



Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Satakunta University of Applied Sciences

JOONAS SULISALO

# **Värähtelyvalvonnan hyödyt ja mahdollisuudet laivaympäristössä**

MERENKULUN TUTKINTO-OHJELMA  
2021

Tekijä Sulisalo, Joonas	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä syyskuu 2021
	Sivumäärä 34	Julkaisun kieli Suomi
Julkaisun nimi <b>Värähtelyvalvonnan hyödyt ja mahdollisuudet laivaympäristössä</b>		
Tutkinto-ohjelma Insinööri, merenkulku (AMK)		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tässä opinnäytetyössä tutkittiin kunnonvalvonnan värähtelymittausten toimintaa laivoilla. Tutkimuksen kohteina olivat kaksi keskenään hieman erityylistä alusta, joista toisessa kunnonvalvonnan värähtelymittaukset on vakiintunut kunnossapitomenetelmä ja toisessa se voisi olla toimiva ratkaisu perinteisen käyttötunteja mittaavan järjestelmän tilalla.</p> <p>Työn tavoitteena oli aluksi käsitellä kunnonvalvonnan perusideaa ja teoriaa värähtelyvalvonnan toiminnasta yleisesti. Yleiseen osioon sisältyvät värähtelymittauspisteiden valitseminen ja tunnistaminen, mittaustoiminnan suunnittelu, anturityypin valinta sekä kunnonvalvonnalla saavutettavat edut. Seuraavan osion tavoitteena oli käsitellä värähtelyvalvonnan nykytilannetta laivoilla ja esimerkkitapauksena tästä käytettiin GTS Constellation risteilijää. Viimeisessä osiossa pohdittiin värähtelyvalvonnan soveltumista Suomen lipun alla seilaavan matkustaja-autolautan huoltosuunnitelmaksi.</p> <p>Työ toteutettiin hyödyntämällä aiempaa tietoa kunnonvalvonnan värähtelymittauksista lukemalla aiheesta kirjoista ja sähköisessä muodossa olevista PSK standardeista. Laivakäytön sovelluksista tietoa täytyi hankkia haastatteluilla ja sähköpostiviestinnällä Valmet automaatio Oy:n ja Royal Caribbean Cruise Lines Ltd:n kontakteilta.</p>		
<p><a href="#">Asiasanat</a> Kunnonvalvonta, värähtelymittaus</p>		

Author Sulisalo, Joonas	Type of Publication Bachelor's thesis	Date September 2021
	Number of pages 34	Language of publication: Finnish
Title of publication <b>The advances and possibilities of vibration analysis onboard ships</b>		
Degree program Maritime engineering		
Abstract  <p>The subject of this thesis was to study the functionality of condition monitoring vibration analysis in ships. The study's targets were two different kinds of ships in one of which condition monitoring vibration analysis is already in use as in a daily basis and in the other ship it could be a good alternative for the traditional working hour-based system.</p> <p>The goal of this thesis was to first inspect the general idea of condition monitoring and vibration analysis. The general information section consists of choosing and recognizing the vibration measurement points, the planning of the measurement activity, the choosing of the correct type of sensor and the benefits provided by condition monitoring. The goal of the next section was to provide information about the current situation of vibration analysis onboard ships and the GTS Constellation cruise ship was used as an example of this. In the last section the goal was to think how the condition monitoring vibration analysis would work in a combined roll-on cargo and passenger ship which sails under the Finnish flag.</p> <p>The thesis was conducted with the help of prior knowledge about the condition monitoring vibration analysis by reading about it from books and Finnish PSK standards. The information about the applications in ship environment was obtained by interviews and e-mails from contacts in Valmet Automation Inc. and Royal Caribbean Cruises Ltd.</p>		
<u>Key words</u> Condition monitoring, vibration analysis		

# SISÄLLYS

1 JOHDANTO .....	5
2 VÄRÄHTELYVALVONNAN PERUSTEET .....	6
2.1 Ennakoiva kunnossapito.....	6
2.2 Mittauspisteen valitseminen.....	7
2.3 Mittauspisteen tunnistaminen.....	9
2.4 Värähtelymittaustoiminnan suunnittelu .....	9
2.4.1 Tekninen toteutettavuus.....	10
2.4.2 Valvontamenetelmien määrittely .....	10
2.4.3 Kuntokartoitus ja -tutkimus .....	10
2.4.4 Raja-arvojen määrittely .....	10
2.4.5 Järjestelmätyypit .....	11
2.4.6 Mittausvälit .....	11
2.4.7 Mittaustoiminnan järjestely .....	12
2.5 Anturityypin valinta .....	12
2.6 Kunnanvalvonnan edut .....	14
3 VÄRÄHTELYVALVONNAN KÄYTTÖ RISTEILYALUKSELLA.....	15
3.1 GTS Celebrity Constellation.....	15
3.2 Värähtelyvalvonnan piiriin kuuluvat laitteet.....	16
3.3 Valmet Maintenance Pad .....	18
3.4 Valvontareitit.....	19
4 VÄRÄHTELYVALVONNAN TEOREETTINEN TOTEUTUS ITÄMERELLÄ SEILAAVALLA MATKUSTAJA-AUTOLAUTALLA.....	20
4.1 Pää- ja apudieselmootoreiden valvonta.....	20
4.2 Vaihteistot ja potkuriakseli .....	23
4.3 Merivesipumput .....	26
4.4 Muiden apulaitteiden kunnanvalvonta.....	28
4.5 Valvontareitit.....	31
5 YHTEENVETO .....	33
LÄHTEET	

## 1 JOHDANTO

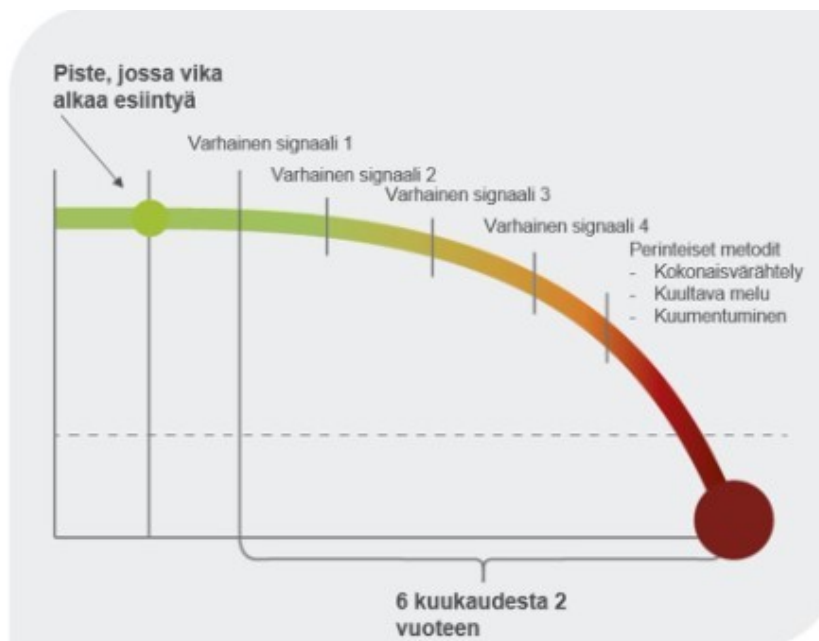
Tässä työssä tarkasteltiin kunnonvalvontapohjaisen huolto-ohjelman toimimista laivoilla. Erityisesti tarkastelun kohteena olivat värähtelyvalvontaan liittyvät sovellukset. Kunnonvalvonta on ollut voimalaitoksissa käytössä jo pidemmän aikaa, mutta laivoilla se on vielä hyvin varhaisessa ja kehittyvässä vaiheessa. Tutkimuksen kohteena oli värähtelyvalvontaan perustuvan kunnonvalvontapohjaisen huoltosuunnitelman erilaiset käyttötavat valvottavasta kohteesta riippuen. Rajasin tutkimuksen pelkästään värähtelymittauksiin liittyviin sovelluksiin. Tutkimuksessa hyödynsin Valmet Automaatio Oy:n tarjoamaa tietoa ja kokemusta värähtelyvalvontajärjestelmistä isojen risteilyalusten käytössä. Myöhempanä selvitin myös värähtelyvalvonnan teoreettista toimivuutta työni ohessa matkustaja-autolautalla, jonka nimeä en voi tässä työssä mainita. Valitsin värähtelyvalvonnan piiriin sellaiset koneet ja laitteet, jotka olivat oman näkemykseni mukaan joko kriittisiä aluksen operoinnin kannalta, tai muuten tärkeitä yleisten toimintojen takaamiseksi.

## 2 VÄRÄHTELYVALVONNAN PERUSTEET

Värähtelyvalvonta on ennakoivan kunnossapidon muoto, joka perustuu erilaisten mittausten tekemiseen ja tulkitsemiseen. Värähtelyvalvonnalla pyritään havaitsemaan alkavia vikoja pyörivissä koneiden osissa jo hyvin varhaisessa vaiheessa. Ennakoivilla menetelmillä on mahdollista välttyä kalliilta remontilta, joka voi seurata esimerkiksi vioittuneen laakerin äkillisenä hajoamisena. Värähtelyvalvonnan mittaustekniikoilla voidaan havaita kulunut laakeri jo hyvissä ajoin ja sen vikaantumista voidaan seurata tarkasti aina huoltotoimenpiteisiin asti. Korjaavaan kunnossapitoon verrattuna värähtelyvalvonta on isompia laitekokonaisuuksia ylläpidettäessä kustannustehokkaampi vaihtoehto. Korjaavan kunnossapidon heikkous piilee siinä, että jotain korjataan vasta sitten, kun vika on jo ilmennyt. Suuremmista koneista, kuten turbiineista puhuttaessa voivat vauriot ja kustannukset nousta suuriksi jo yhdenkin laakerin rikkoutuessa.

### 2.1 Ennakoiva kunnossapito

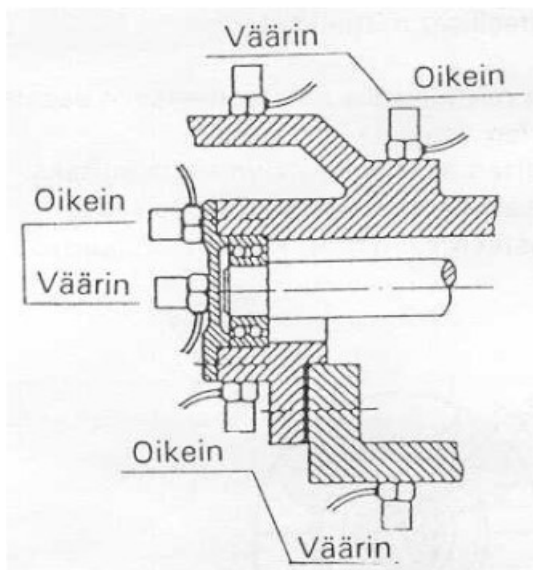
Ennakoivan kunnossapidon ajatus on seurata kohteen suorituskykyä tai sen parametreja. Tavoitteena on pienentää todennäköisyyttä vikaantuvista koneista tai koneenosista. Ennakoiva kunnossapito on luonteeltaan säännöllistä (aikataulutettua tai jatkuvaa) tai sitä tehdään vaadittaessa. Tuloksia seuraamalla voidaan aikatauluttaa ja suunnitella kunnossapidon tehtäviä. Ennakoivaan kunnossapitoon sisältyy mm. seuraavalaisia tehtäviä: kunnonvalvonta, tarkastaminen, määräystenmukaisuuden toteaminen, testaaminen/toimintakunnon toteaminen, vikaantumistietojen analysointi ja käynninvalvonta. Kunnonvalvontaa voidaan suorittaa kohteen ollessa toiminnassa tai seisokissa. Kunnonvalvonnan tarkoituksena on auttaa etsimään kohteista oireilevia vikoja tai vaihtoehtoisesti voidaan todeta havaintojen avulla kohteen olevan kunnossa. (Järviö, Piispa, Parantainen & Åström 2007, 50.)



Kuva 1 Kunnonvalvonnan perusidea (Jalkanen sähköposti 2021)

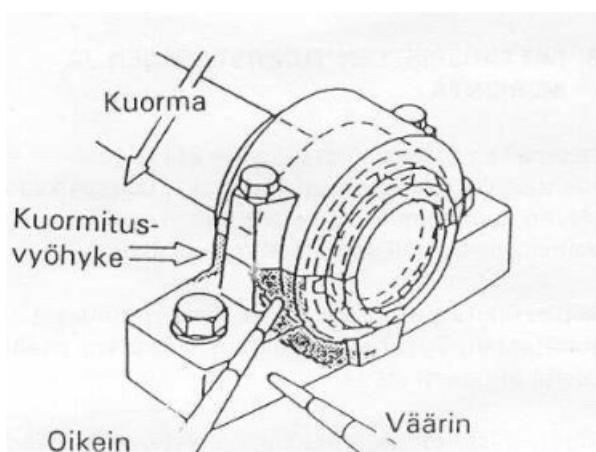
## 2.2 Mittauspisteen valitseminen

Peruseriaate mittauspistettä etsittäessä on se, että värähtelylähteen ja mittausanturin tulisi olla mekaanisesti mahdollisimman lähellä toisiaan. Värähtelylähteen ja mittausanturin välillä ei saa olla liikaa rajapintoja, koska korkeataajuinen värähtely menettää osan energiastaan rajapinnan kohdatessaan. Värähtelymittauksia hyödynnetään pyöriville koneille ja pyörivissä koneissa massat siirtyvät laakerien kautta runkoon. Mittauspisteet on siis tarkoituksenmukaista valita mahdollisimman läheltä laakerointikohtia. Mittaus tapahtuu yleensä akselin säteissuunnassa, mutta tarvittaessa voidaan mitata myös akselin suuntaisesti. (PSK 5702 2007, 2.)



Kuva 2 Värähtelymittausanturin paikan valinta (PSK 5702 2007)

Koneiden osien venymien ja siirtymien mittaamista varten voidaan hyödyntää suhteellista mittausta. Säteissuuntaiset akselivärähtelyt voidaan mitata käyttämällä kahta anturia, jotka asennetaan  $90^\circ$  kulmaan toisiinsa nähden. Huomionarvoista mittaustoi-  
menpiteissä on se, että mitattavan kohteen materiaali ja muoto vaikuttavat mittausar-  
voihin. Mittausanturi voidaan asentaa tilanteen mukaan joko koneeseen suoraan tai  
ulkoiseen rakenteeseen, mikäli se on tarpeeksi jäykkä. (PSK 5702 2007,3.)



Kuva 3 Mittauspisteen paikka iskusysäysmittauksessa (PSK 5702 2007)



### 2.3 Mittauspisteen tunnistaminen

Paikka, jossa mitattava laite sijaitsee, tulee merkitä yksiselitteisellä tunnistamismerkinnällä. Mitattavan koneen mittauskohdat merkitään numeroin käytettävän laitteen vapaasta päästä voimansiirron kulkusuunnan mukaisesti käytettävän laitteen vapaaseen päähän. Mittauspaikka tarkoittaa sellaista koneen tai koneikon osaa, josta mittaukset suoritetaan. Mittauspaikka voi sisältää useita mittauspisteitä. Mittauspisteellä tarkoitetaan kiinnityspistettä mittausanturille, joka myös määrää mittaussuunnan. Mittauspisteiden paikat merkitään selvästi maalilla, nipalla tai jollakin muulla helposti havaittavalla tavalla. (PSK 5702 2007, 3.)

### 2.4 Värähtelymittaustoiminnan suunnittelu

Kun värähtelymittausta aletaan suunnittelemaan, on muutamia huomionarvoisia asioita, joiden perusteella mittauksia kannattaa alkaa tekemään. Ensimmäisenä tehdään kunnonvalvonnan tarpeen määrittely, jolla selvitetään, onko mittaustoimintaa kannattavaa ylipäänsä aloittaa. (PSK 5705 2006, 2.) Kannattavuudella tarkoitetaan sitä, että onko käyttökustannuksien kannalta parempi valvoa laitetta jatkuvasti ja suorittaa tarvittavat huollot valvonnassa ilmenevien vikojen mukaisesti, vai onko laitteen rikkoutuessa korjauskustannukset pienemmät, kuin valvonnasta aiheutuvat kustannukset, jolloin valvontaa ei välttämättä kannata aloittaa.

Toisena vaiheena suoritetaan kartoitus kaikista laitteista, joille värähtelymittausta voidaan teknisestä näkökulmasta suorittaa ja valitaan sellaiset laitteet, joille valvonta on kannattavaa toteuttaa. Kunnonvalvontamenetelmäksi voidaan valita jokin muu, kuin värähtelyvalvonta, jos viimeksi mainittu ei sovellu laitteen ensisijaiseksi kunnonvalvontamenetelmäksi. (PSK 5705 2006, 2.)

Kolmantena asiana laaditaan mittaussuunnitelma valituille laitteille. Suunnitelma kattaa käytettävät valvontamenetelmät, menetelmäkohtaiset raja-arvot, mittausvälit, mittausjärjestelmät, mittausten käytännön järjestelyt, dokumentoinnit, raportoinnit ja seurannan. (PSK 5705 2006, 2.)

#### 2.4.1 Tekninen toteutettavuus

Laitteiden kunnan arviointi värähtelyvalvontaa käyttämällä on teknisesti mahdollista toteuttaa, kun on olemassa jokin vikaantumiseen tai muutokseen viittaava värähtelyn raja-arvo. Vikaantumismekanismien täytyy olla seurattavissa ja ennustettavissa, sekä mittaukset täytyy pystyä tekemään lyhyemmällä aikavälillä, kuin millä vika etenee vaurioksi. (PSK 5705 2006, 3.)

#### 2.4.2 Valvontamenetelmien määrittely

Valvontamenetelmän valintaa varten määritellään jokaisesta laitteesta komponenttien vikaantumismekanismit ja todennäköiset vikaantumisnopeudet. Jokaiselle laitteelle määritellään laitekohtainen ja riittävä kunnanvalvontataso. Tavallisesti kokonaistasovalvonta on riittävä vaihtoehto, mutta joissakin tapauksissa voidaan tarvita tarkempia valvontamenetelmiä, kuten tunnusluku- tai spektrivalvontaa. Kahta viimeksi mainittua tapaa käytetään silloin, kun kokonaistasovalvonnan antamien arvojen perusteella ei pystytä luotettavasti arvioimaan vian kehittymistä. (PSK 5705 2006, 3.)

#### 2.4.3 Kuntokartoitus ja -tutkimus

Koneiden kunto arvioidaan kuntokartoituksilla, jotka tehdään kertaluontoisesti. Kuntokartoituksella saadaan valitusta kohteesta tarvittava kokonaiskuva, jolla saadaan selville merkittävimmät korjaustarpeet ja muiden tutkimusten tarve. Kuntokartoituksella saadaan ainoastaan kertaluontoinen arvio koneen kunnosta. Sillä ei siis voida valvoa koneen kunnan kehitystä. (PSK 5705 2006, 4.)

#### 2.4.4 Raja-arvojen määrittely

Hälytysrajoja määritetään kaksi jokaiselle tunnusluvulle, jotta voidaan havaita laitteiden kunnossa tapahtuvat muutokset. Alemman hälytysrajan ylittyminen tarkoittaa

varoitusta ja edellyttää tehostustoimia kunnonvalvonnan osalta sekä varautumista korjauksiin. Ylempi hälytysraja merkitsee jo vakavampaa vauriovaaraa ja edellyttää yleensä laitteen välitöntä pysäyttämistä. Näiden kahden hälytysrajan alapuolelle voidaan määrittää lievempää poikkeamaa ilmaiseva huomautusraja. (PSK 5705 2006, 4.)

#### 2.4.5 Järjestelmätyypit

Värähtelyvalvontalaitteet voidaan jakaa karkeasti kolmeen ryhmään: kiinteät-, puolikiinteät- ja kannettavat mittalaitteet. Suurien vikaantumisnopeuksien ja häiriöherkkyyksien ollessa kyseessä, sopii kiinteä mittausjärjestelmä parhaiten valvontaan. Esimerkkitapauksina suurien vikaantumisnopeuksien kohteina ovat turbiinit, kompressorit ja generaattorit. (PSK 5705 2006, 7.)

Puolikiinteät mittausjärjestelmät sopivat sellaisiin laitteisiin, joiden luokse pääseminen on haastavaa. Tällaisissa tapauksissa voidaan valvottavaan laitteeseen asentaa anturit ja johdottaa ne sellaiseen paikkaan, josta mittauksia on helpompi suorittaa kannettavalla mittauslaitteella. (PSK 5705 2006, 7.)

Kannettavien mittauslaitteiden kanssa käytetään siirrettäviä antureita, ja mitataan helposti luokse päästäviä kohteita, joiden vikaantuminen on hidasta mittausväleihin nähden. Kannettavien mittalaitteiden avulla voidaan myös täydentää kiinteiden mittalaitteiden tarjoamaa tietoa. (PSK 5705 2006, 7.)

#### 2.4.6 Mittausvälit

Värähtelymittauksien aikaväli määritellään valvontamenetelmän, kohteen kriittisyyden, häiriöherkkyyden, vikaantumisnopeuden ja kunnossapidon historiatietojen perusteella. Mittausväleihin tehdään poikkeus, jos mitattava laite on huollettu. Huollon jälkeisellä mittauksella varmistetaan huollon onnistuminen ja saadaan uudet vertailuarvot valvontaa varten. Mittaustoiminnan tehostaminen on tarpeellista, jos valvottavissa suureissa tapahtuu merkittäviä muutoksia. Tehostamistoimia voi olla esimerkiksi

mittausvälin lyhentäminen ja mittaustavan täydentäminen puolikiinteällä tai kiinteällä järjestelmällä. Yleensä mittaustoimintaa aloitettaessa tai laitteen koekäytössä valitaan mittaussväliksi suositeltua lyhyempi periodi. Valvontakokemuksen karttuessa voidaan mittaussväliä muuttaa. (PSK 5705 2006, 8.)

#### 2.4.7 Mittaustoiminnan järjestely

Tehokkaan ja sujuvan mittaustoiminnan onnistumisen kannalta on tiettyjä asioita, jotka pitää ottaa huomioon. Luonnollisesti kaikki henkilöt, jotka ovat mittaustoiminnassa mukana, tarvitsevat siihen koulutuksen. Mittauskäytännöt pitää myös suunnitella etukäteen sekä kehitys- ja suoritusvastuut määritellä oikeille henkilöille. Mittausohjelmistojen ylläpitovastuu tulee määritellä ja laitteiden tiedot kerätä mittauksia varten. Mittaustuloksia tulisi päästä tarkastelemaan heti mittaustoiminnan jälkeen ja historiatiedot olisi syytä säilyttää, jotta niitä voidaan myöhemmin hyödyntää tarvittaessa. (PSK 5705 2006, 10.)

#### 2.5 Anturityypin valinta

Käytettävien anturien tyyppi tulee valita valvottavan kohteen mekaanisten rakenteiden ja ominaisuuksien mukaan. Anturin valinta perustuu myös mitattavaan värähtelytasoon ja anturin on oltava lineaarinen valvottavalla taajuusalueella. Liukulaakeroitujen kohteiden mittaamiseen soveltuu parhaiten pyörrevirta-anturi, joka on tyypiltään siirtymäanturi. Siirtymäanturit soveltuvat yleisesti suhteellisen värähtelyn ja akselin aseman mittaamiseen. Värähtelyvalvonnassa yleisimmin käytetty anturityyppi on kiihtyvyyssanturi. Sitä voidaan käyttää absoluuttisen värähtelyn mittaukseen laajalla taajuusalueella ja mittaussuure pystytään muuttamaan nopeudeksi. Iskusysäysanturin optimaalinen käyttökohde on vierintälaakerit, niiden korkeataajuisen värähtelyn vuoksi. Anturit tulee suojata käyttöympäristössään. Anturille valitaan käyttöympäristön mukaan sopivasta materiaalista valmistettu kuori, esimerkiksi haponkestävä teräs ja hermeettisesti suljettu. (PSK 5703 2018, 2.)

Kiihtyvyyssanturin valintaan vaikuttavat tärkeimmät tekijät ovat ympäristöolosuhteet, taajuusalue ja amplitudialue. Ympäristöolosuhteissa on useampi muuttuja: käytettävissä oleva tila (kaapelin lähtösuunta, anturin koko ja kiinnitystapa), lämpötila, kosteus, likaisuus, tilaluokka ja sähkömagneettiset häiriöt. (PSK 5703 2018, 2.)

Valmetin WVS-100 langaton anturi on hyvä esimerkki kiihtyvyyssanturista. Sillä on mahdollista mitata värähtelyjä laajalla taajuusalueella kahden erilaisen anturielementin avulla. Piezo- elementti mahdollistaa korkeampien värähtelytaajuuksien mittaamisen ja MEMS- elementti puolestaan matalampien taajuuksien mittaamisen. WVS-100 anturi toimii ladattavalla akulla ja siihen yhdistäminen tapahtuu WLAN- yhteydellä. (Valmetin www-sivut 2021.)



Kuva 4 WVS-100 anturi (Valmetin www-sivut 2021)

## 2.6 Kunnonvalvonnan edut

Suurin hyöty kunnonvalvonnasta saavutetaan oikein toteutettuna kokonaiskustannuksissa. Isompien risteilyalusten tapauksissa kunnonvalvonta on tehokas tapa säästää huoltokustannuksissa toimintojen optimointimahdollisuuksien kautta. Toimintojen optimoinnilla tarkoitetaan sitä, että kunnonvalvonnan piiriin kuuluvia laitteita ei huolleta tarpeettomasti, vaan vasta sitten, kun valvontalaitteiston tarjoama tieto niin kehoittaa tekemään. Turvallisuuden näkökulmasta kunnonvalvonta on hyvä valinta aluksen pääasialliseksi kunnossapitolajiksi. Etenkin isot pyörivät koneet aiheuttavat lähes poikkeuksetta aina enemmän tai vähemmän vaaraa sivullisille vika- tai rikkoutumislanteissa. Kunnonvalvonnan värähtelymittauksilla pystytään hyvinkin suurella varmuudella eliminoimaan kaikki yllättävät ja vaaraa aiheuttavat viat koneissa ja laitteistoissa. Päästöjen osalta kunnonvalvonta on myös hyvä valinta, sillä optimaalisesti käytävät koneet minivoivat sekä jatkuvien, että kertaluontoisten päästöjen riskejä. Tämän päivän maailmassa päästöjen minimointi on yksi tärkeimpiä tarkastelun näkökulmia myös merenkulussa. (Aalto 1994, 33.)

Kunnonvalvonnan eduiksi voidaan myös katsoa sen monikäyttöisyys. Mittaustuloksia voidaan hyödyntää itse kunnossapidon lisäksi myös laitteiden käytön kehittämiseen ja laatuvaihteluiden pienentämiseen. Vikatilanteissa uuden kunnonvalvontajärjestelmän ja uuden laitteen ollessa kyseessä, voidaan mittaustuloksia hyödyntää takuuajana melko kiistattomina argumentteina. Kunnonvalvonnalla kerätyt tiedot ovat myös korvaamaton lähtökohta uusille tuotekehitysprojekteille ja jatkosuunniteluille. (Aalto 1994, 33.)

### 3 VÄRÄHTELYVALVONNAN KÄYTTÖ RISTEILYALUKSELLA

Tässä osiossa perehdyttiin värähtelyvalvonnan nykytilanteeseen laivoilla. Kunnonvalvonta osana laivojen kunnossapitoa on toistaiseksi harvinainen ja kehitysasteella oleva kunnossapidon muoto. Teollisuudessa kunnonvalvonnan värähtelymittaukset on havaittu erittäin toimivaksi ja kustannustehokkaaksi kunnossapidon muodoksi. Nykyaikaiset suurimmat rahtialukset ja matkustaja-alukset sisältävät kuitenkin suurin piirtein yhtä paljon laitteistoa, kuin mikä tahansa voimalaitos. Kunnonvalvonnan on todettu olevan ainakin suurilla matkustaja-aluksilla tehokas vaihtoehto perinteiselle käyttötunteja mittaavalle kunnossapidolle. Tämän osion tiedot värähtelyvalvonnasta risteilyaluksilla perustuvat Valmet Automaatio Oy:n tarjoamiin tietoihin ja kokemuksiin aiheesta. Tiedot on kerätty suullisilla haastatteluilla ja sähköpostiviestinnällä.

#### 3.1 GTS Celebrity Constellation

Esimerkkitapauksena värähtelyvalvonnan nykytilanteesta käytin Royal Caribbean Cruises Ltd:n omistamaa GTS Celebrity Constellation risteilyalusta. Alus edustaa isojen risteilyalusten luokassa vanhempaa sukupolvea, sillä se on otettu käyttöön vuonna 2002. Constellation on 294 metriä pitkä ja 32 metriä leveä ja sen kokonaiskapasiteetti on 90940 GT. Miehistöä aluksella on noin 1000 henkeä ja matkustajakapasiteetti on 2556 henkeä. Constellation seilaa Maltan lipun alla ja kotisatamina toimivat Tampa Floridassa ja Venetsia Italiassa. (Cruisemapper [www-sivut](http://www.cruisemapper.com) 2021.)

Constellationin voimanlähteenä toimii COGES, eli yhdistetty kaasua ja höyryturbiinilaitos ja sen lisäksi vielä yksi dieselmoottori. Kaasuturbiineilla ja dieselmoottorilla tuotetaan propulsioon tarvittava sähköteho kahteen 19MW Rolls-Royce MerMaid azimuth potkuriin. Lisäksi voidaan vielä ohjata kaasuturbiinien pakokaasut ekonomaisiin pakokaasukattiloihin, jossa tuotettu höyry syötetään höyryturbiinille lisäsähkötehoa varten. Alukseen tehtiin iso elinkaaripäivitys telakalla 2018, jonka yhteydessä asennettiin Valmetin konevalvonta-automaatiojärjestelmä, johon sisältyy värähtelyvalvontamahdollisuus halutuille koneille ja laitteille. (Cruisemapper [www-sivut](http://www.cruisemapper.com) 2021.)



Kuva 5 GTS Celebrity Constellation (wikipedia)

### 3.2 Värähtelyvalvonnan piiriin kuuluvat laitteet

GTS Celebrity Constellationin kokoisessa aluksessa on paljon laitteistoa, jotka ovat sijoitettu värähtelyvalvonnan piiriin. Listan tärkeimpinä valvottavina kohteina ovat molemmat kaasuturbiinit, höyryturbiini ja dieselmoottori. Nämä koneet ovat aluksen operoinnin kannalta kaikista tärkeimmät, joten niihin on päätetty asentaa kiinteät värähtelyvalvontalaitteet ja anturit. Kiinteällä valvontajärjestelmällä voidaan suorittaa värähtelyvalvontaa jatkuvana mittauksena, mikä on turbiinien tapauksessa hyvä ratkaisu. Värähtelyvalvontajärjestelmä sisältyy Valmetin toimittamaan automaatiojärjestelmään, joten turbiinien kuntoa voidaan seurata reaaliajassa konevalvomosta. Dieselmoottoriin sisältyy Wärtsilän oma kunnonvalvonta ja värähtelymittausseuranta, joten se ei kuulu laivan muiden laitteiden kanssa samaan värähtelyvalvonnan piiriin. Turbiinien suuret kierrosnopeudet aiheuttavat huonoimmissa tapauksissa välittömät ja laajat vauriot, joten on tärkeää huomata vika mahdollisimman ajoissa. Kaikkien muiden laitteiden valvonta tapahtuu magneettisesti kiinnitettävillä antureilla ja kannettavalla mittauslaitteella. Constellationin tapauksessa mittauslaite on Valmet maintenance pad. (Ivanov henkilökohtainen tiedonanto 22.7.2021.)



Värähtelyvalvonnan seuraavaksi tärkeimmät kohteet ovat Kaasuturbiinien ja dieselmoottorin merivesijäähdytyspumput. Pumppuja valvotaan jaksottaisena valvontana siirrettävien anturien ja kannettavan mittauslaitteen avulla. Isossa risteilyaluksessa ilmastoinnin merivesilauhduttimien pumput ovat myös tärkeässä asemassa. Vaikka ilmastointi ei olekaan aluksen operoinnin kannalta kriittistä laitteistoa, on ilmastoinnin tärkeys erittäin korkealla verrattuna muihin laitteisiin. Tämä johtuu siitä, että Constellationin tyyppisessä risteilyaluksessa on parhaimmillaan yli 2500 matkustajaa, joiden matkustusmukavuus tulisi säilyä kaikkina aikoina. (Ivanov henkilökohtainen tiedonanto 22.7.2021.)

Värähtelyvalvonnan piiriin kuuluvia laitteita ovat lisäksi kaasuturbiinien ja dieselmoottorin polttoainepumput. Äkillinen laakerin rikkoutuminen polttoainepumpussa voi pahimmillaan johtaa black-out- tilanteeseen. Laivan sähköverkkoon kytketyn kaasuturbiinin yhtäkkinen sammuminen aiheuttaa laivassa niin sanotun black-out- tilanteen, jossa pääsähköverkosta häviää jännite, ja kaikki siitä sähkövirran ottavat laitteet sammuvat. Näihin laitteisiin lukeutuvat monet laivan navigointiin ja yleiseen operointiin liittyvät järjestelmät. Ongelmaksi muodostuu aina myös se, että vaikka hätägeneraattorin pitäisi näissä tilanteissa turvata sähköntuotanto laivan toiminnan kannalta välttämättömille laitteille, aiheuttaa black-out- tilanne aina häiriön laivan normaalille toiminnalle ja ohjattavuudelle. Polttoainepumppujen laakeriviat on mahdollista tunnistaa ja siten ennaltaehkäistä hallitsematon vaurio värähtelyvalvontaa hyväksikäyttäen. (Jalkanen sähköposti 22.7.2021.)

Kaasuturbiinien ja höyryturbiinin voiteluöljypumput, höyrykattiloiden syöttövesipumput, höyrylieriön kiertovesipumput, makeavesipumput, kaasuturbiinien hydrauliset käynnistimet ja potkurimoottorien merivesijäähdytyspumput kuuluvat myös värähtelyvalvonnan piiriin (Jalkanen sähköposti 22.7.2021).

### 3.3 Valmet Maintenance Pad

Kannettavasta värähtelyvalvontalaitteesta käytin esimerkkinä Valmet Maintenance Pad- nimistä tablet tietokonetta. Valmet Maintenance Pad on myös käytössä GTS Celebrity Constellationilla. Kyseinen laite toimii sekä tiedon keruu-, että tiedon analysointilaitteena. Käyttäjärjestelmänä toimii Windows 7 Professional ja langaton yhteys antureihin saadaan WLAN:n kautta. Maintenance Pad on tarkoitettu käytettäväksi ”kenttäolosuhteissa”, eli tässä tapauksessa laivan konehuoneessa, mutta se voidaan myös tarvittaessa telakoida ja kytkeä isompaan näyttöön sekä yhdistää irralliseen hiireen ja näppäimistöön. Kun mittauksia tehdään Constellationilla, tapahtuu se käytännössä siten, että liikuteltavat anturit asetetaan mitattavaan koneeseen ja Maintenance Pad yhdistetään langattomasti anturiin tai antureihin. Antureiden tarjoamat värähtelymittaustiedot tallentuvat Maintenance Padille SSD levyille, josta ne ovat helposti saatavissa haluttaessa vertailla aikaisempia tuloksia. Mittausten tarkempaan analysointiin ei varsinaisesti ole aluksen konemiestillä aikaa eikä pätevyyttä. Värähtelymittausanalyysi tehdään käytännössä sellaisella tarkkuudella, että mittauservojen tulee olla hälytysrajojen sisällä, eikä mitään suurempia poikkeamia saa näkyä värähtelyjen aallonpituuksissa tai taajuuksissa. Hankalammissa tulkitsemistapauksissa kutsutaan aina värähtelymittauksiin erikoistunut ulkopuolinen urakoitsija tekemään tarkempia analyysyjä jatkotoimenpiteitä varten. Tulkinnan päätöksestä saattaa olla esimerkiksi kiinni se, että pitääkö kaasuturbiinille alkaa suunnittelemaan huoltoa vai voiko sen käyttöä jatkaa normaalisti. (Jalkanen sähköposti 17.11.2019.)

Käytettäviä antureita ja moduuleita on kolmea eri mallia, joiden käyttö riippuu mitattavasta suureesta. WVS-100 anturi on tarkoitettu erityisesti värähtelymittauksiin. Anturi sisältää kaksi värähtelyjä aistivaa elementtiä, yhden piezosähköisen ja yhden kolmiaksaalisen MEMS- elementin, sekä lämpötilamittauksen. WMM-100 moduulilla voidaan siirtää tavallisesta IEPE värähtelymittausanturista tiedot eteenpäin Maintenance Padiin, mikäli anturissa itsessään ei tiedonsiirtomahdollisuutta ole. WTM-100 moduulilla voidaan poimia tiedot kierrosnopeuksia optisesti, magneettisesti tai induktiivisesti mittaavista antureista, joissa ei ole langatonta tiedonsiirtomahdollisuutta. Kaikissa edellä mainituissa anturi- ja moduulityypeissä on myös sisäinen tallennustila, jossa tietoja voidaan säilyttää väliaikaisesti. (Jalkanen sähköposti 17.11.2019.)

### 3.4 Valvontareitit

Värähtelymittauksia suoritetaan noudattamalla etukäteen suunniteltua reittiä, johon sisältyy tietyt valvonnan piiriin kuuluvat laitteet. Värähtelyvalvonnan piiriin kuuluville laitteille määritellään tietyt mittausvälit, joita toteutetaan kulkemalla konehuoneessa tietyt reitit. Kaikkia valvonnan piiriin kuuluvia laitteita ei ole tarkoituksenmukaista käydä mittaamassa jokaisella reittikierröksellä. Reittejä voidaan määritellä etukäteen muutamia erilaisia, joihin jokaiseen sisältyy tietyt laitteet riippuen niiden mittausväleistä.

Valvontareitit ovat voimalaitoksissa paljon käytetty tapa suorittaa värähtelyvalvontaa. Ennalta määriteltyjen reittien avulla värähtelyvalvonnasta saadaan mahdollisimman tehokasta ja tarkoituksenmukaista. Constellationin värähtelyvalvonnan toteutusmenetelmistä minulla ei ollut tietoa tätä työtä tehdessä.

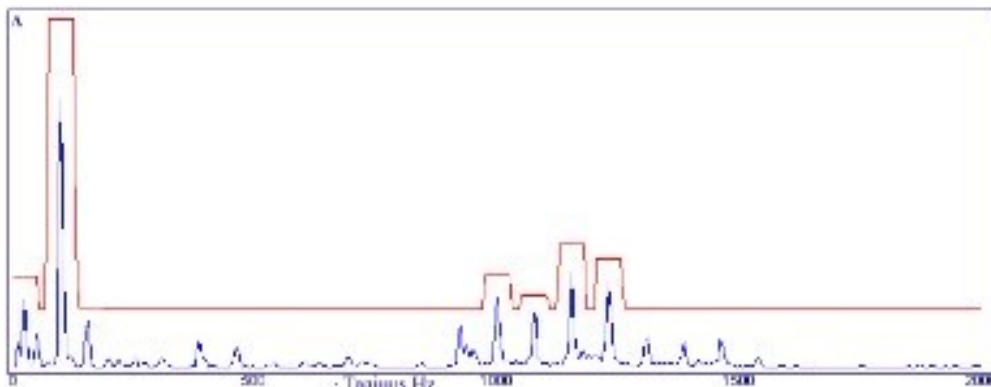
## 4 VÄRÄHTELYVALVONNAN TEOREETTINEN TOTEUTUS ITÄMERELLÄ SEILAAVALLA MATKUSTAJA-AUTOLAUTALLA

Työn viimeisessä osiossa pohdittiin teoriatasolla, miten värähtelyvalvontajärjestelmä voisi toimia kahdenkymmenen vuoden ikäisessä matkustaja-autolautassa, joka liikennöi Itämeren alueella. Kokoluokassaan kyseinen alus on selvästi pienempi, kuin valtamerillä seilaavat risteilyalukset, mutta sisältää siitä huolimatta sen verran paljon koneita ja laitteistoa, että värähtelyvalvonnasta saattaisi olla hyötyä. Valitettavasti en saanut lupaa kertoa aluksen nimeä tämän työn yhteydessä, mutta muuten pyrin perehtymään teoreettisen kunnonvalvonnan piiriin sijoitettaviin laitteisiin riittävällä tarkkuudella. Valitsin tätä pohdintaa varten tarkoituksella sellaisen aluksen, joka on minulle entuudestaan tuttu työn puolesta. Aluksen laitteiston kohtuullisen hyvästä yleistunteuksesta on hyötyä värähtelyvalvontajärjestelmän suunnittelemisessa teoriatasolla.

### 4.1 Pää- ja apudieselmoottoreiden valvonta

Aluksen päävoimanlähteenä toimii neljä Wärtsilä 12V46C- tyyppistä dieselmootoria. Pääkoneet ovat laivojen operoinnin kannalta hyvin tärkeitä. Pääkoneiden tarkoitus on tuottaa propulsiovoimaa, jonka avulla alus saadaan vedessä liikkeelle. Kyseessä olevassa matkustaja-autolautassa voima siirretään moottoreilta potkureille akseleiden ja kytkimillä varustelluilla alennusvaihteistoilla. Tässä yhdistelmässä on paljon pyöriä massoja ja myöskin paljon potentiaalisia kunnonvalvonta ja erityisesti värähtelymittauskohteita. Wärtsilä 46 tyyppin koneet on toimitettu koneisiin integroidulla kampiakselin värähtelyjä mittaavalla järjestelmällä. Matkustaja-autolautan koneet ovat kuitenkin 20 vuotta vanhoja, joten nekin voisi samalla päivittää samaan Valmetin värähtelyvalvonta kokonaisuuteen, kuin muutkin tässä työssä suunnitellut kunnonvalvonnan piiriin sijoitettavat laitteet. Jo yhdessä pääkoneessa olisi mielestäni vähintään yhdeksän potentiaalista värähtelymittauspistettä: kampiakselin molemmat päät, nokka-akselien molemmat päät laakerien osalta sekä mekaaniset pumput. Pääkoneissa on mekaanisesti toimivat HT- ja LT- jäähdytysvesipumput, jotka kierrättävät jäähdytysvettä järjestelmässä niin kauan, kuin kone käy. Mekaaninen voiteluöljypumppu toimii samalla

periaatteella, kuin edellä mainitut jäähdytysvesipumput. Apukoneina toimivat Wärtsilä 9L20 dieselmoottorit. Apukoneiden valvonta voisi keskittyä kampiakseliin, joka on kytketty sähköä tuottavaan generaattoriin. Liukulaakereiden ollessa kyseessä on järkevintä suorittaa värähtelyvalvontaa siirtymänä. Siirtymävalvontaa varten on olemassa siirtymäanturit, joilla mahdollistetaan myös akselin aseman valvominen laakerin sisällä. (PSK 5706 2015, 2.) Pää- ja apukoneiden värähtelyvalvonnan voisi hyvinkin aloittaa kokeilunomaisesti spektrivalvonnalla. Molempien konetyyppien tapauksessa spektrivalvonta olisi todennäköisesti riittävän tarkka valvontamenetelmä, jolla voidaan havaita useita vikaantumismekanismia. Perusideana spektrivalvonnassa on verrata mitattua spektriä aikaisempien mittausten perusteella muodostettuun hälytysrajaspektriin. Vaihtoehtoinen valvontamenetelmä pää- ja apukoneille olisi mitä luultavimmin tunnuslukuvalvonta, koska sekin mahdollistaa useampien eri mittausarvojen seurannan. (PSK 5706 2015, 4.)



Kuva 6 Spektrivalvonta (PSK 5706 2015)

Pää- ja apukoneiden värähtelyvalvonnassa parhaiten toimiva järjestelmäratkaisu olisi mitä luultavimmin kiinteä valvontajärjestelmä. Kaikkien koneiden luokse pääsee aluksella kulkemaan helposti ja etenkin, kun kyseessä on dieselmoottoreiden ja generaattoreiden yhdistelmiä, on syytä valita sellainen järjestelmä, joka tukee kohtuullisen suurien vikaantumisenopeuksien ja häiriöherkkyyksien mittaamista. Pääkoneet on kytketty alennusvaihteistoihin siten, että stuurpuurin puolella on kaksi moottoria, joilla on yksi yhteinen vaihteisto ja sama asetelma pätee paapuurin puolella. Varsinaisia potkureita on aluksessa kaksi, jotka on kytketty yksi kumpaankin vaihteistoon. Mikäli jompaankumpaankin vaihteistoon tulisi jokin vika, on automaattisesti toinen potkuri pois käytöstä.

Tämän vuoksi myös pääkoneiden ja alennusvaihteistojen värähtelyvalvontaa on perusteltua suorittaa kiinteällä järjestelmällä, mielellään melko tiheillä mittausväleillä.

Käytännössä mittaus tapahtuisi todennäköisesti vahtia ajavan konemestarin tai päivätyöaikaa noudattavan 2. konemestarin toimesta esimerkiksi kaksi kertaa vuorokaudessa tai useammin. Kyseisellä matkustaja-autolautalla värähtelymittaus sopisi hyvin tehtäväksi silloin, kun koneiden muitakin käyttöarvoja merkataan konepäiväkirjaan. Kunnonvalvonnan mittausten analysointipisteen voisi sijoittaa konevalvomoon mahdollisuuksien mukaan muun laiva-automaation yhteyteen. Laitteisto tulisi kuitenkin asentaa siten, ettei se häiritse muita vahdinajotoimenpiteitä.



Kuva 7 Wärtsilä 12V46C (Matkustaja-autolautta)

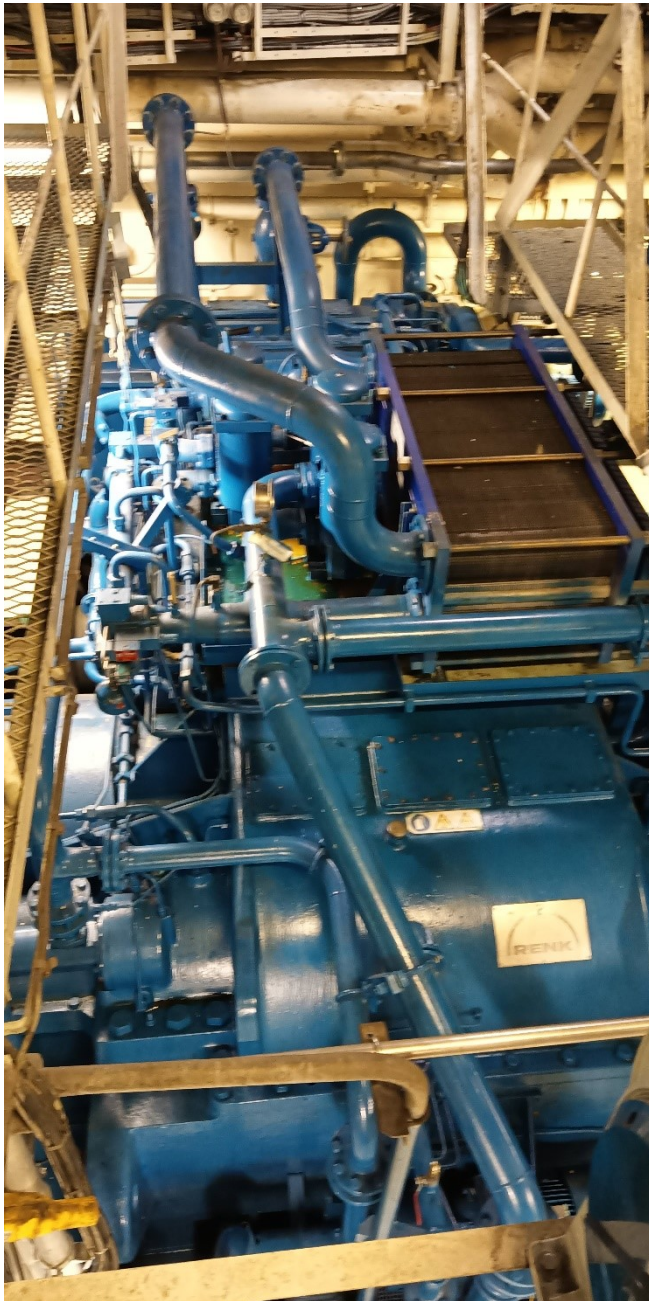


Kuva 8 Wärtsilä 9L20 ja generaattori (matkustaja-autolautta)

#### 4.2 Vaihteistot ja potkuriakseli

Tarkastelun alla olevassa matkustaja-autolautassa on kaksi alennusvaihteistoa, jotka ovat kytketty kumpikin kahteen pääkoneeseen. Vaihteiston monimutkaisemman rakenteen vuoksi siinä ei kannata käyttää ihan samanlaista värähtelyvalvontamenetelmää, kuin pää- ja apukoneissa. Vaihteistossa on paljon pyöriä hammasvaihdepareja, joiden tehokkaaseen kunnonvalvontaan ei riitä pelkkä kokonaistasovalvonta. Tässä tapauksessa voisi olla perusteltua käyttää tunnuslukuvalvontaa, aikatasovalvontaa ja spektrivalvontaa, jotka mahdollistavat useamman erilaisen värähtelyn mittaamisen taajuustasossa ja aikatasossa. Antureina käytettäisiin siirtymä-, kiihtyvyyss- ja iskusysäysantureita, jotta saadaan mahdollisimman monta erilaista mittaussuureta analysoitavaksi. Mittausanalyysistä esimerkkeinä: pyörimistaajuudella tapahtuvan värähtelyn voimakkuus ja vaihekulma, pyörimistaajuuden monikerroilla tapahtuvan värähtelyn voimakkuus, värähtelyn voimakkuus vierintälaakerin sysäystaajuuksilla ja niiden monikerroilla, värähtelyn voimakkuus lapataajuuksilla ja monikerroilla, värähtelyn voimakkuus hammaspyöräparien ryntötaajuuksilla, niiden sivunauhoilla ja monikerroilla sekä rakenteen valitun ominaistaajuuden sisältävän taajuuskaistan tehollisarvo. Aikatasossa laskettavia tunnuslukuja ovat: huipusta huippuun arvo, huippuarvo, tehollisarvo, huippukerroin ja kurtosis. Kurtosis on tilastotieteellinen käsite ja se kuvaa jakauman muotoa. (PSK 5706 2015, 3.) Spektrivalvonnalla voidaan havaita akseleiden linjausvirheitä, vaurioita tai kokonaan murtuneita hammasrattaita sekä laakerivikoja.

Tunnuslukuvalvonnan osalta aikatasovalvonta on vaihteistojen osalta tehokkaampi tapa analysoida mittaustuloksia. Sen avulla pystytään havaitsemaan hyvinkin tarkasti esimerkiksi yksittäisen hammasrattaan pienetkin rakennevirheet tai linjausvirheestä johtuvat häiriöt tietyn aikasegmentin sisällä. (Mobius Institute 2014.)

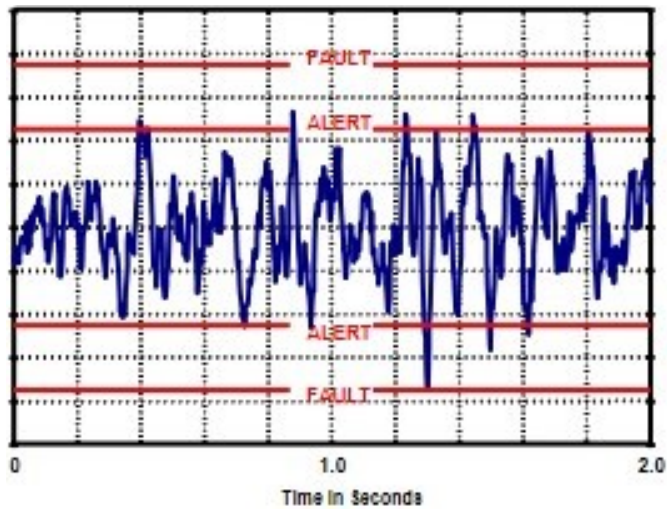


Kuva 9 Alennusvaihteisto (matkustaja-autolautta)

Mittausjärjestelmä voisi vaihteiston tapauksessa olla kiinteä järjestelmä, koska sen luokse on riittävän helppo kulkea ja vikaantumisnopeudet ovat todennäköisesti sen verran suuria, että kiinteän järjestelmän tuomat edut ovat perusteltuja. Mittaustoiminta



voisi olla ainakin alkuun jatkuvatoimista, mutta harkinnan mukaan sen voisi keventää määrävälein tapahtuvaksi, jos tarvetta jatkuvalle mittaamiselle ei tunnu olevan.



Kuva 10 Tunnuslukuvälvonta aikatasossa (PSK 5706 2015)

Potkuriakselien kohdalla värähtelymittaus kannattaisi mielestäni keskittää konehuoneessa oleviin painelaakereihin. Painelaakerin tehtävä on taata massiivisen akselin mahdollisimman vaivaton pyörintä ja samalla toimia tukipisteenä useiden metrien mittaiselle akselille. Painelaakereille on suositeltu ihan omaa värähtelymittausmenetelmää. Siinä on ajatuksena kiinnittää kaksi pyörrevirta-anturia koneen runkoon akselin suuntaisesti kohtisuoraan mittauspintaa vasten. Matkustaja-autolautan tapauksessa nämä anturit kiinnitettäisiin todennäköisesti painelaakereiden runkoon. Antureiden tulisi olla mittausten osalta sellaisia, että akseli pysyisi kaikissa käyttötilanteissa lineaarisella mittaalueella. Anturit täytyy asentaa mittaushohteeseen siten, että niiden mittauskentät eivät häiritse toisiaan. Anturit ovat myös jokseenkin herkkiä häiriöille, joten niiden kiinnityskohtien lähellä ei saisi olla mittauskenttää häiritseviä rakenteita. Jos antureiden mittaushohta sijaitsee kauempana painelaakerista, voi lämpölaajenemisesta aiheutua mittausrvirheitä. Mittauspinnan magneettiset ja mekaaniset ominaisuudet täytyy olla sellaiset, että ne eivät aiheuta mittausrvirhettä enempää, kuin 20 % mitattavasta alueesta kuitenkin enintään 6 µm. Molemmista mittaussignaaleista valvotaan akselin ja anturin välistä etäisyyttä. Antureiden asennuksen yhteydessä täytyy määrittellä anturin sijainti suhteessa laakerivälkyksiin ja kulumisvaraan, jotta hälytysrajat saadaan säädettyä oikeiksi. Jos mittauksia käytetään koneen suojaamistarkoituksessa, tulee suojauksen toimia vasta sitten, kun molempien mittausten raja-arvot ylittyvät. Mikäli

haluttaisiin vielä tarkentaa pyörrevirta-antureiden tarjoamia mittaustuloksia, on mahdollista mitata lisäksi laakeritärinöitä ja lämpötilaa sekä tehdä öljyanalyyseja ja seurata prosessisuureita, kuten tehoa, virtausta, painetta ja kierroslukua. (PSK 5706 2015, 9.) Täydentävien mittausten tekeminen täytyy mieltä tietenkäin tapauskohtaisesti ja juuri tämän matkustaja-autolautan tapauksessa luultavasti riittäisi painelaakereiden värähtelyvalvonta ilman äsken mainittuja täydentäviä mittaussenetelmiä.

### 4.3 Merivesipumput

Tarkasteltavassa matkustaja-aluksessa on useamman eri laitteen jäähdytystä varten merivesipumppuja. Tärkeimpänä näistä tietenkäin pää- ja apukoneet. Pääkoneiden jäähdytysjärjestelmä on jaettu siten, että styyrpuurin ja paapuurin konepareilla on kummallakin oma lämmönvaihdin, jonka toisella puolella kiertää merivesi ja toisella puolella koneiden LT-jäähdytysvesi. Eli kahta konetta kohden on yksi lämmönvaihdin ja normaalisti riittää yksi käyvä merivesipumppu. Yhteensä merivesipumppuja on käytettävissä kolme, joita ohjataan automaation kautta konevalvomosta. Apukoneilla systeemi on lähes samanlainen, kuin pääkoneilla. Lämmönvaihtimia on kaksi, joista toinen on aina käytössä ja toinen valmiudessa. Merivesipumppuja apukoneilla on kaksi, joista toinen on käytössä ja toinen valmiudessa. Muita tärkeitä merivesipumppuja on höyrynlauhduttimen pumppu ja ilmastointikompressorien lauhduttimien merivesijäähdytyspumput.

Merivesipumppujen värähtelyvalvonnan voisi hyvinkin toteuttaa kannettavalla järjestelmällä, koska pumppujen luo pääsee kulkemaan melko vaivattomasti, eivätkä keskipakopumppujen vikaantumisnopeudet ole niin suuria, että puolikiinteää- tai kiinteää järjestelmää kannattaisi harkita. Keskipakopumpun yksinkertaisen rakenteen vuoksi valvontamenetelmäksi riittää varmasti kokonaistasovalvonta. Pumppukokonaisuus koostuu kuitenkin vain sähkömoottorista, pumpusta ja muutamasta kohtaa laakeroidusta akselista. Kannettavan järjestelmän etuina on sen helppo liikuteltavuus ja samojen antureiden käytettävyys useissa eri mittausskohteissa.



Kuva 11 Pääkoneiden merivesipumppu nro. 2 (matkustaja-autolautta)

#### 4.4 Muiden apulaitteiden kunnonvalvonta

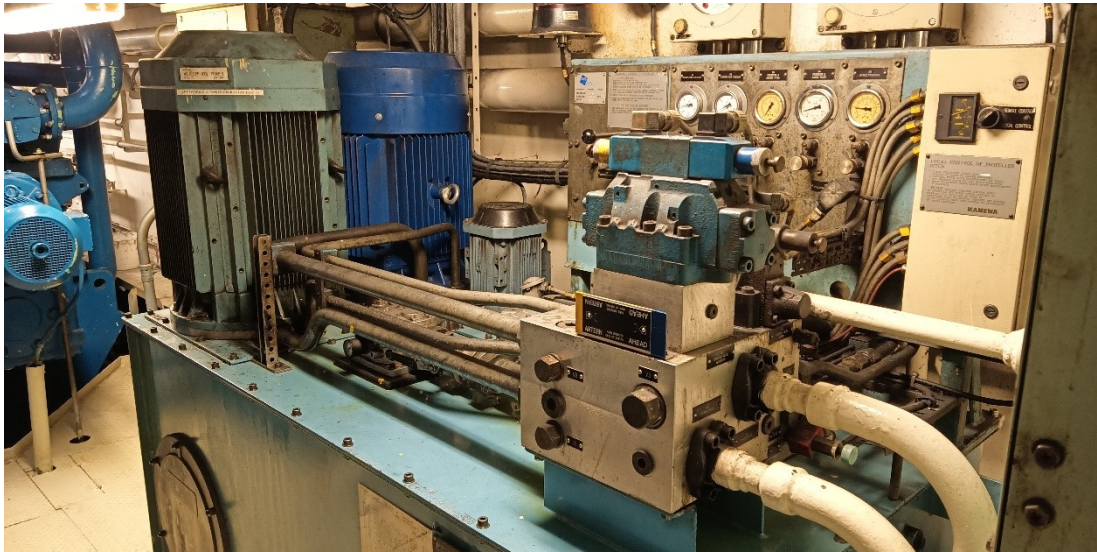
Matkustaja-autolautassa on lisäksi paljon pumppuja ja niitä pyörittäviä sähkömoottoreita, jotka voisivat kuulua kunnonvalvonnan piiriin. Höyrykattiloiden syöttövesipumput ja pakokaasukattiloiden syöttövesipumput ovat olennainen osa aluksen lämmitysjärjestelmää. Syöttövettä pumpataan kattiloihin, joka muutetaan lämmön avulla höyryksi. Höyryä käytetään mm. koneiden, käyttöveden ja sisäilman lämmitykseen. Syöttövesipumppujen kunnonvalvonta värähtelymittauksilla olisi siis ihan perusteltua. Makeavesipumput ovat myös tärkeä osa toimivaa laivakokonaisuutta. Makeavesipumpuilla siirretään puhdas käyttövesi tankeista hydroforien kautta jakeluun. Makeavesipumppujen toiminta on edellytys sille, että aluksen miehistö ja matkustajat saavat vettä juodakseen ja peseytyäkseen.



Kuva 12 Höyrykattiloiden syöttövesipumput (matkustaja-autolautta)

Peräsinkoneet ovat muiden laivojen tapaan erittäin tärkeät laitteet matkusta-autolautassa. Peräsinkoneita on tämän laivan tapauksessa kaksi, koska myös peräsimiä on kaksi. Kummassakin peräsinkoneyksikössä on kaksi sähkömoottorilla pyörivää pumpua, jotka paineistavat hydraulisen järjestelmän, jolla peräsimiä käännetään. Pumpuista toinen on käytössä ja toinen valmiudessa. Peräsinkoneiden luokse pääseminen on sen verran hankalakulkuisemman reitin päässä, että tässä tapauksessa puolikiinteä värähtelyvalvontajärjestelmä voisi olla perusteltu vaihtoehto. Tässä tapauksessa anturit asennettaisiin hydraulikkaöljypumppuihin kiinteästi ja johdot vedettäisiin johonkin helpommin luokse päästävään paikkaan, josta mittaukset voidaan suorittaa

kannettavalla mittalaitteella. Mittauspaikkana voisi toimia esimerkiksi aluksen ”ahteripuolen töijäyskansi”, eli paikka, jossa kiinnitysköysiä operoidaan vinssien avulla.



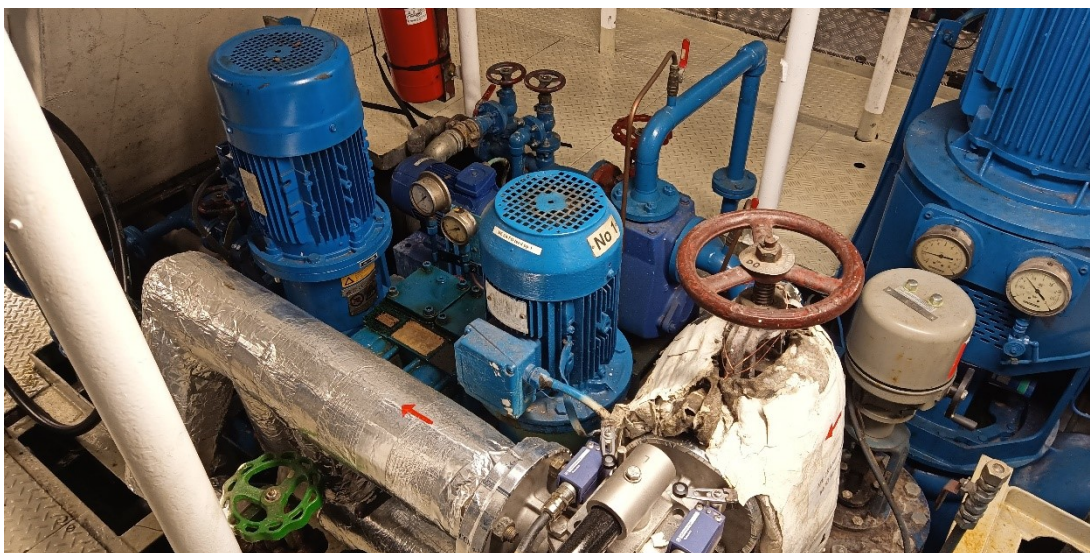
Kuva 13 Säätolapapotkurien hydraulikkayksikkö (matkustaja-autolautta)

Satamassa manööverausta varten on matkustaja-autolautassa kaksi sivuttaain asennettua säätolapaista keulapotkuria. Niiden tehtävänä on tuottaa sivuttaista työntövoimaa esimerkiksi tilanteissa, joissa laiva täytyy saada käännettyä ympäri ahtaassa satamaltaassa. Keulapotkureita pyörittävät isot sähkömoottorit, jotka saavat sähkövirran pääkoneiden akseligeneraattoreilta. Keulapotkureiden värähtelyvalvonnan voisi hankalan sijaintinsa puolesta toteuttaa samalla periaatteella, kuin peräsinkoneidenkin valvonnan, eli puolikiinteällä järjestelmällä ja sen voisi jakaa kahteen osaan: potkureita pyörittävien sähkömoottorien valvonta ja säätolapoja varten olevat hydraulikkayksiköt. Valvonta tulisi olla jaksottaista ja mittausajankohdat tulisi ajoittaa satamaan tuloihin ja lähtöihin. Muina aikoina keulapotkureita ei tarvita eikä värähtelymittauksia voi suorittaa, ellei mittauskohde ole käytössä.

Matkustaja-autolautan varsinaiset potkurit ovat säätolapamalliset, mikä tarkoittaa sitä, että aluksen nopeuden muutokset ja suunnan muutokset eteenpäin ja taaksepäin-suunnassa tapahtuvat potkureiden lapakulmaa säätelemällä. Lapakulmia säädellään hydraulisesti pumppujen avulla. Sähkömoottoreilla toimivat pumput sijoittaisin mielelläni kunnonvalvonnan piiriin, koska niiden toiminta on edellytys aluksen liikkumiselle.

Monien muiden pumppujen tavoin säätölapapotkurien pumpuille riittäisi kokonaistaso-  
sovalvonta kannettavalla mittausjärjestelmällä.

Polttoainejärjestelmän kunnonvalvonta olisi varmasti myöskin tervetullut lisä matkustaja-  
autolautan huoltosuunnitelmaan. Värähtelyvalvonnan osalta pääkoneiden polttoaine-  
järjestelmässä on neljä erilaista pumppua, jotka voisi sijoittaa kunnonvalvonnan pii-  
riin. Ensimmäisenä on polttoaineen siirtopumppu, jolla pumpataan polttoaine varasto-  
tankeista selkeystankkiin. Seuraavana on polttoaineseparaattori, joka puhdistaa sel-  
keystankissa olevaa polttoainetta ja pumppaa sen päivätankkiin. Päivätankista polt-  
toaine syötetään koneille yksinkertaistetussa muodossa syöttöpumppujen ja kierrätys-  
pumppujen avulla. Kaikkien edellä mainittujen pumppujen valvonta voitaisiin suorit-  
taa kokonaistaso-  
sovalvontana kannettavalla järjestelmällä.



Kuva 14 Pääkoneiden polttoainesyöttöpumput (matkustaja-autolautta)



Kuva 15 Pääkoneiden polttoaineenkiertopumput (matkustaja-autolautta)

#### 4.5 Valvontareitit

Värähtelyvalvonnan toteutuksen osalta suunnittelin reitit, joiden varrella on tietyt värähtelyvalvonnan piiriin kuuluvat laitteet lajiteltuna niiden kriittisyyden ja valvontavälien perusteella. Koin järkeväksi jakaa valvottavat laitteet kahden eri reitin varrelle, joista toisessa reitissä käydään läpi kaikki laitteet ja toisessa ikään kuin lisäkierroksena sellaiset laitteet, jotka edellyttävät valvontaa useammin. Nimesin valvontareitit siten, että reitti 1 sisältää kaikki laitteet ja reitti 2 vain kriittisimmät laitteet.

Reitti 1:een sisältyy kaikki värähtelyvalvonnan piiriin kuuluvat laitteet pois lukien pää- ja apudieselmootorit sekä alennusvaihteistot, koska niiden osalta valvonta suoritetaan kiinteällä järjestelmällä suoraan konevalvomosta. Reitti 1:een sisältyvät merivesipumput, polttoainepumput, makeavesipumput, syöttövesipumput, potkuriaksin painelaakeri, peräsinkoneet ja keulapotkurien hydraulikka. Reitti 1 suoritetaan esimerkiksi kerran vuorokaudessa, ja mittauksien tekeminen on 2. päiväkonemestarin vastuulla.

Reitti 2 koostuu vain kriittisemmistä laitteista, joka tarkoittaa sitä, että tämä reitti suoritetaan useammin, kuin reitti 1. Reitin suoritustiheys on kaksi kertaa vuorokaudessa

ja suoritusvastuu on 2. päiväkonemestarilla. Reitti 2 valvottavat laitteet ovat polttoainepumput sekä pää- ja apukoneiden merivesijäähdytyspumput. Polttoainepumput käsittelevät pää- ja apukoneiden osalta syöttöpumput ja kiertopumput, jotka voivat vikaantuessaan aiheuttaa joko black-out-tilanteen tai vakavan vaaratilanteen muulle laivaliikenteelle ohjailukyvyyn menetyksen seurauksena. Merivesijäähdytyspumput luokittelevat myös kriittisiksi laitteiksi siitä syystä, että vikaantumisen seurauksena moottoreiden jäähdytys olisi pois pelistä, joka taas aiheuttaa koneiden ylikuumentumisen ja se taas aiheuttaisi shut down-toiminnon seurauksena mahdollisen black-out-tilanteen tai muun vaaratilanteen.



## 5 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää kunnonvalvonnan värähtelymittauksien toimintaa ja hyötyjä laivaympäristössä. Tarkoitus oli myös lisätä yleistä tietoisuutta asiasta, koska värähtelyvalvonnan sovellukset ovat vielä varsin uutta tekniikkaa laivaympäristöissä. Pyrin lähestymään aihetta mahdollisimman yksinkertaisesta näkökulmasta, koska aihe oli itsellenikin entuudestaan täysin tuntematon ja mahdollisesti muille asiasta kiinnostuneille tahoille värähtelyvalvonta olisi tällä tavoin helpommin lähestyttävä aihe.

Uskon, että tulevaisuudessa värähtelyvalvonnalla on enemmän jalansijaa ainakin suurempien laivojen huoltosuunnitelmissa sen tuoman tarkkuuden ja ennalta-arvattuuden takia. Käyttötunteja mittaava huoltosuunnitelma näyttelee edelleen suurta osaa laivojen kunnossapidossa, mutta kunnonvalvonta vaikuttaa varsin toimivalta ja järkevältä vaihtoehdolta ainakin isojen risteilyaluksien kohdalla, joissa laitteistoa on paljon ja vikoihin ei juurikaan ole varaa ilman suuria tulojen menetyksiä.

Opinnäytetyöni tavoitteena oli tehdä perusmuotoinen selvitys värähtelyvalvonnasta yleisesti, sen nykytilanteesta laivoilla ja yhdestä mahdollisesta käyttökohteesta. Viimeksi mainitun osion oli tarkoitus olla täysin teoreettinen pohdinta värähtelyvalvonnan toiminnasta matkustaja-autolautta-mallisella aluksella. Koen päässeeni tavoitteeseen tehdä tutkimus värähtelyvalvonnan hyödyistä ja mahdollisuuksista laivoilla.

## LÄHTEET

Aalto, H. 1994. Kunnossapitotekniikan perusteet. Rajamäki: Kustannus Oy Kunnossapitotekniikka.

Cruisemapper www-sivut. Viitattu 24.7.2021. <https://www.cruisemapper.com/>

Ivanov, Z. 2021. Superintendent, Royal Caribbean Cruises, Ltd. Miami, FL. Haastattelu 22.7.2021. Haastattelijana Joonas Sulisalo.

Jalkanen, J-P. 2021. Constellation excel. Vastaanottaja: [joonas.sulisalo@gmail.com](mailto:joonas.sulisalo@gmail.com). Lähetetty 22.7.2021 klo 11:45. Viitattu 26.7.2021.

Jalkanen, J-P. 2019. Valmet Maintenance Pad. Vastaanottaja: [joonas.sulisalo@gmail.com](mailto:joonas.sulisalo@gmail.com). Lähetetty 17.11.2019 klo 12:53 Viitattu 29.7.2021.

Järviö, J., Piispa, T., Parantainen, T. & Åström, T. 2007. Kunnossapito. 4. uud.p. Hamina: KP-Media Oy.

Mobius Institute. 2014. Utilizing vibration analysis to detect gearbox faults. Viitattu 19.5.2021. <https://www.youtube.com/watch?v=0TH5SLghYPY>

PSK 5702. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Mittauspisteen valinta ja tunnistaminen. 2007. 3. p. PSK Standardisointiyhdistys ry. Helsinki: PSK. Viitattu 24.2.2021. <https://psk-standardisointi-fi.lillukka.samk.fi/Standard/Ryhma57/PSK5702-3.p.pdf>

PSK 5703. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Anturin, liittimen ja kaapelin valinta, sekä asennus. 2018. 5.p. PSK Standardisointiyhdistys ry. Helsinki: PSK. Viitattu 12.3.2021. [https://psk-standardisointi-fi.lillukka.samk.fi/Standard/Ryhma57/PSK5703\\_5p.pdf](https://psk-standardisointi-fi.lillukka.samk.fi/Standard/Ryhma57/PSK5703_5p.pdf)

PSK 5705. Kunnonvalvonta. Värähtelymittaus. Mittaustoiminnan suunnittelu. 2006. 5. p. Helsinki: PSK. Viitattu 5.3.2021. [https://psk-standardisointi-fi.lillukka.samk.fi/Standard/Ryhma57/PSK5705\\_5p.pdf](https://psk-standardisointi-fi.lillukka.samk.fi/Standard/Ryhma57/PSK5705_5p.pdf)

PSK 5706. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Valvontamenetelmät. 2015. 4.p. PSK Standardisointiyhdistys ry. Helsinki: PSK. Viitattu 12.5.2021. <https://psk-standardisointi-fi.lillukka.samk.fi/Standard/Ryhma57/PSK5706-4p.pdf>

Valmetin www-sivut. Viitattu 1.6.2021. <https://www.valmet.com/fi/>

Valokuvat matkustaja-autolautalta omasta kuva-albumista (2021).

Wikipedia www-sivut. Viitattu 23.7.2021 <https://fi.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Etusivu>