehokkaasti.



Kuva 14. Vakio-osat vihreällä, kuorirakenne punaisella, liukurengas keltaisella

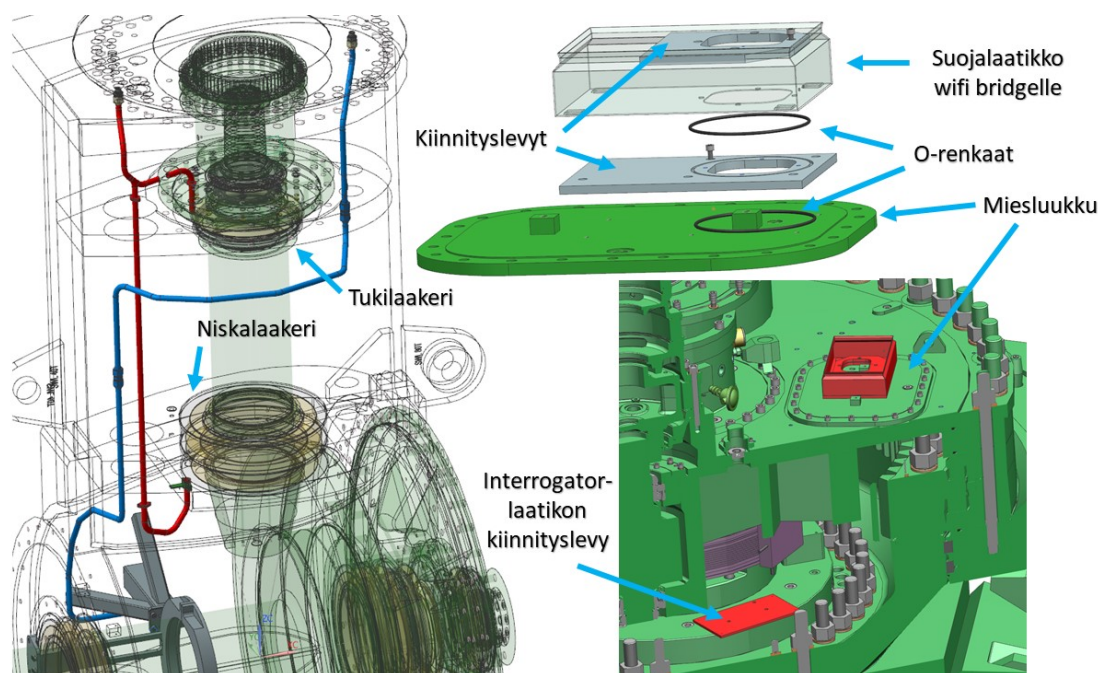


Kuva 15. Testipenkin kokoonpano ennen kannen asennusta (Peltonen sähköposti 5.10.2020)

Kuvassa 15 kuorirakenne ja testattavat komponentit näkyvät onnistuneesti asennettuina. Langattoman tiedonsiirron testausvaiheessa vaihteistoöljyn lämpötila nostettiin vastaamaan oikeaa käyttölämpötilaa. Testissä alarunkoa pyöritettiin samaan aikaan, kun dataa lähetettiin. Tiedonsiirron testaus toteutettiin vertaamalla lähetettyjä datapaketteja vastaanotettuihin datapaketteihin. Langattomassa tiedonsiirrossa ei esiintynyt datapakettihäviöitä, joten testaus onnistui. Komponentit sopivat paikalleen suunnitellusti. Testipenkin purkuvaiheessa asennetut komponentit tarkistettiin visuaalisesti, koska niiden reagoimisesta vaihteistoöljyyn ei ollut täyttä varmuutta. Komponentit eivät olleet vaurioituneet, joten ne päätettiin asentaa varsinaiseen potkurilaitteeseen.

6.4 Suunnittelu ja mallinnus

Varsinainen suunnittelu toteutettiin Siemens NX 9.0 ohjelmistolla, joka on yrityksen pääsuunnitteluohjelmisto. Ohjelmistolla luotiin 3D-mallinnukset uusista osista ja muokattiin jo olemassa olevia osia. Kun mallinnukset olivat valmiit, niistä luotiin valmistuskuvat. Lisätyt ja muokatut komponentit on esitetty kuvassa 16. Valokuitukaapelit yhdistyvät alarungossa samaan suojaputkeen ja tulevat olemassa olevan läpiviennin kautta välisosan. Välisosassa valokuitukaapelit yhdistyvät interrogator-laatikkoon, jonka jälkeen data lähetetään langattomasti yläosaan. Vastaanotin sijaitsee miesluukun alapuolella. Miesluukun yläpuolelle lisättiin järjestelmää suojaava kotelo.



Kuva 16. Lisätyt osat mallinnuksessa punaisella

Uusia osia lisättiin:

- Suojaputket valokuitukaapeleille
- Interrogator-laatikon kiinnityslevy
- Miesluukkuun asennettava vesitiivis suojalaatikko wifi bridgelle

Muokattavia osia olivat:

- Tukilaakerin laakeripesä, johon porattiin läpivientireikä valokuitukaapelin suojaputkelle
- Väliosan laippa, johon lisättiin kiinnityspaikka interrogator-laatikon kiinnityslevylle
- Miesluukku, johon lisättiin kiinnityspaikat suojalaatikolle ja vastaanotinantennille

6.5 Toteutus laitteeseen

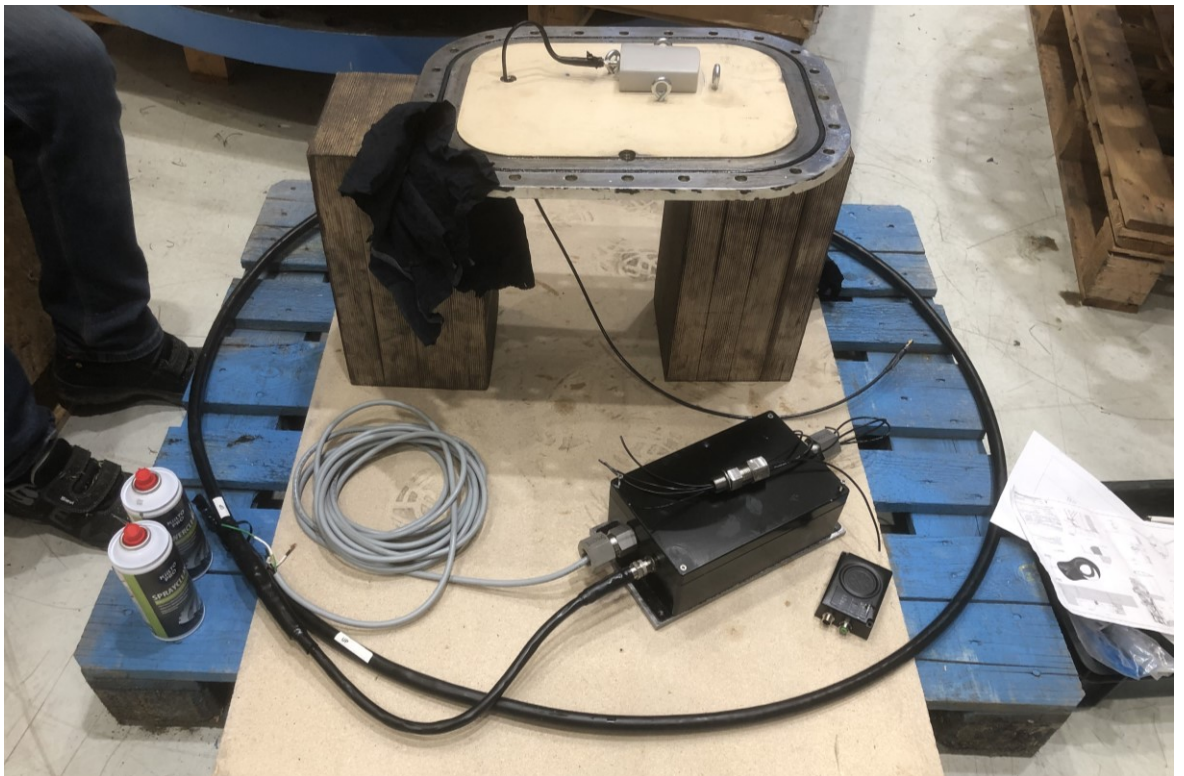
Kuvissa 17-20 on esitetty komponentit asennettuina potkurilaitteeseen. Kongsberg Maritime Finland Oy:n huoltomiehet suorittivat asennukset onnistuneesti Rauman toimiloissa. Komponenttien toimivuus testattiin kokoonpanon yhteydessä, jotta järjestelmän mahdollinen rikkoontuminen huomattaisiin mahdollisimman nopeasti. Valokuitukaapelien ulostulot on ympyröity kuvissa oranssilla.



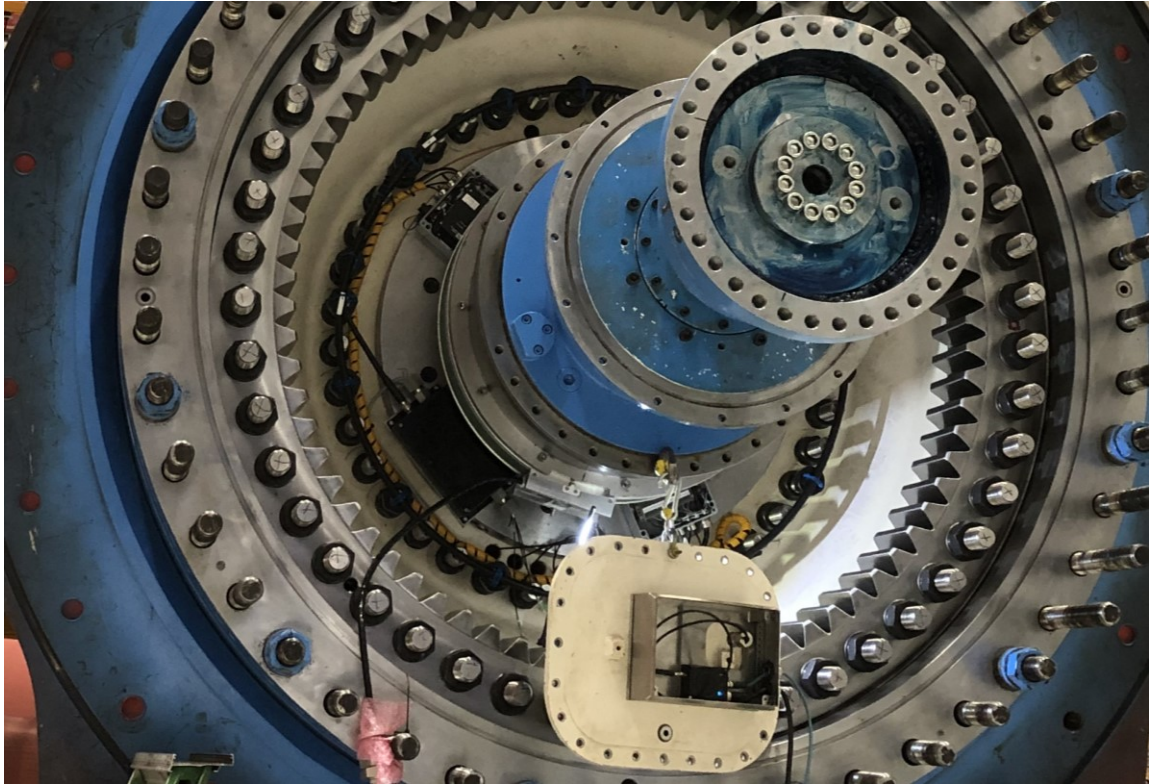
Kuva 17. Niskalaakerin valokuitukaapelien putkitus (Peltonen sähköposti 27.11.2020)



Kuva 18. Tukilaakerin valokuitukaapelin putkitus (Peltonen sähköposti 27.11.2020)



Kuva 19. Väliosain komponentit (Peltonen sähköposti 11.12.2020)

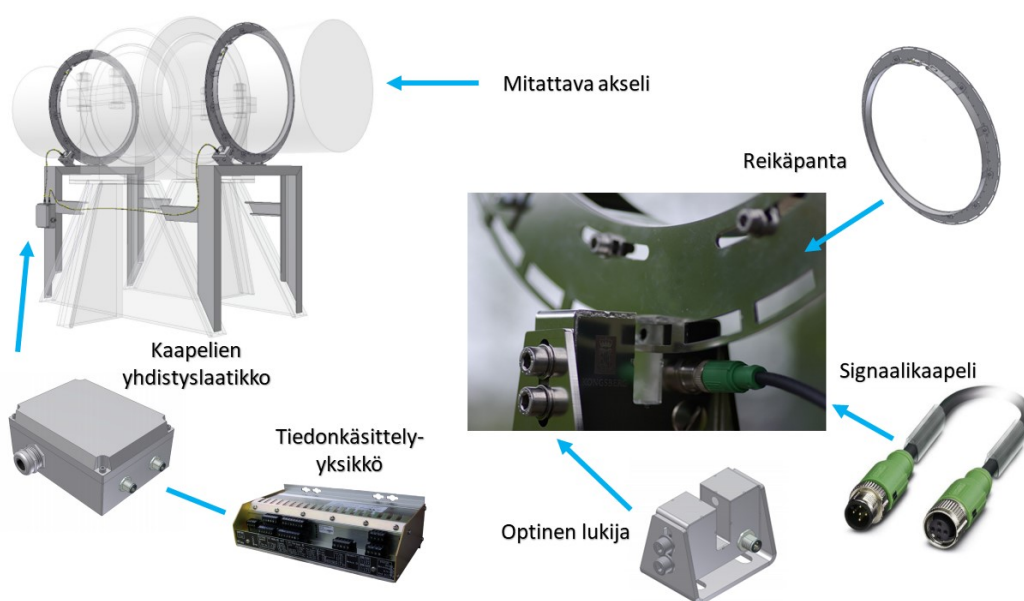


Kuva 20. Väliosan komponentit asennettuina ja testattuina (Peltonen sähköposti 11.12.2020)

7 KONGSBERG METAPOWER

Metapower on Kongsberg Konsernin kehittänyt väännönmittausjärjestelmä, jonka toiminta perustuu akselin kahden tarkkailupisteen kulmaerojen mittaamiseen. Syntyvää kulmaeroa mitataan kahden lukijan ja kahden pannan avulla.

7.1 Komponentit



Kuva 21. Metapower-järjestelmän komponentit (Kongsberg www-sivut 2020b)

Kuvassa 21 on esitetty Kongsberg Metapower-järjestelmän komponentit. Optisten lukijoiden ja akselin mukana pyörivien kahden reikäpannan avulla mitataan kahden tarkkailupisteen välistä kulmaeroa. Tiedonkäsittely-yksikkö prosessoi mitatun datan ja muuttaa sen käyttäjäystävälliseen muotoon, kuten väännöksi [kNm], tehoksi [kW] ja pyörimisnopeudeksi [rpm]. Tiedot voidaan lukea joko järjestelmän läheisyydestä erilliseltä näytöltä tai tietokoneelta etäyhteyden avulla. (Kongsberg www-sivut 2020b.)

7.2 Toimintaperiaate

Metapower-järjestelmän toimintaperiaate perustuu vääntökulman α mittaamiseen. Mitatun kulman avulla voidaan matemaattisin keinoin laskea esimerkiksi vääntö T . Tutkittava akseli on käytännössä vääntösauva.

Väännön aiheuttama vääntökulma α :

$$\alpha = \frac{LT}{GI} = \frac{LW\tau_{max}}{GI} = \frac{2L\tau_{max}}{GD}, \text{ koska } \frac{W_v}{I_v} = \frac{2}{D}$$

Suurin jännityksen arvo syntyy vääntösauvan ulkokehälle. (Outinen, Koski & Salmi 2000, 245.) Kaavasta voidaan havaita, että vääntösauvaan ulkokehälle syntyy samalla kiertymän määrällä aina samansuuruinen jännitys riippumatta siitä, onko sauva ontto vai umpinainen.

Kaavoissa esiintyvät tunnuksat [suureet]:

L = tarkastelupisteiden välinen etäisyys toisistaan	[mm]
τ_{max} = vääntöjännityksen maksimi	[MPa]
T = vääntömomentti $\tau * W$	[Nmm]
G = liukukerroin, teräkselle $\sim 80\,000$	[MPa]
W_v = vääntövastus ympyrärenkaalle $\frac{\pi D^3}{16} (1 - (\frac{d}{D})^4)$	[mm ³]
I_v = vääntöneliömomentti $\frac{\pi D^4}{32} (1 - (\frac{d}{D})^4)$	[mm ⁴]
D = akselin ulkohalkaisija	[mm]
d = akselin sisähalkaisija	[mm]

(Outinen, Koski & Salmi 2000, 245.)

Vapaassa väännössä vääntösauvan jokaiseen pisteeseen syntyy puhdas tasoleikkausjännitystila. (Outinen ym. 2000, 242.) Leikkausjännitys on otettu huomioon seuraavissa laskuissa yhdistetyn jännityksen kaavan avulla:

$$\sigma_{vert} = \sqrt{\sigma^2 * 3\tau^2} \Rightarrow \tau = \frac{\sigma_{vert}}{\sqrt{3}}$$

Jossa:

τ = leikkausjännitys

σ_{vert} = vertailujännitys, joka tässä tapauksessa voidaan todeta olevan akselissa käytetävän valmistusmateriaalin määrittelemä myötölujuus

σ = normaalijännitys, joka tässä tapauksessa voidaan todeta olevan $\sigma = 0$. (Mäkelä M, Soitinen L, Tuomola S & Öistämö J. 2016, 143)

Tutkittava potkurilaitteen ja voimalähteen välinen väliakseli on pyöreästä putkipalkista valmistettu. Sen ulkohalkaisija on $D=406.4\text{mm}$, seinämävahvuus 12.5mm ja ko-

konaispituus 2256mm. Akselin valmistusmateriaali on S355J2G3-luokan rakenneteräs, jonka myötölujuuden arvo tunnetaan (355MPa). (Kongsberg Maritime Finland Oy. 2012c, 1). Mittauspisteiden etäisyydeksi päätettiin L=2000mm, koska pantojen ei haluttu olevan akselissa olevien hitsisaumojen kohdalla.

Laskemalla akselin teoreettinen vääntökulman maksimi α_{max} myötölujuuden avulla, voidaan mitattavalle kulmalle asettaa raja-arvot.

$$\alpha_{max} = \frac{2 * 2000\text{mm} * 355\text{MPa}}{80\,000\text{MPa} * 406.4\text{mm} * \sqrt{3}} = 0.02521 \dots \text{rad} * \frac{180}{\pi} \approx 1.44^\circ$$

Raja-arvot

$$0(\alpha_{min}) \leq \alpha \leq \alpha_{max}$$

Akselin teoreettinen vääntömomentin maksimiarvo suhteessa myötölujuuteen:

$$T_{max} = \tau * W = \frac{355\text{MPa}}{\sqrt{3}} * \frac{\pi * (406.4\text{mm})^3}{16} \left(1 - \left(\frac{381.4\text{mm}}{406.4\text{mm}}\right)^4\right) = 6.05814 \dots \text{E8 Nmm} \approx 605 \text{ kNm}$$

7.3 Ulkopuolisten värähtelyiden vaikutus väännönmittaukseen

Värähtelyt koneissa ja rakenteissa ovat useimmiten *haitallisia*.

Haitallisuus ilmenee muun muassa:

- Lisääntyneinä jännityksinä rakenteissa
- Kestoiän lyhenemisenä
- Käynnin epävarmuutena
- Työ- ja prosessikoneissa valmistettavan tuotteen laadun heikkenemisenä
- Interferenssinä koneen lähistöllä olevien muiden koneiden ja laitteiden kanssa
- Energiahäviönä
- Ergonometrisinä haittoina
- Ympäristölle haitallisena meluna (Pennala 1999, 11.)

Mikäli telineen ominaisvärähtelytaajuus osuisi herätetaajuuteen, voitaisiin telineeseen vaikuttavia värähtelyitä koittaa vaimentaa. “Vaimennuksen kautta poistuu eli *dissipoi-tuu* systeemistä energiaa, jonka vuoksi värähtelyt vaimenevat, mikäli systeemiin ei tuoda ulkopuolelta lisäenergiaa.” (Pennala 1999, 18.)

7.3.1 Heräte

“Heräte voi olla harmoninen, jaksollinen tai jaksoton systeemiin vaikuttava voima tai sen johonkin osaan kohdistuva pakkosiirtymä. Systeemeissä voi esiintyä myös itseherätteisiä jaksollisia värähtelyjä”. (Pennala 1999, 18.)

Jaksollinen heräte:

Jaksollisia pakkovoimia syntyy pyörivien akselien ja pyörien massaepäkeskisyydestä sekä edestakaisesta liikkeestä.

Aiheuttajat: Yleisemmin erilaiset mekaaniset koneet. Hammaspyörävälitykset, hihnat, potkurit ja kiskot.

Jaksottomat herätteet

Pitkäaikaisia ja satunnaisesti muuttuvia.

Aiheuttajat: Tuuli, aallokko, liikenteen aiheuttama maaperän värähtely, pitkäaikaiset maanjäristykset.

Impulssiherätteet, eli iskumaiset ilmiöt

Lyhytaikaisia ja satunnaisesti muuttuvia.

Aiheuttajat: Rakenteen törmäminen esteeseen, rakenteeseen varastoitunut kimmoenergia vapautuu äkillisesti, louhinta ja räjähdystyöt, lyhytaikaiset maanjäristykset.

Itseherätteiset fysikaaliset ilmiöt

Aiheuttajat: Tietyt epästabiiilit fysikaaliset ilmiöt, esimerkiksi negatiiviset vaimennusilmiöt galopping ja flutter. Aiheuttavat voimistuvan, hallitsemattoman värähtelyn rakenteessa. (Pennala 1999, 18-20.)

7.3.2 Potkurilaitteen pakkovärähtelytaajuudet

Potkurilaitteen käydessä potkurilaitte sekä potkurilaitetta pyörittävä sähkömoottori aiheuttavat pakkovärähtelytaajuuksia. Ne ovat jaksollisia herätteitä, jotka otetaan huomioon telineen suunnittelussa. Potkurilaitteen pinion-akseli pyörii maksimissaan 750 rpm ja hammaspyöräparin välityssuhde potkuriakselille on 13/62 (pinion/potkuriakseli).

Vetoakselin pyörimistaajuus:

$$f_{is} = \frac{n_1}{t} = \frac{750rpm}{60s} = 12.5Hz$$

Hammaspyöräparin aiheuttama ryntötaajuus:

$$f_r = \frac{z_1 * n_1}{t} = \frac{13 * 750rpm}{60s} = 162.5Hz$$

Potkuriakselin pyörimisen aiheuttama taajuus:

$$f_{ps} = \frac{z_1 * n_1}{z_2 * t} = \frac{13 * 750rpm}{62 * 60s} = 2.6Hz$$

Potkuriakselin neljän lavan pyörimisen aiheuttama taajuus:

$$f_l = 4 * f_{ps} = 10.5Hz$$

Kaavoissa esiintyvät tunnuksat [suureet]:

t = aika	[s]
n_1 = kierrosnopeus, pinion-akseli = 750	[rpm]
z_1 = hammasluku, pinion-akseli	[-]
z_2 = hammasluku, potkuri-akseli	[-]

Laskennallisia herätetaajuuksia verrataan simuloimalla saataviin tuloksiin. Koska laitteen käyttökierrosnopeus on muuttuva välillä 0-750 rpm, myös taajuudet muuttuvat nollian ja laskettujen arvojen välillä.

7.4 Telineen suunnittelu

Potkurilaitteen ja sähkömoottorin (Prime Mover) välinen putkiakseli näkyy kuvassa 22. Potkurilaite on poikkeuksellisesti suunniteltu asennettavaksi vinoon liittyen laivan pohjarakenteen muotoihin ja virtauksiin. Turvallisuussyistä väliakseliston ympärille on asennettu suojaverkko.



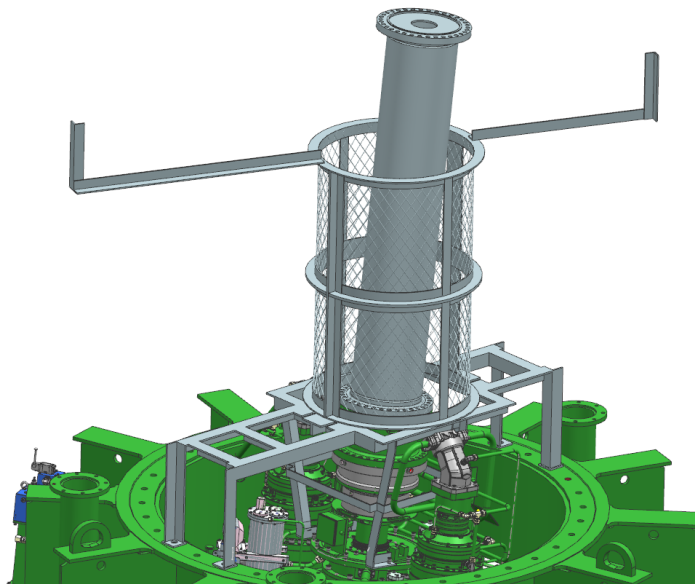
Kuva 22. Potkurilaitehuone ja suojaverkko (Peltonen sähköposti 1.10.2020)

Kaikilla rakenteilla on massa sekä jäykkyys. Niiden suuruus ja jakautuminen ovat tärkeimmät rakenteen dynaamiseen käyttäytymiseen vaikuttavista tekijöistä. Mikään laite ei ole täysin jäykkä, joten kaikki värähtelevät laitteet ovat periaatteessa jousi- ja massasysteemejä. (Pennala 1999, 13; ABB 2000, 7.)

Teline toimii käytännössä jäykkänä jousena. Massa määräytyy käytettävän materiaalin tiheydestä ja tilavuudesta. Lukijoiden kiinnityksissä pyrittiin hyödyntämään jo olemassa olevan suojaverkon telineitä hyväksi.

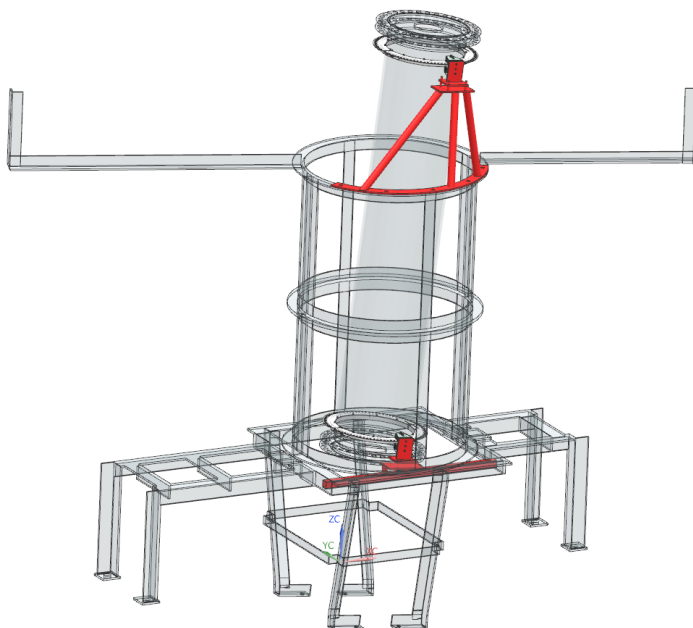
7.5 Telineen ominaisvärähtelytaajuuden määrittäminen simuloimalla

Simuloinnin mahdollistamiseksi suojateline mallinnettiin NX 9.0 ohjelmistolla (kuva 23).



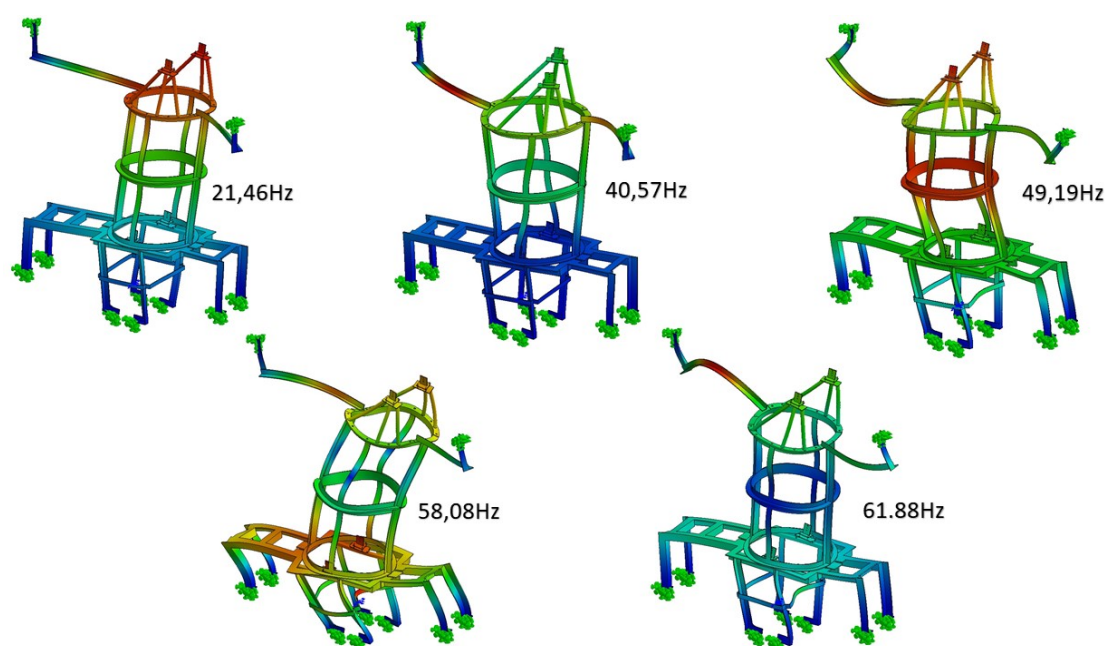
Kuva 23. Mallinnettu suojateline

Mallinnettua suojatelinettä käytettiin apuna lukijoiden kiinnityksien suunnittelussa. Kokoonpanoon tuotiin kaikki lisättävät komponentit, jonka jälkeen niiden ympärille mallinnettiin lukijoiden telineet. Rakenne puretaan huoltojen yhteydessä, joten lisärakenteiden kiinnitykset suojatelineeseen suunniteltiin pulttiliitoksina. Lisätyt telineet on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. Lisätyt rakenteet punaisella

Suojateline tallennettiin STEP-tiedostomuotoon ja avattiin sen jälkeen Solidworks 2019 suunnitteluohjelmiston opiskelijaversiolla. Frequency-työkalulla teline simuloitiin ja selvitettiin ominaisvärähtelytaajuuudet. Koska mallin simulointi oli ajan käytön suhteen hidasta, simulointi toteutettiin ilman kuvassa 23 näkyvää verkkoa. Yhdelle reikäpannalle tulee todennäköisesti kaksi lukijaa, joten lukijoiden telineet peilattiin symmetrisesti myös toiselle puolelle akselia. Telineen ominaisvärähtelytaajuuudet ja muodonmuutokset on esitetty kuvassa 25. Vihreät nuolet osoittavat telineen kiinnityskohdat ja punainen väri osoittaa kohdat, joihin syntyy suurimmat jännitykset. Muodonmuutokset ovat yliskaalattuja.



Kuva 25. Simuloinnin tulokset

Simuloimalla määritetyt telineen ominaisvärähtelytaajuuudet ovat suurempia kuin aikaisemmin laskemalla osoitetut potkurilaitteen aiheuttamat herätetaajuuudet. Teoriassa ryntötaajuus voisi tietyllä kierrosalueella aiheuttaa telineessä resonointia. Yrityksen kokemusten perusteella hammaskosketuksista syntyvä energia on kuitenkin niin vähäistä, ettei se suurella todennäköisyydellä aiheuta ongelmia. Tulosten perusteella olemassa olevaa suojatelinettä käytetään ensisijaisena vaihtoehtona Metapower-järjestelmän lukijoiden kiinnityksessä.

8 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä keskityttiin potkurilaitteen toimintaperiaatteeseen, kunnossapitoon, erilaisiin kunnonvalvonnan komponentteihin ja kunnonvalvonnan jälkiasennuksen vaatimiin toimenpiteisiin mekaniikan näkökulmasta.

Laitteeseen asennettiin onnistuneesti FOS-järjestelmä ja Metapower-järjestelmälle suunniteltiin kiinnitysteline. FOS-laakereiden valokuiduille toteutettiin suojaputket, kytkentälaatikoiden kiinnitykset sekä langattoman tiedonsiirron testaus ja asennus. Metapower vääntömomentin mittausjärjestelmälle suunniteltiin teline, jonka ominaisuuksien todettiin olevan herätetaajuuksien ulkopuolella simuloimalla saatujen tulosten perusteella.

Tämän pilottihankkeen asennukset tehtiin suunniteltujen kuvien pohjalta. 3D-mallit ja fyysinen laite eivät aina vastaa täysin toisiaan, joten tarkkojen valmistuskuvien tekemiseen päätettiin olla käyttämättä aikaa. Esimerkiksi laakereiden valokuitujen suojaputket vedettiin helpointa mahdollista reittiä asentajan toimesta 3D-malliin perustuen.

Työ onnistui ajallaan sekä asetettujen tavoitteiden mukaisesti. Yritys sai uusien järjestelmien lisäämiselle konseptin, jota voidaan hyödyntää tulevaisuuden kunnonvalvonta- ja Digital Twin- projekteissa. Työn tekeminen haastoi myös opinnäytetyön kirjoittajaa syventäen osaamista ja tarjosi mahdollisuuden työskennellä uusimman teknologian parissa.

Lopuksi haluan kiittää työnantajaa aiheesta ja mahdollisuudesta opinnäytetyöhön, ohjaavaa opettajaa Jarmo Juusoa sekä Jyrki Peltosta kuvien ja haastattelun mahdollistamisesta.

LÄHTEET

ABB. Kunnonvalvonta ja huolto. Viitattu 18.11.2020. http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/23_Kunnonvalvonta%20ja%20huolto.pdf

Ansaharju, T. 2009. Koneenasennus ja kunnossapito. 1. painos. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit Oy.

Järviö, J. 2000. Luotettavuuskeskeinen kunnossapito. Hamina: Oy Kotkan Kirjapaino Ab.

Kongsberg Maritime Finland Oy. 2012a. Potkurilaitteista. Viitattu 13.11.2020. (Yrityksen sisäinen tietokanta.)

Kongsberg Maritime Finland Oy. 2012b. RR-B_Propulsion_0612_singlepages_LR10_250512_tcm92-8664. Viitattu 16.11.2020. (Yrityksen sisäinen tietokanta.)

Kongsberg Maritime Finland Oy. 2012c. Intranet kuva: 5160722-B. Viitattu 7.12.2020. (Yrityksen sisäinen tietokanta.)

Kongsberg Maritime Finland Oy. 2015. Turun AMK - 04022015. Viitattu 10.11.2020. (Yrityksen sisäinen tietokanta.)

Kongsberg Maritime Finland Oy. 2018. 20181204 RR Rauma Media event presentations. Viitattu 5.11.2020. (Yrityksen sisäinen tietokanta.)

Kongsberg Maritime Finland Oy. 2019a. 20190401 KM Finland Company Presentation. Viitattu 20.11.2020. (Yrityksen sisäinen tietokanta.)

Kongsberg Maritime Finland Oy. 2019b. KM Rauma Factory 16062019. Viitattu 18.11.2020. (Yrityksen sisäinen tietokanta.)

Kongsberg Maritime Finland Oy. 2019c. FINAL - AZT - Juha Pekka Vesa_RJ. Viitattu 20.11.2020. (Yrityksen sisäinen tietokanta.)

Kongsberg Maritimen www-sivut. 2020. Viitattu 3.11.2020. www.kongsberg.com/maritime

Kongsbergin www-sivut. 2020a. Viitattu 6.11.2020. www.kongsberg.com

Kongsbergin www-sivut. 2020b. Viitattu 8.12.2020. <https://www.kongsberg.com/globalassets/maritime/km-products/product-documents/metapower-torque-and-power-measurement-system>

Laine H. S. 2010. Tehokas kunnossapito, tuottavuutta käynnissäpidolla. 1. painos. Kerava: Savion Kirjapaino Oy.

Mäkelä, M. Soitinen, L. Tuomola, S. & Öistämö, J. 2016. 16. painos. Tekniikan kaavasto. Porvoo: Bookwell Oy.

Nestor Cables. 2015. - Fttx_principles_technologies_and_installation_solutions_fin. Oulu: Nestor Cables Oy.

Outinen, H. Koski, J. & Salmi, T. 2000. Lujuusopin perusteet. 2 painos. Tampere: Klingendahl Paino Oy.

Pennala, E. 1999. Koneiden ja rakenteiden värähtelyt. 1. painos. Helsinki: Yliopistopaino.

Peltonen, J. DTW GXXX kuvia kokoonpanosta 27.11.2020 klo 12-13. Vastaanottaja teemu.leppanen@km.kongsberg.com. Lähetetty 27.11.2020 klo 12.10. Viitattu 30.11.2020.

Peltonen, J. Kuvia Pioneering Spiritiltä 1.10.2020 klo 06-07. Vastaanottaja teemu.leppanen@km.kongsberg.com. Lähetetty 1.10.2020 klo 6.56. Viitattu 18.11.2020.

Peltonen, J. RE: Kuvia 11.12.2020 klo 14-15. Vastaanottaja teemu.leppanen@km.kongsberg.com. Lähetetty 11.12.2020 klo 14.39. Viitattu 11.12.2020.

Peltonen, J. 2020. PdM- Specialist, Kongsberg Maritime Finland Oy. Puhelinhaastattelu 10.12.2020.

Rajput, H. How Digital Twin is transforming Internet of Things (IoT)?. Viitattu 30.11.2020. <https://www.loginworks.com/blogs/digital-twin-transforming-internet-things-iot/>

SKF www-sivut. 2020. Viitattu 15.12.2020. <https://servicesandsolutions.promo.skf.com/acton/attachment/26359>