

Taneli Koukonen

AUTONOMIAN VAIKUTUS VENEIDEN KUNNONVALVONTAAN

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Huhtikuu 2022

TIIVISTELMÄ

Taneli Koukonen: Autonomian vaikutus veneiden kunnonvalvontaan
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Konetekniikka
Tarkastaja: Jussi Aaltonen
Ohjaaja: Kalle Hakonen
Huhtikuu 2022

Tässä kandidaatin työssä tutkittiin autonomian vaikutusta veneiden kunnonvalvontaan sekä sen vaikutusta luotettavuuteen. Työn tutkimusmenetelmänä käytettiin kirjallisuuskatsausta. Työn tarkoituksena oli kerätä yhteen aiheeseen liittyvää aineistoa ja tutkimuskirjallisuutta. Lähteiden ja tutkimusten luotettavuutta tulkittiin viittausten lukumäärän ja kirjottajien muiden kirjoitusten perusteella.

Työn alussa perehdyttiin kunnonvalvonnan merkitykseen ja sen kehitykseen, jotta lukija saisi käsityksen kunnonvalvonnan tämän hetkisestä tilasta ja sen kehityksen suunnasta. Sekä sitä minkälainen merkitys huoltojen suunnittelun kehityksellä on kunnonvalvontaan.

Työn toisessa osiossa perehdyttiin erilaisiin veneessä oleviin valvottaviin kohteisiin sekä näiden kohteiden valvontamenetelmiin. Osiossa selvitettiin rungonvalvonnan merkitystä ja miten tämä toteutetaan. Veneessä käytettävien nesteiden valvomista tarkasteltiin muun muassa ympäristön näkökulmasta. Propulsiojärjestelmän valvonnan merkitystä tarkasteltiin, sekä mitä erilaisia järjestelmiä veneissä käytetään. Työn toisen osion lopussa tarkasteltiin veneen sähköjärjestelmää sekä hätätilanteita.

Työn kolmannessa osiossa tarkasteltiin autonomian eri tasoja ja niiden vaikutusta luotettavuuteen. Autonomian tasot jaettiin neljään osaan ja tasojen ominaisuuksia tarkasteltiin erikseen. Luotettavuudesta tarkasteltiin yksittäisten komponenttien vaikutusta koko veneen luotettavuuteen sekä millainen vaikutus luotettavuudella on kustannuksiin.

Viimeisessä osiossa tarkasteltiin jo käytössä olevia järjestelmiä sekä niiden hyödynnettävyyttä veneessä. Lisäksi tarkasteltiin kunnonvalvonnan järjestelmien hyödynnettävyyttä erilaisissa aluksissa sekä miten järjestelmää hyödynnetään muissa kohteissa kuin merialuksissa.

Avainsanat: Autonomia, kunnonvalvonta, huolto, luotettavuus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. KUNNONVALVONTA	3
2.1 Kunnonvalvonnan kehitys	3
2.2 Valvonnan merkitys.....	4
3. VALVOTTAVAT KOHTEET	5
3.1 Rungonvalvonta	5
3.1.1 Vuodot	6
3.1.2 Runkoon kohdistuvat osumat	6
3.2 Nesteet	7
3.3 Propulsio	8
3.3.1 Moottori.....	9
3.3.2 Laakerointi	9
3.3.3 Potkuri	10
3.4 Sähköjärjestelmä	11
3.5 Häätätilanteet.....	11
4. AUTONOMIAN ASTE JA LUOTETTAVUUS	13
4.1 Päätöksentekoa tukeva autonomia	13
4.2 Etäohjattava miehistöllä	14
4.3 Etäohjattava ilman miehistöä	14
4.4 Täysin automatisoitu	15
4.5 Luotettavuus	15
5. VALMIIT RATKAISUT JA SOVELLETTAVUUS	17
5.1 Käytössä olevat järjestelmät.....	17
5.2 Erilaiset vesialukset.....	18
5.3 Muut kuin vesialukset.....	19
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	20
7. YHTEENVETO.....	21
LÄHTEET	23

LYHENTEET

COLREGs	Collision regulations eli törmäyssäännöstö
Radar	Radio detection and ranging, tutka
Lidar	Light detection and ranging, valotutka
HMI	Human-in-the-loop

1. JOHDANTO

Autonomia kulkuvälineissä on kehittynyt nopeaa vauhtia. Markkinoilta löytyy autoja, joissa kuljettajan ei tarvitse itse ajaa autoa kaikissa tilanteissa. Lentokoneista löytyy autopilottiominaisuus, jonka ollessa kytkettynä päälle ei ihmisen tarvitse kuin tarkkailla tilannetta. Veneistä lähtökohtaisesti löytyy autopilotti, joka mahdollistaa reitillä pysymisen, ja kehittyneemmissä versioissa alus väistää toista alusta itsenäisesti. Ihmisen rooli kulkuvälineissä on kasvavassa määrin vain tarkkailla toimintaa.

Veneissä autonomiatasoja on neljä kappaletta, joissa jokaisessa kunnonvalvonta on osana automaatiota. Ensimmäisillä tasoilla järjestelmä avustaa miehistöä ilmoittamalla mahdollisista vioista, jotka voidaan korjata ihmisen toimesta veneellä. Täysin autonominen järjestelmä havainnoi onko ilmennyt vika kriittinen ja vaatiiko se välitöntä korjaamista, jolloin alus pysähtyy vai voidaanko vika korjata myöhemmin satamassa. Ideaali tilanteessa järjestelmä havaitsee vian ennen osan rikkoutumista, näin ollen osa voidaan vaihtaa ennen vioittumista. Haastavan tilanteesta tekee se, että rikkoutuminen on aina täysin satunnaista. (Esa et al. 2019)

Kunnonvalvonnan automatisoinnilla saavutetaan sujuvampi ja luotettavampi liikkuminen, sillä ihmisen ei tarvitse puuttua valvontaan ja näin inhimillisen virheen osuus pienenee. Tällaisilla menetelmillä säästetään rahaa, sillä huoltoja voidaan ennustaa huomattavasti paremmin.

Työssä tutkitaan miten veneiden järjestelmän automatisointi vaikuttaa kunnonvalvontaan. Lisäksi perehdytään siihen mikä vaikutus kunnonvalvonnalla on autonomian asteeseen. Työssä tutkitaan olemassa olevia järjestelmiä ja miten järjestelmiä voitaisiin soveltaa vesikulkuneuvoissa.

Työssä vastataan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Mitä etuja saavutetaan sillä, että ihminen ei tee alustavaa päätöstä osan tai laitteen kunnosta?
- Mitä mahdollisia haittoja autonomia aiheuttaa veneen toiminnalle?
- Lisääkö veneen autonomian aste luotettavuutta?

Työ rajataan käsittelemään veneiden kunnonvalvontaa, siinä ei keskitytä suurempiin laivoihin eikä myöskään hyvin pieniin veneisiin. Työssä käsitellään autonomian vaikutusta kunnonvalvontaan sekä miten se vaikuttaa autonomian asteeseen. Työn tutkimusmenetelmänä käytetään kirjallisuuskatsausta.

2. KUNNONVALVONTA

Kunnonvalvonta on jatkuvaa toimintaa, jossa osan tai laitteen tilaa seurataan erilaisien mittalaitteiden avulla. Mittalaitteilla tehtävät mittaukset ovat joko jatkuvia tai määräaikaisia. Toimenpiteet ovat käyttöseurantaa laajempia. Käyttöseuranta on koneiden jatkuvaa tarkkailua käyttäjän toimesta. Käyttöseuranta on kunnonvalvonnan osa-alue, joka perustuu laitteiston kunnon tunnistamiseen ja tilaa osoittaviin tunnussuureisiin sekä määrittelemällä niille tarkistusmenetelmät, mittauslaitteet ja -tavat, tulkintajärjestelmät sekä hälytysrajat. Mittaustulokset ja hälytykset vaativat myös järjestelmän, jonka avulla näihin reagoidaan. (Ansaharju 2009, s. 301)

Valvottavan kohteen mittaukset voidaan luokitella kuuteen kategoriaan. Aistinvarainen tarkistus tapahtuu ihmisen toimesta hyödyntäen ihmisen aisteja. Havainnot antavat kuitenkin vain yleiskuvan veneen tilasta. Fysikaalisista perussuureista mitattavissa ovat esimerkiksi paine, lämpötila ja dimensio, joista mitataan suureiden muutosta. Sähköisten perussuureiden, joita ovat jännite, virta, teho ja resistanssi todennetaan elektronistenlaitteiden kunto. Ainetta rikkomattomilla mittauksilla nähdään esimerkiksi halkeamat, väsymismurtumat ja vuodot jo ennen syntyneitä vaurioita. Värähtely- ja äänimittauksella valvotaan laakereiden ja muiden pyörivien osien kuntoa. Öljyanalyyseilla selvitetään, onko öljyn sekaan joutunut metallia koneesta, vettä jäädytyksestä tai koneen ulkopuolelta. Lisäksi tarkastellaan muita epäpuhtauksia ja onko öljyn viskositeetti muuttunut. (Ansaharju 2009, s. 303)

2.1 Kunnonvalvonnan kehitys

Huoltoa vaativia laitteistoja on valvottava erilaisilla sensoreilla ja mittalaitteilla, jotta laitteen kunto saadaan selville. Kunnonvalvonta onkin kuntoperusteisen huollon tärkeä työkalu. Numeerisesti tai graafisesti seuraamalla mitattujen parametrien kehitystä voidaan kuntoa tarkastella millä ajanhetkellä tahansa. Kuntoa valvotaan myös perustuen ennakoitavaan kunnonvalvontaan, jolloin ennustetaan dataan perustuen laitteen rikkoutuminen. Ennakoivassa kunnonvalvonnassa ei siis tarkastella laitteen sen hetkistä kuntoa. (Galar Pascual 2015, s. 63)

Huoltotoimet ovat kokeneet suurta kehitystä samalla kun teknologia on kehittynyt. Huoltotoimien neljännen sukupolven kehityksen katsotaan alkaneen 2000-luvun alussa. Neljäs sukupolvi on viimeisin sukupolvi, joka keskittyy kunnonvalvontaan pe-

rustuvaan huoltoon. Hyödyntämällä kunnonvalvontaa huoltojen toteutuksessa vähennetään vioittumista laitteistossa käyttämällä ehkäisevää ja ennustettavuus lähestymistapaa. (Zaman et al. 2021)

Tekoälyllä on tulevaisuudessa osansa kunnonvalvonnan apuvälineenä, tekoälyn avulla voidaan havaita poikkeamat valvottavasta kohteesta. Nämä poikkeamat eroavat normaalista datavirrasta ja näitä analysoimalla sekä perustuen historiadatasta opittuun tietoon, tekoäly tekee johtopäätökset vioittuneesta osasta tai laitteista. Tämän saamiseksi laajempaan käyttöön on vielä haasteita kuten yhteensopivuus olemassa olevien järjestelmien kanssa. (Galar Pascual 2015, s. 63)

2.2 Valvonnan merkitys

Kasvava tarve kustannustehokkaille huolto- ja valvontamenetelmille lisää kunnonvalvonnan tarvetta veneillä. Sillä valvomalla veneitä on huollot ennakoitavissa paremmin. Yhdessä veneen elinkaaren aikana synnyttämien päästöjen hillitsemisellä säästetään ympäristöä vähemmän kuormittavaa liikkumista vesillä. (Anastasopoulos et al. 2009)

Valvomalla jatkuvasti veneen kuntoa sekä yksittäisiä komponentteja voidaan huollot suunnitella kustannustehokkaasti. Lisäksi esiintyviin vikoihin voidaan puuttua ajoissa, ennen kuin vioista muodostuu vakavampia. Kerätty data kertoo merkittävää tietoa laitteen tilasta reaaliajassa, kuin myös menneisyydestä. Näillä tiedoilla pystytään mallintamaan, miten laite toimii yleisesti. Yleisen toiminnan pohjalta voidaan laskennallisesti ennustaa tulevia huoltoja hyödyntäen todennäköisyyslaskentaa. (Nithin et al. 2021)

3. VALVOTTAVAT KOHTEET

Veneissä valvottavia kohteita on useita ja näiden laitteiden sekä yksittäisten komponenttien vikojen tunnistus on tärkeää sujuvan liikkumisen mahdollistamiseksi. Kohteiden määrää lisäämällä operaattori ei käytä aikaa ylimääräiseen kohteiden tarkkailuun, sillä hän voi luottaa laitteistoon, joka hoitaa valvonnan hänen puolestaan. Lisäämällä valvottavien kohteiden määrää voidaan myös lisätä autonomian tasoa, mikä puolestaan vähentää ihmisten tarvetta veneellä. Ihmisten tarpeellisuuden vähentäminen veneen valvonnassa keskittää resursseja muuhun toimintaan. (Gu et al. 2021)

3.1 Rungonvalvonta

Rungon kunnonvalvonnan ja luotettavuusanalyysien avulla voidaan varmistaa veneen turvallinen kyky liikkua vesillä. Rungon kunnon arvioinnilla on merkittävä rooli koko veneen huollossa sekä valvonnassa. Tarkasti toteutetun veneen rungonvalvonta mahdollistaa suunnittelun huolloille sekä pienentää mahdollisten vaurioiden aiheuttamaa riskiä. Runkoa valvotaan mittaamalla siitä erilaisia parametrejä, jotka tallennetaan tietokantaan. Tulevaisuudessa tehtäviä mittauksia verrataan tähän tietokantaan ja tästä voidaan huomata poikkeavuudet rungon kunnossa. (Lazakis et al. 2016)

Aluksen runkoon muodostuu ajan kuluessa pieniä halkeamia, jotka laajenevat ajan kuluessa näiden jäädessä huomaamatta. Merivedessä seilaava vene on kosketuksissa suolapitoisen veden kanssa, mikä nopeuttaa ruostumista. Pieniä halkeamia sekä ruostumista on lähes mahdoton havaita ihmissilmällä luotettavasti ja turvallisesti. Halkeaman syntyessä runko venyy sekä laajenee. Tätä on kuitenkin erittäin hankala havaita dimensioita mittaamalla. Mahdollinen tapa näiden havaitsemiseen voisi olla kameranäkö. Tällainen järjestelmä yksittäisessä veneessä olisi kuitenkin erittäin kallis, eikä näin ollen kovinkaan järkevä. (Hong et al. 2019)

Kameranäköä hyödyntävää laitetta voitaisiin käyttää satamissa huoltojen yhteydessä. Tällaisella menetelmällä ei yksittäiseen alukseen kohdistuisi suuria kustannuksia. Mahdolliset poikkeamat eivät tulisi esille täysin reaaliajassa, mutta kuitenkin riittävällä nopeudella, jotta näihin ehdittäisiin reagoida. Hong et al. (2019) esittelevät tällaisen veneen pohjaa tarkastelevan robotin. Robottiin kiinnitettyjen kameroiden avulla tämä pystyy havaitsemaan pienimmätkin poikkeamat, skannaamalla aluksen

pohjaa. Robotti tallentaa skannaamansa datan sekä ilmoittaa havaitsemistaan poikkeamista. Datasta luetaan paikka, jossa poikkeama on, minkä jälkeen voidaan suunnitella vaurion korjaus. (Hong et al. 2019)

3.1.1 Vuodot

Aluksen rungossa on huomioitava pienet vuodot sekä muut vettä veneen pohjalle kerryttävät poikkeamat. Pilssipumppu käynnistyy, kun veneen pohjalle on kertynyt vettä ennalta määritellyn rajaan asti. Keskustietokone saa tiedon vesirajan ylittymisestä sekä siitä, että pumppu on käynnistynyt. Jos pumppu ei käynnisty kun vesiraja on ylittynyt aiheuttaa, se vikatilaa, johon automaatio tai operaattori reagoi. Autonomisen järjestelmän on mahdollista ohjata varapumppu käynnistymään. Ihmisooperaattori korjaa vian tai asettaa varapumpun käytettäväksi. Veden kertyminen veneen pohjalle on normaalia, jolloin käyttäjän ei ole välttämätöntä tietää pumpun käynnistymisestä normaalitilanteissa. (Alavani et al. 2010)

Varapumppujen määrää veneessä arvioidaan pumpun luotettavuuden mukaan. Veneessä on varmistuttava, että siellä on toimiva pilssipumppu, jolloin useamman pumpun asentaminen veneeseen lisää todennäköisyyttä, että veneessä on ainakin yksi toimiva pilssipumppu. Lisäksi varapilssipumpuilla saavutetaan suurempi veden pumppaaminen veneestä pois suuremman mutta harvinaisemman vuodon sattuessa. (Elsayed 2012)

Vettä pumpatessa on huomioitava, ettei veden sekaan ole kertynyt epäpuhtauksia veneen konehuoneesta ja muista tiloista. Veden pumppaaminen suoraan mereen aiheuttaa ongelmia mereneliöille ja eläimille rannikolla. Epäpuhtauksien ajautumista mereen ehkäistään pitämällä konehuone puhtaana ja pyritään havaitsemaan öljyvuo-dot moottorista ja muista komponenteista, joissa öljyä käytetään. Pumpun yhteydessä käytetään veden ja öljyn erotinta, jolla varmistetaan, ettei öljyä ajaudu mereen veden mukana. (Alavani et al. 2010)

3.1.2 Runkoon kohdistuvat osumat

Veneen törmäys toiseen alukseen, karikkoon tai muihin kohteisiin on lähes poikkeuksetta vaaratilanne. Tapahtuneita törmäyksiä tutkittaessa on havaittu, että suuri osa aiheutuu inhimillisistä virheistä ja etenkin tilannetietoisuuden puutteesta. Inhimillisen virheen mahdollisuutta pienentääkseen on lisättävä alusta operoivan henkilön tilannetietoisuutta tukemalla hänen mahdollisuuttansa havaita tulevat vaarat ajoissa. Mahdollisten törmäysten estämiseksi on veneen ympäristöä jatkuvasti mitattava eri-

laisilla mittalaitteilla. Ympäristöä havainnoitaessa, mitä aikaisemmin törmäys osataan ennakoida, sitä enemmän alusta operoivalla henkilöllä on mahdollisuuksia estää törmäys. (Huang & Gelder 2020)

Törmäyksen riski on määritelty mahdollisten törmäysten suhteesta törmäyksettömiin tilanteisiin. Mahdollisiin törmäystilanteiden lukumäärään vaikuttaa esimerkiksi aluksen nopeus ja kurssi. Törmäyksen riskiä pyritään pienentämään tekemällä korjausliike aluksen kurssiin. Ihmisen ohjatessa alusta tarvitsee hänellä olla kokemusta riskiarvioinnista sekä vaadittavista korjausliikkeistä, jotta lopputulema olisi vaihtoehtoista mahdollisimman turvallinen. (Huang and Gelder 2020)

Järjestelmässä, jossa ihminen tekee päätökset väistämisestä tai väistämättä jättämisestä heikkoutena on ihmisen tekemät virheet. Törmäyksen havaitsemisjärjestelmään voidaan yhdistää myös väistämismominaisuus, jonka ansiosta operaattori ei tarvitse välttämättä puuttua ollenkaan väistämiseen. Toisaalta tällainen järjestelmä on huomattavasti monimutkaisempi ja vaatii, että toiminta on virheetöntä kaikissa olosuhteissa. (Gu et al. 2021)

Aluksiin suunniteltujen esteiden väistämisteknologioita on useita ja niiden toiminta poikkeaa hieman toisistaan. Kuitenkin toiminta näissä perustuu ympäristön havaitsemiseen ja sen perusteella tehtyihin päätöksiin. Gu et al. (2021) ovat esitelleet esimerkiksi törmäyksen riskin tunnistuksen ja sen pohjalta lasketun väistämisalgoritmin sekä varajärjestelmän, joka huomioi tutkan tai lidarin vioittumisen.

3.2 Nesteet

Veneissä on kyydissä huomattavia määriä vaarallisiksi aineiksi luokiteltavia nesteitä, kuten polttoainetta. Näiden valvominen ei ole pelkästään veneen ja sen miehistön omaksi, vaan myös ympäristön eduksi. Veteen kulkeutuneet vaaralliset aineet aiheuttavat haittaa ekosysteemille, joten on kaikkien edun mukaista valvoa nesteitä veneissä.

Voiteluaineita käytetään pienentämään kitkaa kulutuspinnoilla, jäähdyttämään laitteen osia sekä poistamaan epäpuhtauksia. Voiteluaineita, kuten moottoriöljyä analysoidaan voidaan selvittää moottorissa tapahtunut kuluminen ja sinne kulkeutuneiden epäpuhtauksien määrä. Moottorista irtoaa pieniä metallihiukkasia, joiden määrän perusteella saadaan selville moottorin sen hetkinen kunto. Öljyanalyysin avulla on mahdollista havaita laitteen ennenaikainen rikkoutuminen. Öljyanalyysi voidaan suorittaa kaikille laitteille, joissa öljyä käytetään jäähdyttämään, voitelemaan tai poistamaan epäpuhtauksia. Erilaisten metallien testaamisella saadaan selville melko tarkasti,

mikä komponentti laitteesta on kulunut. Jos moottorin öljyanalyyseissä havaitaan alumiinia voi tämä kertoa esimerkiksi mäntävauriosta. (Galar Pascual 2015, s. 72–76)

Veneissä tehtävän mittausdatan pohjalta voitaisiin rakentaa algoritmi, joka laskee milloin olisi kannattavaa suorittaa erilaisille öljylaaduille analysointi. Laskennassa voitaisiin huomioida laitteen käyttöaika, lämpötilan kohoaminen sekä tärinä. Tällä saavutettaisiin pidempi käyttöikä laitteelle.

Veneessä käytössä olevat nesteet kuten polttoaine, voiteluöljy, jäähdytysneste, hydraulikkaöljy virtaavat putkissa kovassa paineessa. Putken vioittuessa, vuotaa se voimakkaasti paine-eron takia. Putkesta vuotava neste laskee vuotokohdan painetta äkillisesti, joka aiheuttaa alipaineaallon putken molempiin suuntiin. Alipaineaalto voidaan havaita kahden paineanturin avulla, vuodon ollessa näiden välissä. Vuotokohta saadaan laskettua aikaeron avulla kaavastaa

$$X = \frac{1}{2a} [L(a - v) + \Delta t(a^2 - v^2)]. \quad (1)$$

Kaavassa (1) X on vuotokohdan etäisyys anturista, L antureiden välinen etäisyys, a negatiivisen paineaallon etenemisnopeus, v nesteen virtaus nopeus ja aikaero Δt paineaallon saavuttaessa paineanturit. Antureiden havaitsema alipaine voidaan tietokone ohjelmoida laskemaan ja ilmoittamaan vuotokohta välittömästi. Vuotokohdan ollessa selvillä voidaan vika korjata huomattavasti nopeammin. Tämän avulla vuodot voidaan havaita paikoista, joissa putkia ei nähdä. (Peng et al. 2011)

3.3 Propulsio

Propulsiolla tarkoitetaan veneen työntövoiman tuottavaa järjestelmää. Propulsiosta puhuttaessa osassa kirjallisuudesta propulsiolla tarkoitetaan vain potkuria, kun taas toisissa lähteissä propulsiolla tarkoitetaan koko työntövoimaa tuottavaa järjestelmää (Carlton 2007). Propulsiojärjestelmässä esiintyvien vikojen havaitseminen ennen rikkoutumista on veneissä erityisen tärkeää, sillä vikaantuessaan ei vene välttämättä kykene liikkumaan ollenkaan. Voimansiirtojärjestelmään kohdistuu jatkuvasti suuri lämpötila, korkea ilmankosteus, korrosio sekä tärinä. Näillä on negatiivinen vaikutus suorituskykyyn. (Altosole & Martelli 2017)

Voimansiirtojärjestelmän vikaantuessa ei sitä voida kaikissa tilanteissa sammuttaa välittömästi. Kun moottori joudutaan pysäyttämään ei alusta voida ohjata eikä sillä voi jarruttaa, tämä saattaa johtaa huomattavasti vakavimpiin ongelmiin. Esiintyvät viat on jaoteltava vian vakavuuden sekä toimenpiteistä aiheutuvien haittojen mukaan ja tämän pohjalta on tehtävä päätös moottorin sammuttamisesta. (Izadi-Zamanabadi

& Blanke 1999) Päätöksenteossa ei voida jättää huomioimatta vikaa mittaavan mittalaitteen toiminnan varmuutta. Moottorin lämpötilaa mitatessa anturin antaessa ei realistisen tuloksen voidaan anturi todeta lähes varmuudella vialliseksi, eikä tilanteessa tarvitse pysäyttää moottoria. Anturin viallisuuden toteaminen automaattisesti on kuitenkin paikoin hankalaa.

Propulsiojärjestelmässä tapahtuu jatkuvaa säätämistä muun muassa potkurin lapojen kulmassa ja moottorin tehon säädössä. Jotta säädöt olisivat tarkkoja ja paikkaansa pitäviä on niiden kuntoa tarkkailtava ja monitoroitava yhdessä muiden kohteiden kanssa. (Altosole & Martelli 2017)

3.3.1 Moottori

Moottorin huoltoja suoritetaan perustuen mitattuun dataan moottorin ollessa käytössä. NykYTEknologialla voidaan tarkastella moottorin kuntoa sekä tehokkuutta reaaliajassa. Reaaliaikaisella kunnonvalvonnalla saavutetaan taloudellista hyötyä verrattuna suunniteltuihin huoltoihin, joissa moottori tai moottorin osia vaihdettaisiin ennalta määrätyn väliajoin kunnosta riippumatta. Sensoreihin perustuvalla valvonnalla havaitaan epänormaali käytös systeemissä, joka kertoo kulumisesta tai viasta moottorissa. (Kim et al. 2020)

Moottorista mitataan kahdenalaista dataa, jatkuvaa dataa moottorin ollessa käynnissä sekä dataa, josta erotetaan poikkeamat normaalista käytöstä. Poikkeamat moottorin normaalissa käytössä eivät suoranaisesti kerro viasta moottorissa. Mikä tahansa käytös, joka aiheuttaa suuren muutoksen normaalissa datassa havaitaan poikkeamana. Normaalialia dataa voidaan käyttää moottorin yleisen kunnon tutkimiseen sekä käyttää apuna lisäanalyysissä kuten vian rajaamisessa. (Kim et al. 2020)

Datasta poikkeavuuksien tunnistamisessa hyödynnetään ryhmittelyalgoritmia, joka tunnistaa ryhmiteltävän datan, ja vertaa tätä olemassa olevaa ryhmiteltyyn dataan. Ryhmittelyalgoritmin tuloksia ja vikojen todennäköisyysjakauksia yhdistelemällä todellinen vika saadaan selville. Ryhmittelyalgoritmin luotettavuuteen vaikuttaa sille määritettyjen ryhmien määrät, joihin data jaetaan. Ryhmien määrän päättää käyttäjä itse omaan tarkoitukseen parhaiten soveltuvaksi. (Kim et al. 2020)

3.3.2 Laakerointi

Laakerointi on välttämätöntä pyörivissä koneissa ja laitteissa. Yksittäisen laakerin laatu sekä kunto vaikuttaa koko koneen luotettavuuteen. Suurempi luotettavuus koneella riippuu laakerin laadusta ja luotettavuudesta sekä reaaliaikaisesta vianmäärittämisestä. Laakerin vikaantuessa aiheuttaa se riskin suuremmalle vikaantumiselle tai

rikkoutumiselle laitteessa, jossa se on käytössä. Oikeanlaisella kunnonvalvonnalla havaitaan vikaantuva laakeri, mikä vaihdetaan ennen rikkoutumista. (Duan et al. 2018)

Laakerin tärinän mittaaminen on laajasti käytetty menetelmä laakereiden kunnon tarkkailussa. Tärinäanalyysillä kerätään dataa, kuten värähtelytaajuutta. Dataa suodatetaan poistamalla epäolennaiset datapisteet, jolloin vikaa esittävät värähtelytaajuudet tulevat esille. Mittaamalla useampia eri suuruisia värähtelytaajuuden arvoja saavutetaan tehokkaampi ja luotettavampi analysointi. (Duan et al. 2018)

Laakereiden analysoinnissa tärinäanalyysia tehdään jatkuvasti havaitakseen viat ajoissa. Lämpöanalyysillä sekä öljyanalyysillä todennetaan epäily vioittuneesta laakerista irrottamatta laakeria, irrottamatta laakeria suoritetaan vian analysointi kustannustehokkaammin. (Galar Pascual 2015, s. 77)

3.3.3 Potkuri

Veneissä on yleisesti käytössä kahdenlaisia voimansiirtojärjestelmiä vesisuihkupropulsio sekä potkuri. Vesisuihkupropulsion toiminta perustuu propelliin, joka toimii pumpun lailla. Tämä imee vettä veneen pohjasta ja työntää veden paineella veneen perästä muodostaen työntövoiman. Venettä ohjataan kääntämällä vesisuihkun suuntaa. Peruuttaminen tapahtuu kääntämällä vesisuihkun eteen läppä, jolloin työntövoiman suunta vaihtuu. Potkurin toiminta perustuu pumppuun, joka siirtää vettä potkurin puolelta toiselle muodostaen työntövoiman. (Carlton 2007)

Potkurissa esiintyvät toiminnalliset ongelmat jaetaan potkuriin kohdistuviin iskuihin, suorituskyvyn heikentymiseen sekä potkurin eheyteen. Suoraan potkuriin kohdistuvat iskut aiheuttavat potkurin taipumisen, pienten palojen irtoamisen tai koko lavan repeämisen. Useimmiten potkuri voidaan korjata, kun rikkoutuminen on huomattu ajoissa. Suorituskykyyn vaikuttaa teho absorptio, jolloin moottorin saavuttaa vaadittavan tehon liian suurella tai pienellä moottorin kierrosnopeudella. Moottorin kierrosnopeuden liiallinen kasvu pienentää vaadittavaa vääntöä moottorilta. Vika heijastuu myös pakokaasujen kohonneena lämpötilana. Vika havaitaan kalibroidun vääntömitarin avulla. (Carlton 2007)

Potkurin tärinässä on kyse resonanssista tai pakotetusta tärinästä. Resonanssin tapauksessa vika voidaan korjata muuntamalla kappaleen värähtelytaajuus erisuuruiseksi potkurin kanssa. Pakotettu tärinä johtuu usein harmonisesta paineesta potkurin lavoissa. (Carlton 2007) Tärinä voidaan havaita tärinäantureiden avulla (Li et al. 2018).

3.4 Sähköjärjestelmä

Veneen sähköjärjestelmän avulla veneen eri osa-alueet kommunikoivat keskenään. Tarkoituksena on yhdistää veneen keskustietokone antureihin. Dataa tallentuu tietokoneen muistiin, jotta tätä voidaan tarkastella jälkikäteen tietokoneen tai ihmisen toimesta. Luettaessa reaaliaikaista tietoa veneestä, ohjelmoidaan tämä tekemään kalibrointia ja jatkuvamuotoista vikadiagnostiikkaa. Havaitut viat ilmoitetaan veneen operaattorille. (Lazakis et al. 2016)

Veneen datan ohjauksjärjestelmä koostuu keräys- ja jakelujärjestelmästä eri datalähteiden välillä. Keräily ja jakelu mahdollistaa tallennetun datan saatavuuden myöhemässä vaiheessa muille käyttökohteille. Tämän avulla saadaan parempi kuva veneen sen hetkisestä tilasta. Tieto tai data voidaan kerätä erilaisten huoltofunktioiden avulla, minkä parametrejä muokataan tarpeeseen sopiviksi. Tämä tieto siirretään operaattorille, joka tekee mahdollisia muutoksia parantaakseen veneen suorituskykyä. (Lazakis et al. 2016)

Yhteyksiä veneen sisällä sekä ulkopuolella on valvottava, jotta vaaratilanteilta vältyttäisiin. Vaaratilanteet pahentuvat, jos veneessä sattuu vahinko, eikä siitä saada tietoa muille tahoille tai siitä ei pahimmassa tapauksessa olla tietoisia veneen sisällä. Vian havaitseminen laitteistossa, joka aiheuttaisi koneiston sammuttamisen tai vakavan vaaraan ohjelmoidaan ilmoittamaan käyttäjälle viasta. Viasta ilmoitetaan samalla myös huoltoja tekeväälle taholle, jolloin nämä ovat valmiita tekemään korjaustoimenpiteitä tilanteissa, joissa vaaditaan välitöntä korjausta. (Lazakis et al. 2016)

Keskustietokone on sähköjärjestelmän datan tallennuspiste. Tietokoneelle tallennetaan raakadata, alustavasti prosessoitu, prosessoitu sekä ennustettava data. Keskustietokone laskee annetun datan perusteella todennäköisyyksiä erilaisille skenaarioille, jotka aiheuttaisivat toimenpiteitä huolloissa ja niiden valvonnassa. Tämän on myös osattava arvioida datassa esiintyviä virheitä kuten epärealistisia arvoja. (Lazakis et al. 2016)

3.5 Häätätilanteet

Ensimmäinen askel häätätilanteissa on tilanteen tunnistaminen, jotta häätätilanteeseen osataan reagoida oikein. Veneellä oleva operaattori suorittaa riskiarvion tilanteesta ja tekee ilmoituksen häätätilanteesta. Veneen ollessa varustettu automaatiolla, mikä tekee arvion häätätilanteesta ei operaattorin tarvitse kuin kuitata tai vahvistaa tämä. Venettä voidaan myös valvoa maista, jolloin häätätilanne havaitaan maista ja ilmoitus

tehdään maista veneelle tai pelastushenkilökunnalle. (Gu et al. 2021) Veneellä arvioidaan, voidaanko matkaa jatkaa normaalisti määränpäähän hätätilanteesta huolimatta vai onko tehtävä hätäpysäytys. Hätätilanne voi olla niin vakava, että vene on pysäytettävä kokonaan ja evakuoitava, jolloin on tärkeää, että tilanteesta on lähetetty hätäviesti. (Altosole & Martelli 2017)

Tulipalo veneessä on yksi vakavimmista hätätilanteista, joka uhkaa niin ympäristöä kuin veneessä olevia ihmisiä ja tavaroita. Tulipalon syttyessä voidaan se vielä sammuttaa laitteiston ollessa asianmukaisessa kunnossa. Jotta ihminen tai automaattinen sammutusjärjestelmä kykenee aloittamaan sammuttamisen, on tulipalo havaittava ajoissa palohälyttimillä tai lämpöantureilla. Jos tulipalon havaitsemisessa tai sammuttamisessa on puutteita, riskinä on tulipalon riistäytyminen käsistä, jolloin vene on evakuoitava. (Wang et al. 2021)

4. AUTONOMIAN ASTE JA LUOTETTAVUUS

Esa et al. (2019) mukaan autonomian aste on määritelty neljään tasoon ja heidän tutkimuksessaan, näitä tasoja kuvaillaan aluksen ohjattavuuden sekä miehistön roolin mukaan. Tasolla yksi automaatio tukee miehistön päätöksentekoa. Tason kaksi aluksessa on miehistö, mutta tätä kuitenkin ohjataan satamasta etänä ja miehistö ottaa kontrollin tarvittaessa. Aluksella, joka on varustettu tason kolme automaatiolla ei ole miehistöä kydyssä, ohjaus on toteutettu täysin etänä. Täysin automatisoitu alus on neljäs automaation, taso tässä operaattori ei osallistu missään vaiheessa ohjaukseen. (Esa et al. 2019)

Autonomian tasot voidaan jaotella useampaankin osaan lisäämällä uusia määritelmiä tasojen väliin. (Gu et al. 2021) ovat esitelleet Lloyd's Registern kuuden tason sekä Rolls-Roycen kymmenen tason autonomian asteet, näidenkin määritelmät pohjautuvat siihen, miten alusta ohjataan sekä millainen rooli operaattorilla on aluksella tai satamassa. Tässä luvussa tarkastellaan kuitenkin vain neljän tason järjestelmää.

Autonomian astetta kasvattaessa lisääntyy veneessä oleva elektroniikka sekä mahdolliset vikaantuvat kohteet, tämä alentaa lähtökohtaisesti luotettavuutta. Luotettavuutta on kasvatettava autonomian asteen mukaan, tällä varmistetaan esimerkiksi ympäristön jatkuva havaitseminen. (Esa et al. 2019)

4.1 Päätöksentekoa tukeva autonomia

Autonomian tasolla yksi operaattori ohjaa ja kontrolloi veneen toimintoja. Toimintojen ohjaamisessa käytetään apuna ennalta ohjelmoituja funktioita tai voidaan tehdä toimenpiteitä, joita ei ole automatisoitu lainkaan. Järjestelmän vaiheet, ympäristön tila sekä sensoridata esitetään operaattorille HMI:n (human-in-the-loop) kautta. Operaattori tekee päätökset datan perusteella lähtökohtaisesti itse. (Utne et al. 2019)

Vahvuuksiin kunnonvalvontaa tarkasteltaessa lukeutuu miehistön läsnäolo veneessä. Miehistön läsnäololla saavutetaan luovuutta sekä mukautumista vaihtelevissa olosuhteissa. Heikkouksen veneellä aiheuttaa ihmisen vireystilan vaihtelu sekä ammattitaidon puute tai sen vaihtelu miehistön kesken. Lisäksi ihmisen ja koneen välillä työnjako ei ole optimaalista. Vikojen havaitsemien on lisäksi vaikeampaa, jolloin ne havaitaan liian myöhään. (Esa et al. 2019)

4.2 Etäohjattava miehistöllä

Autonomian tasolla kaksi vene tekee suosituksia toimenpiteistä tai toimenpiteitä suhteessa määriteltyihin funktioihin. Systeemi kysyy lupaa operaattorilta tärkeimmistä tiedoista tai päätöksistä. Tällä tasolla systeemiä rajoittaa keskustelun kaistanleveys, kuten aikaviive tai fyysiset ominaisuudet. Systeemi pystyy suorittamaan useita funktioita itsenäisesti tai operaattorin ohjaamana tilanteen sitä vaatiessa. (Utne et al. 2019)

Yhteydet maa-aseman ja veneen välillä edistää tilannetietoisuutta molemmissa pisteissä. Lisäksi uudet teknologiat kuten, Intelligent Awareness- laite lisäävät. Tilannetietoisuuden ansiosta voidaan avustaa venettä hankalissa tilanteissa pitämällä silti kontrolli veneessä. Tilannetietoisuuden jatkuva ylläpitäminen on hankalaa, sillä laitteistossa ilmenee mahdollisia vikoja sekä yhteydet saattavat katkeilla. Järjestelmä muuttuu monimutkaiseksi, sillä sitä kontrolloi miehistö, automaatio sekä etäohjaus. Onkin erityisen tärkeää, että määritellään tarkasti kuka ohjaa venettä ja missä tilanteissa. (Esa et al. 2019)

Yhteyksien lisääntyessä veneen ulkopuolelle ei voida jättää huomioimatta kyberturvallisuutta. Veneen yhteydet on suojattava asianmukaisella tavalla, jotta venettä ei voida kaapata hallintaan ulkopuolisen tahon toimesta. Yhteydet on pidettävä riittävän nopeina, jotta esimerkiksi reaaliaikaisen videon lähettäminen on mahdollista. (Esa et al. 2019)

4.3 Etäohjattava ilman miehistöä

Ilman miehistöä liikkuva vene, jossa on mahdollisuus etäohjattavuuteen suorittaa erilaisia toimintoja automaattisesti tilanteissa, missä ihmisen vasteaika olisi liian suuri. Operaattorilla on kuitenkin mahdollisuus ottaa kontrolli veneestä etäpisteeltä ja ohittaa automaattisesti tehdyt päätökset määritellyn ajan kuluessa tai asettaa kokonaan uusia suoritteita. Operaattori puuttuu vain tiettyihin tilanteisiin kuten tilanteissa, jotka vaativat inhimillistä arviointia. (Utne et al. 2019)

Suurena etuna operaattorin siirtämisellä veneestä satamaan on, että onnettomuustilanteissa ei ole ihmishenkiä vaarassa. Vene tekee juuri niitä toimintoja mitä se on ohjelmoitu tekemään tauotta. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, etteikö veneen automaatio tekisi virheitä. Kehityksen murrosvaiheessa onkin tärkeää, että veneen toimintaa tarkkaillaan, jotta virheet saadaan korjattua päivittämällä automaatiota. (Esa et al. 2019)

Uhat eivät katoa autonomian tasolla kolme vaan esiintyvät edelleen ja on huomioitava toiminnassa. Veneen ollessa miehittämätön se ei voi auttaa samalla tavalla häädässä olevia kuin miehitetty vene. Paikalle voidaan kuitenkin hälyttää apua tai ohjata vene lähelle, jolloin vaarassa olevat ihmiset pääsevät turvallisesti kyytiin. Luotettavuuden merkitys lisääntyy edelleen veneen ollessa miehittämätön. Vakavan vian satuessa sitä ei ole ihminen tutkimassa vaan järjestelmän on kyettävä tekemään se itsenäisesti. (Esa et al. 2019)

4.4 Täysin automatisoitu

Täysin automatisoidulla veneellä ei ole miehistöä vastaamassa päätöksistä, vaan se kulkee täysin itsenäisesti. Tällaisella järjestelmällä on kyky suunnitella ja muuttaa jälkikäteen tehtäväänsä, joka sille on määritetty. Ihmisellä on mahdollisuus kuitenkin valvoa tai vastaanottaa informaatiota tehdyistä muutoksista prosessissa, olla kuitenkin lähtökohtaisesti puuttumatta näihin. (Utne et al. 2019)

Täysin itsenäisesti liikkuvalla veneellä on mahdollista saavuttaa turvallisempi liikkuminen vesillä. Tämä kuitenkin edellyttää sitä, että merkittävä osa veneistä ja muista aluksista olisi automatisoituja ja keskustelisivat keskenään. Uhkana tälle tasolle pyrittäessä on, että taso pyritään saavuttamaan liian aikaisin ilman että ollaan, kuitenkaan valmistauduttu tähän kunnolla. (Esa et al. 2019)

4.5 Luotettavuus

Veneessä ei ole komponenttia, joka kestäisi rikkoutumatta täysin varmasti. Komponenteille voidaan laskea luotettavuus, jolla se toimii veneessä. Luotettavuudella tarkoitetaan siis todennäköisyyttä, jolla kyseinen laite, osa tai komponentti toimii halutulla tavalla määritellyn ajanjakson aikana. (Elsayed 2012)

Ennustettaessa käytettävyyttä on tärkeää, että osan toimivuus tai toimimattomuus pystytään tunnistamaan. Tunnistaminen toteutetaan kyseiselle osalle sopivimmalla tavalla, kuten värinäanturilla, jota hyödynnetään laakereiden tarkastelussa (Li et al. 2018).

Yksittäisen komponentin toimivuutta tarkastellaan luotettavuuspuun avulla. Ensimmäisenä tutkitaan komponentin toimintaa, tämän toimiessa normaalisti jatketaan käyttöä. Komponentissa havaittaessa normaalista poikkeavaa toimintaa on tarkasteltava tarkemmin, onko vika kriittinen ja vaatiiko se välitöntä korjaamista. Kun vika

ei ole kriittinen, huolletaan tämä suunnitellun mukaisessa huollossa. Luotettavuuspuuhun lisäämällä toimivuuden, huoltojen sekä korjausten todennäköisyydet saadaan komponentin toimivuuden todennäköisyys. (Abaei et al. 2021)

Korkeimmilla autonomian tasoilla korkean käytettävyyden tavoittelu voi muodostua kalliiksi suhteessa käytettävyyden lisäämiseen. Kunnossapitostrategian merkittävimpiä tavoitteita on kustannusten pitäminen alhaalla ja käytettävyyden pitäminen korkealla (Elsayed 2012). Huomioitaessa, että osien rikkoutumisen todennäköisyys kasvaa osan käyttötuntien mukaan. Voidaan joutua tilanteeseen, jossa autonomisten alusten osia joudutaan vaihtamaan, vaikka osalla olisi käyttöikä jäljellä, mutta riski osan rikkoutumiselle on käytön aikana liian suuri.

Osakokonaisuuden luotettavuutta voidaan lisätä asentamalla toinen samankaltainen osa. Tällöin osan rikkoutuminen ei olisi niin vakavaa toisen vastaavanlaisen osan vielä ollessa toiminnassa. Tuplalaakerointi voisi olla tällainen keino, asentamalla potkurin akselin laakerin viereen toinen laakeri. Tällaista toimintatapaa ei kuitenkaan voida toteuttaa kovinkaan monen komponentin kohdalla eikä näin lisäisi koko veneen luotettavuutta merkittävästi.

5. VALMIIT RATKAISUT JA SOVELLETTAVUUS

Kunnonvalvonta järjestelmät ovat laajalti käytössä niin vesiliikenteessä kuin muissakin käyttökohteissa, kuten tehdaskoneiden valvonnassa. Jotta järjestelmillä saavutettaisiin tarvittava hyöty, on ne suunniteltava käyttökohteeseen erikseen kustannustehokkaasti, mutta myös huomioiden pakolliset kriteerit. Autonomisissa veneissä kunnonvalvontajärjestelmältä vaaditaan useiden kohteiden yhtäaikaista valvontaa tehokkaasti ja luotettavasti (Kuwata et al. 2014).

5.1 Käytössä olevat järjestelmät

Kansainvälisen merenkulkujärjestön julkaisema säännös vuonna 1972 pyrkii ehkäisemään törmäykset kahden tai useamman aluksen välillä merellä. Säännöksestä puhutaan nimellä COLREGs, joka tulee englanninkielisistä sanoista collision regulations eli törmäyssäännöt. Säännös määrittelee muun muassa mikä kohtaavista aluksista on vastuussa antamaan tilaa toiselle ja miltä puolelta paikallaan oleva alus väistetään. Lisäksi siitä löytyy säännöt yleisesti ohittamiselle, kohtaamiselle ja kohtisuoraan vastaan tulevalle alukselle. Autonomisten veneiden kohdatessa muuta liikennettä vesillä on sen navigaatio algoritmeihin määritelty COLREGs säännösten pohjalta väistäminen ja muut toiminnot estääkseen törmäyksen. (Kuwata et al. 2014)

Kuwata et al. (2014) ovat tutkineet COLREGs algoritmin toimintaa toisista poikkeavissa skenaarioissa käyttäen kolmea erilaista venettä. Algoritmi suunnittelee jatkuvasti turvallista reittiä veneen lähestyessä kohdetta ja tekee väistöliikkeen tai kurssin muutoksen oikealla hetkellä. Muutoksen jälkeen algoritmi arvioi tilanteen uudelleen ja tekee uusia mahdollisia toimia jatkaakseen turvallista liikkumista. Tällaisen järjestelmän toiminta on tärkeää, jotta vene saavuttaa riittävän turvallisen liikkumisen vesillä. Autonomian tason kasvaessa ei väistämisjärjestelmät ole enää lisänä tuomassa turvallisuutta, vaan ovat välttämättömiä, jottei törmäyksiä tapahtuisi. (Kuwata et al. 2014)

COLREGs algoritmissa havainnointi perustuu sensoreihin kuten tutkaan sekä lidariin. Tutka on mittauslaite, jonka toiminta perustuu radioaaltoihin, joita tutka lähettää ja vastaanottaa. Lidar on valotutka, jonka toiminta perustuu valon heijastumiseen pinnoilta ja tästä laskemalla etäisyyksiin. (Kuwata et al. 2014) Ympäristön havaitsemisen ollessa näiden sensoreiden varassa on otettava huomioon tilanteet, joissa yksi

tai useampi sensori vioittuu. Gu et al. (2021) esittävät että tutkan tai lidarin rikkoutuksessa voitaisiin väistää vain paikallaan olevia esteitä turvallisesti.

Rolls-Royce on kehittänyt yhteistyössä VTT:n sekä Tampereen yliopiston kanssa maalle pystytettävää etäohjaus pistettä. Tällaisella teknologialla muutamat ihmiset kykenevät tarkkailemaan useita aluksia samanaikaisesti. Rolls-Roycen ohjauskeskus on suunniteltu aluksille, jotka seilaavat merellä autonomisesti ja näiden toimintaan puututaan vain tilanteissa, joissa aluksella ilmenee jokin vika. Vikaa voidaan tutkia kameroiden avulla etäohjauspisteeltä tai lähettää aluksella oleva drone tutki- maan vikaa kuten vioittunutta antennia. Lähtökohtaisesti tällainen järjestelmä on suunniteltu suuremmille rahtialuksille, mutta järjestelmää voitaisiin hyödyntää myös pienempien veneiden valvonnassa. (Rolls-Royce 2016)

5.2 Erilaiset vesialukset

Kunnonvalvontajärjestelmän laajuutta veneissä on tarkasteltava tapauskohtaisesti, sillä erilaisissa veneissä tarpeet huoltojen ennakoinnille vaihtelevat veneissä. Kunnonvalvontajärjestelmä veneessä lisää kustannuksia asennusvaiheessa, mutta vähentävät mahdollisia kustannuksia huoltojen osalta. Erilaisissa venetyypeissä arvioidaan, halutaanko maksimoida luotettavuus kustannuksista huolimatta vai maksimoida kustannustehokkuus. Esimerkki venetyypistä, jossa luotettavuus nousee tärkeämmäksi kuin kustannukset voisivat olla puolustusvoimien käytössä olevat veneet. Näissä kunnonvalvontajärjestelmän on oltava mahdollisimman luotettava, jotta alukset pysyisivät toiminta kykyisinä haastavissakin tilanteissa. Veneet, joissa kustannustehokkuus nousee tärkeämmäksi tekijäksi, olisi harraste ja vapaa-ajan käytössä olevat veneet, joiden käyttö on satunnaista ja melko vähäistä.

Suurissa laivoissa kunnonvalvontajärjestelmät ovat verrattavissa veneiden järjestelmiin merkittävimpänä erona on valvottavien komponenttien määrä, mikä riippuu laivan koosta (Gu et al. 2021). Suurissa laivoissa valvottavien kohteiden määrän lisääntyessä myös datan määrä lisääntyy. Tämä huomioidaan muun muassa datan jaotelluudessa kategorioihin, jotta tarvittava tieto on löydettävissä vaivattomasti. Täysin autonomisia järjestelmiä kuten GOLREGS algoritmia testataan veneissä, sillä järjestelmän testaaminen suurilla laivoilla, olisi epäkäytännöllistä. Tällaisia järjestelmiä tul- laankin hyödyntämään suurissa rahtilaivoissa kontrollin siirtyessä enenevimmissä määrin täysin autonomiseksi. (Kuwata et al. 2014)

5.3 Muut kuin vesialukset

Kunnonvalvonta on tärkeä osa meriliikenteen autonomisoitumista sillä veneen vioittuessa saattaa se jäädä merelle. Kunnonvalvonta on kuitenkin osa autonomisoitumista myös muissa liikenteen muodoissa kuten lentoliikenteessä, autoissa, rekoissa, sekä työkoneissa. Lentoliikenteessä lentokoneen vioittuminen on erittäin vaarallista ja lentokoneissa onkin tärkeää, että panostetaan luotettavuuteen. Maalla liikkuvilla kulkuvälineillä etuna on, että merkittävänkin vian sattuessa ajoneuvo voidaan ohjata turvallisesti sivuun eikä tästä aiheudu samanlaista vaaraa kuin lento- tai meriliikenteessä.

Kunnonvalvontajärjestelmiä hyödynnetään myös muissa käyttökohteissa kuin liikenteessä tällaisia kohteita ovat suurten tehtaiden koneet. Kunnonvalvonta tällaisissa onkin jo korkeaa esimerkiksi autonomiset huoltojen suunnittelu järjestelmät tai vioittuvien osien automaattinen listaaminen on käytössä suurimmissa tehtaissa. Samanlaista järjestelmää hyödynnetään esimerkiksi suurissa tuulivoimapuistoissa huoltojen suunnittelussa.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Pohdittaessa mitä etuja saavutetaan sillä, että ihminen ei tee alustavaa päätöstä osan tai laitteen kunnosta huomataan, että autonomian lisäämien osan kunnan tarkkailuun lisää nopeutta monissa tilanteissa. Sillä kone pystyy tarkkailemaan useita osia samanaikaisesti ja huomaamaan vioittumisen aikaisemmin. Ihminen ei kykene havaitsemaan vioittunutta osaa välittömästi ja havaittuaan vioittuneen osan kestää sillä jonkin aikaa prosessoida vioittuneen osan vakavuus veneen toimintaan. Vian havaitseminen ja sen perusteella tehtävä päätös osan kunnosta on huomattavasti nopeampaa ja tehokkaampaa monissa tilanteissa. On kuitenkin huomioitava, että aivan kaikkea havainnointia ei voida siirtää ihmiseltä koneelle kustannusten noustessa kohtuuttoman suuriksi varsinkin pienemmissä aluksissa ja veneissä, joissa autonomian taso ei ole kovin korkea.

Pohdittaessa mitä mahdollisia haittoja autonomia aiheuttaa veneen toiminnalle huomataan että, erilaisten komponenttien määrä veneissä lisääntyy, kun veneen autonomia kasvaa. Näiden komponenttien avulla autonomia mahdollistetaan. Nämä yksittäiset komponentit voivat olla kriittisiä veneen koko toiminnan kannalta ja rikkoutuessaan aiheuttaa suuria ongelmia. Nämä kuitenkin huomioidaan luotettavuudessa ja todennäköisyys koko veneen lamaannuttavaan vikaan on pieni.

Veneen ohjauksen ja kaiken muun toiminnan ohjauksen siirtyessä tietokoneen ja netin välityksellä toimivaan ohjaukseen, kasvaa riski veneen etäkaappaukselle. Kyber-turvallisuuteen on siis panostettava, jotta aluksen kaappaaminen ei olisi mahdollista missään tilanteissa.

Lisääkö veneen autonomian aste luotettavuutta? Autonomia lisää luotettavuutta kokonaiskuvassa, kuitenkin riskiä vioittumiselle ei pystytä poistamaan kokonaan. Autonomian avulla voidaan ennakoida huomattavasti paremmin tulevia vikoja tämä jo itsessään lisää luotettavuutta. Vaikka veneen perustoimintojen, kuten moottorin, potkurin sekä tutkien toiminnan luotettavuus saataisiin valvomalla erittäin korkeaksi, laskee kokonaisluotettavuutta laitteisto, jolla valvonta suoritetaan. Näin ollen luotettavuuteen vaikuttavat tekijät muuttuvat, mutta kokonaisuutena luotettavuus kasvaa.

7. YHTEENVETO

Tässä työssä käsiteltiin veneen kunnonvalvonnan autonomiaa ja millainen vaikutus autonomian lisäämisellä on luotettavuuteen. Tekoälyn hyödyntäminen kunnonvalvonnassa lisää tarvetta kasvattaa veneen valvottavia kohteita, sillä tekoälyn on oltava yhteydessä valvottavaan kohteeseen esimerkiksi sensoreiden avulla. Yhtiöiden intresseinä on tehdä kasvavaa tulosta. Tähän ne pyrkivät muun muassa pienentämällä kustannuksia, joita ne pienentävät tehostamalla kunnonvalvontaa, joka vaikuttaa huoltojen kustannuksiin.

Veneessä on useita toisistaan eroavia valvottavia kohteita, tämän johdosta kunnonvalvonnan on oltava monipuolista. Veneen runkoa valvottaessa tulee ottaa huomioon korrosio, pienet halkeamat sekä muunlaiset vuodot. Pohjassa esiintyvä korrosio ja kehittyvät halkeamat ovat hankala havaita veneestä käsin, havainnointi tuleekin toteuttaa tähän tarkoitukseen kehitetyllä robotilla satama-alueilla. Rungonvalvontaan liittyy myös kriittisempien vikojen ehkäiseminen. Tällaisia aiheuttaa törmääminen toiseen alukseen tai osuma paikallaan olevaan kohteeseen. Veneessä käytettävistä nesteistä osa on haitallisia ympäristölle ja näin on tärkeää, että nesteiden pääsy vesistöön estetään valvomalla niin vuotoja, kuin myös pilssipumpun toimintaa. Nesteiden vuotoja putkistoissa valvotaan paineen vaihteluna.

Propulsion valvonnalla on tärkeä merkitys, jotta vesillä liikkuminen on turvallista ja luotettavaa. Tärkeää on myös tunnistaa vikojen vakavuus sillä sammuttamalla moottori ei venettä voi enää ohjata. Häätätilanteissa tärkeää on tunnistaa vakavuus ja ilmoittaa hätätilanteesta, jotta venettä osataan avustaa.

Autonomian tasoilla on suuri merkitys kunnonvalvontaan, sillä autonomian tasoa ei voida kasvattaa kasvattamatta kunnonvalvonnan tasoa. Alhaisilla autonomian tasoilla kunnonvalvonta järjestelmät ovat operaattorin apuna lisäämässä tilannetietoisuutta. Täysin autonomisella veneellä on myös kunnonvalvonta autonomisoitava täysin, sillä veneellä ei välttämättä ole ihmisiä ollenkaan. Autonomian asteen kasvattaminen lisää veneellä olevia komponentteja, jolloin luotettavuus on otettava huomioon. Luotettavuuden lisääminen tarpeeksi korkealle tasolle onkin joissain tilanteissa hankalaa ja kustannuksia lisäävää.

Veneissä ja laivoissa kunnonvalvonta järjestelmiä on jo käytössä laajalti, mutta niiden lisääminen ja kehittäminen on välttämätöntä, jotta autonomia vesiliikenteessä voisi kasvaa täysin autonomiselle tasolle. Kunnonvalvontajärjestelmien kehittäminen ei

ole pelkästään veneliikenteen intressi vaan samankaltaisia järjestelmiä hyödynnetään niin laivoissa kuin autoissa ja lentokoneissa.

LÄHTEET

Abaei, M.M., Hekkenberg, R., BahooToroodi, A., 2021. A multinomial process tree for reliability assessment of machinery in autonomous ships. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 210, 107484. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107484>

Alavani, C., Glowinski, R., Gomez, S., Ivorra, B., Joshi, P., Ramos, A.M., 2010. Modelling and simulation of a polluted water pumping process. *Math. Comput. Model.* 51, 461–472. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2009.11.023>

Altosole, M., Martelli, M., 2017. Propulsion control strategies for ship emergency manoeuvres. *Ocean Eng.* 137, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.03.053>

Anastasopoulos, A., Kourousis, D., Botten, S., Wang, G., 2009. Acoustic emission monitoring for detecting structural defects in vessels and offshore structures. *Ships Offshore Struct.* 4, 363–372. <https://doi.org/10.1080/17445300903133099>

Ansaharju, T., 2009. Koneenasennus ja -kunnossapito.

Carlton, J.S., 2007. *Marine propellers and propulsion*, 2nd ed. ed. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford.

Duan, Z., Wu, T., Guo, S., Shao, T., Malekian, R., Li, Z., 2018. Development and trend of condition monitoring and fault diagnosis of multi-sensors information fusion for rolling bearings: a review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 96, 803–819. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1474-8>

Elsayed, E.A., 2012. *Reliability engineering*, 2nd ed. ed, Wiley series in systems engineering and management. Wiley, Hoboken, N.J.

Esa, P., Valtteri, L., Lappalainen, J., 2019. Meriliikenteen automaation kehitys Merenkulun automaation ja digitalisaation tutkimusohjelma Traficom in julkaisu ja Traficom Publications.

Galar Pascual, D., 2015. *Artificial Intelligence Tools: Decision Support Systems in Condition Monitoring and Diagnosis*. CRC Press, Baton Rouge. <https://doi.org/10.1201/b18384>

Gu, Y., Goetz, J.C., Guajardo, M., Wallace, S.W., 2021. Autonomous vessels: state of the art and potential opportunities in logistics. *Int. Trans. Oper. Res.* 28, 1706–1739. <https://doi.org/10.1111/itor.12785>

Hong, S., Chung, D., Kim, J., Kim, Y., Kim, A., Yoon, H.K., 2019. In-water visual ship hull inspection using a hover-capable underwater vehicle with stereo vision. *J. Field Robot.* 36, 531–546. <https://doi.org/10.1002/rob.21841>

Huang, Y., Gelder, P.H.A.J.M., 2020. Time-Varying Risk Measurement for Ship Collision Prevention. *Risk Anal.* 40, 24–42. <https://doi.org/10.1111/risa.13293>

Izadi-Zamanabadi, R., Blanke, M., 1999. A ship propulsion system as a benchmark for fault-tolerant control. *Control Eng. Pract.* 7, 227–239. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(98\)00149-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(98)00149-X)

Kim, D., Lee, S., Lee, J., 2020. An Ensemble-Based Approach to Anomaly Detection in Marine Engine Sensor Streams for Efficient Condition Monitoring and Analysis. *Sensors* 20. <https://doi.org/10.3390/s20247285>

Kuwata, Y., Wolf, M.T., Zarzhitsky, D., Huntsberger, T.L., 2014. Safe Maritime Autonomous Navigation With COLREGS, Using Velocity Obstacles. *IEEE J. Ocean. Eng.* 39, 110–119. <https://doi.org/10.1109/JOE.2013.2254214>

Lazakis, I., Dikis, K., Michala, A.L., Theotokatos, G., 2016. Advanced Ship Systems Condition Monitoring for Enhanced Inspection, Maintenance and Decision Making in Ship Operations. *Transp. Res. Procedia* 14, 1679–1688. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.133>

Li, Z., Chen, J., Zi, Y., He, S., 2018. A sensor-dependent vibration data driven fault identification method via autonomous variational mode decomposition for transmission system of shipborne antenna. *Sens. Actuators Phys.* 279, 376–389. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.06.042>

Nithin, S.K., Hemanth, K., Shamanth, V., Shrinivas Mahale, R., Sharath, P.C., Patil, A., 2021. Importance of condition monitoring in mechanical domain. *Mater. Today Proc.* <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.299>

Peng, Z., Wang, J., Han, X., 2011. A study of negative pressure wave method based on Haar wavelet transform in ship piping leakage detection system, in: 2011 IEEE 2nd International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering. Presented at the 2011 IEEE 2nd International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering, pp. 111–113. <https://doi.org/10.1109/CCIENG.2011.6008079>

Rolls-Royce is on course towards intelligent, autonomous ships, 2016. . *Prof. Eng.* 29.

Utne, I.B., Schjøberg, I., Roe, E., 2019. High reliability management and control operator risks in autonomous marine systems and operations. *Ocean Eng.* 171, 399–416. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.11.034>

Wang, L., Wang, J., Shi, M., Fu, S., Zhu, M., 2021. Critical risk factors in ship fire accidents. *Marit. Policy Manag.* 48, 895–913. <https://doi.org/10.1080/03088839.2020.1821110>

Zaman, M.B., Siswantoro, N., Priyanta, D., Pitana, T., Prastowo, H., Semin, Busse, W., 2021. The Combination of Reliability and Predictive Tools to Determine Ship Engine Performance based on Condition Monitoring. IOP Publishing, Bristol. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/698/1/012015>