

Niilo Lindström

TUOTANTOJÄRJESTELMIEN KÄYTETTÄVYYDEN PARANTAMINEN

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Jouko Laitinen
Huhtikuu 2024

TIIVISTELMÄ

Niilo Lindström: Tuotantojärjestelmien käytettävyyden parantaminen
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2024

Tuotantojärjestelmien tuottavuuden kannalta käytettävyys on isossa roolissa, koska käytettävyys kertoo todennäköisyyden laitteen toiminnalle satunnaisena hetkenä. Yrityksen johto haluaa saada investoinnistaan mahdollisimman paljon irti, joten investoinnin käyttö ja tukeminen tulee suunnitella hyvin. Tässä työssä tutkitaan tuotantolaitteiden kunnonvalvontaa, kunnonvalvontamenetelmän valintaa ja niiden avulla käytettävyyden parantamista ja huoltokustannusten arviointia simuloinnin avulla.

Työssä selvitetään aluksi kunnonvalvonnan merkitystä yrityksen ja ympäristön näkökulmasta. Havaitaan, että yrityksen intresseissä tulee olla tuotantolaitteiden pitkän käyttöiän tukeminen, mikä tukee myös ympäristöllistä näkökulmaa. Seuraavaksi tarkastellaan kunnonvalvonnan historiaa ja selvitetään keinoja kunnonvalvontamenetelmän valintaan. (engl. Reliability Centered Maintenance, RCM) osoittautuu erinomaiseksi työkaluksi kunnonvalvontamenetelmän valinnalle. Se auttaa löytämään kriittiset laitteet ja näiden komponentit järjestelmässä, joiden kuntoa tulee valvoa.

Seuraavassa osassa perehdytään kunnonvalvontamenetelmiin ja käydään läpi niiden käyttöympäristöä. Kunnonvalvontamenetelmissä tarkastellaan tarkemmin öljyanalyysiä ja värähtelyanalyysiä, koska niiden P-F intervalli eli aika vika havainnosta vikaantumiseen on suurin ja niiden avulla voidaan havaita lähes kaikki vikaantumisen.

Kunnonvalvontamenetelmien jälkeen käydään läpi datan käsittelyä ja simulointia. Simulointi toimii hyvänä lisätyökaluna kriittisyystarkastelussa ja huoltotarpeiden havainnollistamisessa yrityksen johdolle. Simuloinnin jälkeen tarkastellaan teollisuudessa yleisen voimansiirtotavan eli vaihdesähkömoottorin vikaantumista ja sovelletaan aikaisempaa tietoa sen käytettävyyden parantamiseen.

Johtopäätöksinä käytettävyyden parantamiseen selvisi, että laitteen kriittisyyden tarkastelu järjestelmässä on tärkeintä kustannustehokkaassa kunnonvalvonnassa. Kriittisyyden jälkeen selvitetään kriittiset komponentit ja valitaan komponenteille sopivat kunnonvalvontamenetelmät. Huoltokustannusten arviointiin tarvitaan paljon dataa laitteesta ja sen toiminnasta. Simulointi riittävän datamäärän kanssa mahdollistaa huoltokustannusten arvioinnin ja paljastaa järjestelmän todellisen vikasetokyvyn avustuen investointipäätöksissä.

Avainsanat: Käytettävyys, RCM, öljyanalyysi, värähtelyanalyysi, simulointi, P-F intervalli

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. KUNNONVALVONNAN MERKITYS JA KUNNONVALVONTATAVAN VALINTA..	3
2.1 Laitteen elinjaksonhallinta ja käytettävyys tuotannossa	3
2.2 Laitteiston kulumisen rahalliset ja ympäristölliset vaikutukset	5
2.3 Kunnonvalvonnan kehittymisen historiaa.....	5
2.4 Kunnonvalvontamenetelmän valinta laitteelle	7
3. KUNNONVALVONTAMENETELMÄT JA DATAN KERÄYS	9
3.1 Kuntoon perustuva kunnonvalvonta	9
3.2 Värähtelyanalyysi kunnonvalvontamenetelmänä	9
3.3 Öljyanalyysi kunnonvalvontamenetelmänä.....	11
3.4 Muita ainetta rikkomattomia kunnonvalvontamenetelmiä.....	13
3.5 Datan kerääminen ja käsittely	14
4. SIMULOINTI KUNNONVALVONNASSA.....	15
4.1 Simulointi teoriassa	15
4.2 Prosessidata ja tilastollinen data simuloinnissa	16
5. SÄHKÖMOOTTORIT JA VAIHDEMOOTTORIT	19
5.1 RCM:n seitsemän kysymystä	19
5.2 Vaihdemoottorien vikaantumisen tarkastelu	20
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	22
LÄHTEET	23

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CBM	engl. Condition based maintenance, kuntoon perustuva kunnonvalvonta
FMECA	engl. Failure modes effects criticality analysis, vikatilojen vaikutusten ja kriittisyyden analysointi
LCC	engl. Life cycle cost, elinjakso kustannukset
NDT	engl. Non-destructive testing, ainetta rikkomaton testaus
OEE	engl. Overall equipment efficiency, laitteiston kokonaistehokkuus
RCM	engl. Reliability centered maintenance, luotettavuuskeskeinen huolto
TBM	engl. Time based maintenance, aikaan perustuva kunnonvalvonta

1. JOHDANTO

Tuotantojärjestelmien kunnonvalvonta on lisääntynyt vuosien saatossa. Tuotantolaitteiden elinikää pyritään parantamaan ja uusiokäyttöä lisäämään. Tuotannon johdon näkökulmasta huolto on yksi tuotannon merkittävimmistä, ellei merkittävin vaikutettavissa oleva kustannuserä. Laitteiston yllättävästä vikaantumisesta voi koitua todella merkittäviä tuotannon menetyksiä ja turvallisuusriskejä. Laitteiston tehokas toiminta on elintärkeää yrityksen kannattavalle toiminnalle.

Tämän tutkielman tavoitteena on löytää keinoja tuotantojärjestelmien käytettävyyden parantamiselle kustannustehokkaasti. Käytettävyys kiinnostaa yrityksiä, koska se kertoo kuinka paljon, laite on toiminnassa sen käyttöajasta. Suurempi käytettävyys mahdollistaa suuremman tuotannon ja suuremman rahavirran yrityksen kassaan.

Käytettävyyden parantaminen vaatii laitteiden kunnossapitoa. Kustannustehokkaan kunnonvalvonnan löytämiseksi muodostui kaksi tutkimuskysymystä:

1. Miten valitaan kunnossapitomenetelmä?
2. Miten arvioidaan huollon kustannuksia?

Kysymyksiin vastattiin kirjallisuuskatsauksella. Kunnonvalvonnan merkitys näkyi laajalla määrällä laadukkaita tutkimuksia ja kirjoja. Saatavilla oli myös tietoja eri alojen huoltokustannuksista ja päästöistä. Kirjallisuuskatsauksessa perehdyttiin kirjojen avulla elinjaksion hallintaan ja kunnonvalvontamenetelmiin ja niiden valintaan, sekä huoltokustannusten arviointiin simuloinnin avulla. Kirjojen tueksi käytettiin artikkeleiden tutkimusten dataa. Lopuksi tarkasteltiin case esimerkillä tapoja vaihdemoottorien käytettävyyden parantamiseen.

Tutkielma lähtee liikkeelle selvittämällä, miksi kunnonvalvontaa tarvitaan elinjaksokustannusten ja tuotantolaitteiston kokonaistehokkuuden avulla, sekä selvittää sen rahallista merkitystä. Tämän jälkeen käydään läpi kunnonvalvonnan historiaa ja selvitetään, miten kunnossapitomenetelmä valitaan. Kolmannessa luvussa käydään läpi kunnonvalvontamenetelmiä ja tarkastellaan tarkemmin öljy- ja värähtelyanalyysiä. Neljännessä luvussa käydään läpi simuloinnin hyödyntämistä kunnonvalvonnassa. Viidennessä luvussa tarkastellaan teollisuudessa yleisesti käytössä olevan vaihdemoottorin mahdollisia vikatiljoja ja käytettävyyden parantamista aiemman

tutkimuksen perusteella. Lopussa on johtopäätökset tuotantolaitteiston käytettävyyden parantamisesta.

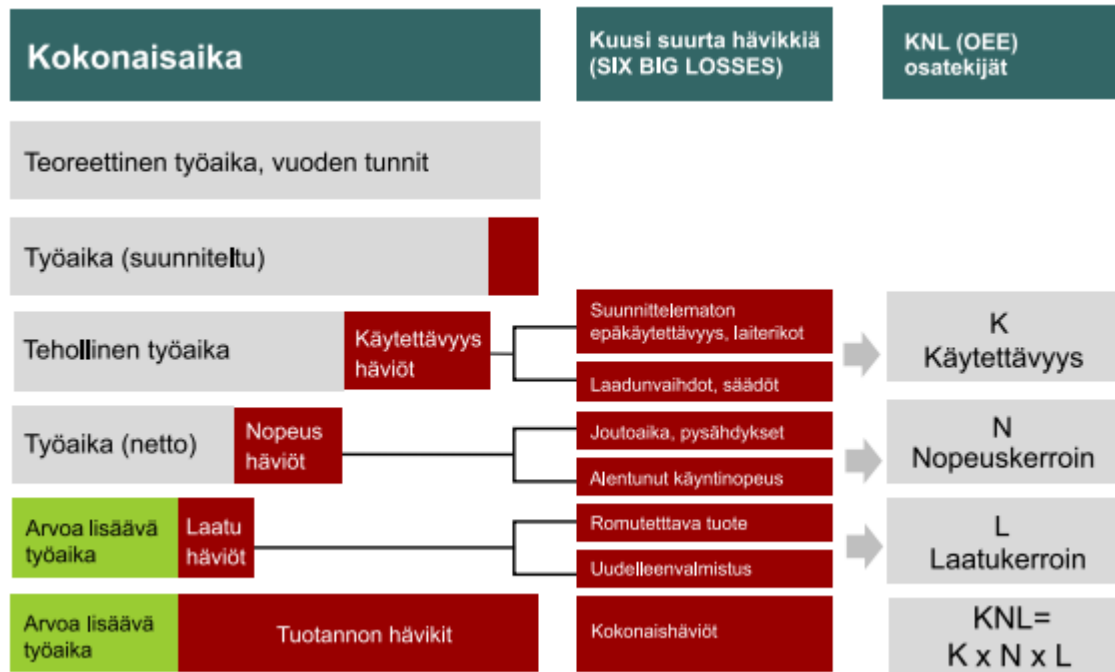
2. KUNNONVALVONNAN MERKITYS JA KUNNONVALVONTATAVAN VALINTA

Tässä kappaleessa käsitellään tuotantomaisuuden hallintaa laitteen tekniseltä ja taloudelliselta puolelta. Selvitetään miksi laitteen elinjaksoa tulisi pidentää ja käytettävyyttä parantaa. Tarkastellaan laitteiden kulumisesta aiheutuvia päästöjä ja kustannuksia sekä kunnonvalvontamenetelmien kehitystä historiasta nykyhetkeen. Lopulta käydään läpi kunnonvalvontamenetelmän valintaa RCM:n eli luotettavuuskeskeisen huollon avulla.

2.1 Laitteen elinjaksonhallinta ja käytettävyys tuotannossa

Tuotantojärjestelmät ja -laitteet ovat merkittävä investointi yritykselle ja ne ovat kriittinen osa yrityksen tuotantoa. Ne sitovat merkittävästi yrityksen varoja ja ovat usein korvaamattomia sen toiminnalle. Yrityksen intresseissä on laitteiden käyttöiän pidentäminen ja toiminnan varmentaminen.

Tuotantolaitteiston tuottoja voidaan laskea kapasiteetin ja kustannusten mukaan, joiden avulla saadaan laskettua laitteiston tuotto esimerkiksi vuodessa huomioiden resurssikustannukset. Tämä ei kuitenkaan ole koko totuus. (Kortelainen *et al.* 2021 s.41–42) Tuotantolaitteiston kokonaistehokkuuden (OEE) avulla päästään lähemmäs todellisuutta. OEE muodostuu kertomalla käytettävyys, nopeus ja laatu yhteen. Nopeuteen vaikuttaa kaikki turha joutoaika esimerkiksi työvaihdot ja pysähdykset, laatuun vialliset tuotteet ja käytettävyyteen laiterikot. OEE lukuun vaikuttavia tekijöitä nähdään kuvasta 1.



Kuva 1 Tuotantolaitteiston kokonaistehokkuus (Kortelainen et al. 2021 s.42)

Laiterikkoja ehkäistään huollolla ja laitteen kehityksellä. Yrityksen johdon näkökulmasta todella tärkeänä asiana pidetään laitteen käytettävyyttä. (Kortelainen et al. 2021 s.20) Käytettävyys kuvaa todennäköisyyttä, jolla tuotantolaitte on kunnossa satunnaisena hetkenä. Suurempi käytettävyys lisää toimintavarmuutta ja tuotantoaikaa.

Elinjaksonhallinta (LCM) tarkastelee tuotantolaitetta sen suunnittelusta aina myyntiin tai kierrätykseen asti teknologisesta näkökulmasta. Käyttöikään vaikuttaa vahvasti laitteelle tehdyt toimet kussakin elinjakson vaiheessa. Esimerkiksi elinjakso voisi koostua suunnittelu- ja asennusvaiheesta, käytöstä ja sen tukemisesta, laitteen kehittämisestä ja lopulta kierrättämisestä tai myymisestä (Kortelainen et al. 2021 s.22).

Elinikää voidaan pidentää käyttämällä elinjaksonhallintaa uudelle tai käytössä olevalle investoinnille. Huomioidaan laitteen käyttö suunnittelussa, panostetaan koulutukseen koneen operaattoreille ja pyritään kehittämään sen toimintaa. Koneen käyttäjät tulee kouluttaa kunnolla, jotta ehkäistään itse aiheutetut viat koneen väärinkäytöllä ja ylikuormituksella.

Elinjaksokustannukset (LCC) vastaavasti tarkastelee elinjaksoa kustannusten näkökulmasta. LCC ottaa huomioon elinjakson vaiheiden aiheuttamat kustannukset kokonaisuutena uusien ja nykyisten investointien kohdalla. LCC pyrkii minimoimaan elinjakson kustannukset (Kortelainen et al. 2021 s.22).

Tuotteen tekniseen elinkaareen kuuluu siis tekninen puoli elinjaksonhallinnan myötä ja taloudellinen puoli elinjaksokustannusten myötä. Nämä pitäisi pystyä tasapainottamaan niin, että laitteen kehitykseen ja tukemiseen käytettäisiin riittävä määrä resursseja. Resurssien ylikäyttö laitteen huoltoon ja kehittämiseen menee hukkaan, mutta liian pieni määrä riskeeraa laitteen kunnon ja koko tuotannon.

2.2 Laitteiston kulumisen rahalliset ja ympäristölliset vaikutukset

Mekaanisten laitteiden käyttö kuluttaa niiden osia. Laitteen kokema kuormitus ja ympäristöolosuhteet vaikuttavat merkittävästi kulumiseen. Toimintaa pitäisi pystyä kehittämään parempien komponenttien ja kunnonvalvonnan osalta. Esimerkiksi kaivosteollisuudessa kuormitus laitteistolle on suurta ja ympäristö haasteellinen komponenttien puhtauden osalta.

Kaivosteollisuudessa kitkan ja kulumisen vaikutukset ovat merkittävät maailmanlaajuisesti. Kaivosteollisuus vastasi 6,2 % koko maailman energiankulutuksesta, josta jopa 40 % hukattiin kitkan takia. Rahalliset menetykset kitkan, varaosien, huollon ja menetetyt tuotannon vuoksi oli arvioilta 210,000 miljoonaa euroa vuosittain. Vastaavasti uutta teknologiaa hyödyntämällä voitaisiin 10 vuoden aikaikkunalla pienentää menetyksiä 15 %:lla ja 20 vuoden aikaikkunalla jopa 30 %:lla (Kenneth Holmberg *et al.* 2017 s.1).

Käytettävyyden parantaminen vaatii toiminnan kehittämistä. Kunnonvalvonnalla löydetään kriittiset laitteet ja komponentit, joiden toimintaa tulee kehittää. Tuotannossa kuormitus ja ympäristöolosuhteet on yleensä laitteelle otollisemmat kuin kaivosteollisuudessa.

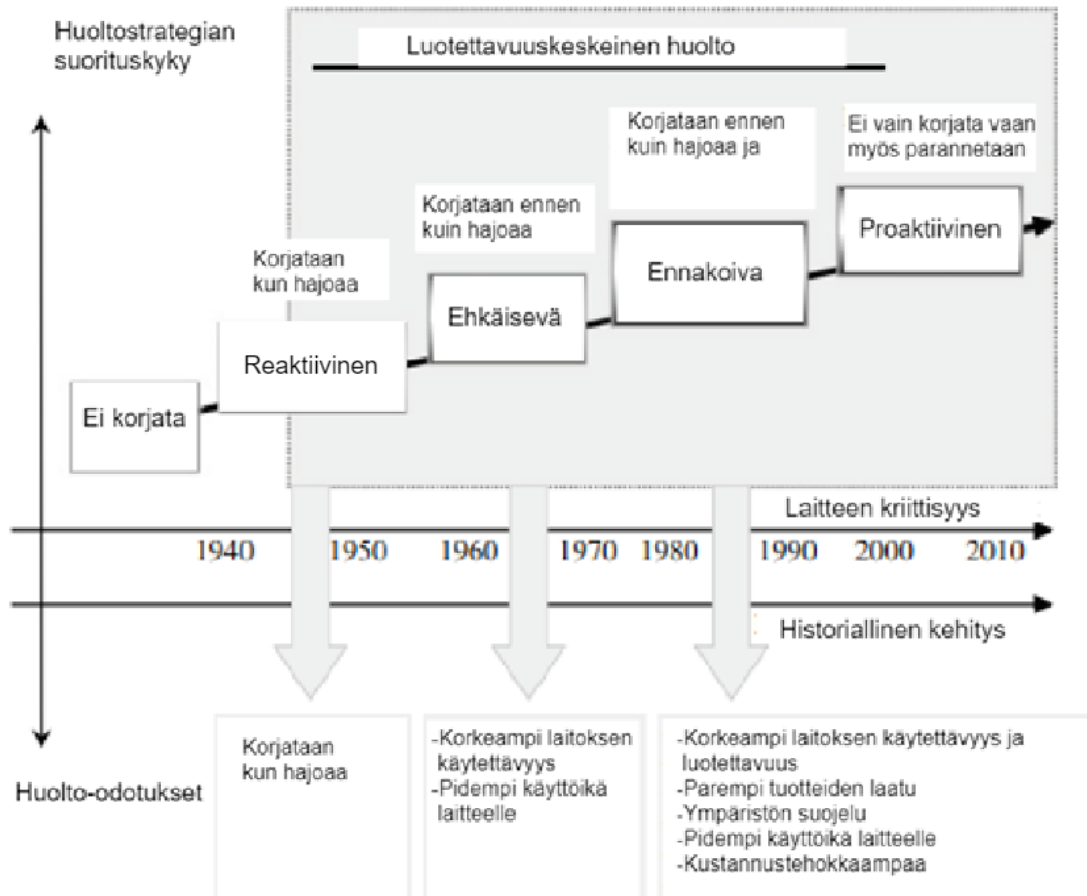
Vuonna 2016 tuotannon yritykset käyttivät keskimäärin 5 % liikevaihdostaan huoltoon. Suomessa teollisen huollon arvo oli 4,1 miljardia euroa ja huoltoon ja varaosiin keskittyvien TOP-500 yritysten 12,3 miljardia euroa (Kortelainen *et al.* 2021 s.15).

Huoltoon menevien resurssien määrä on ollut merkittävä ja tulee todennäköisesti kasvamaan entisestään. Maapallolla on rajallinen määrä resursseja ja uusien resurssien louhinta ja jalostus kuluttaa maapalloa. Laitteiden elinikää pyritään siis jatkuvasti pidentämään ja kehittämään ja resursseja uusiokäyttämään.

2.3 Kunnonvalvonnan kehittymisen historiaa

Historian saatossa tehtaiden kunnonvalvontasuunnitelmat ovat muuttuneet laitteen vaihtamisesta sen jatkuvaan kehittämiseen. Laitteiden kuntoa ei haluta enää arvailla,

vaan sitä pyritään monitoroimaan ja ennustamaan. Pelkkä laitteen kunnon tarkastelu ja ennakointi ei riitä, vaan sitä halutaan jatkuvasti kehittää. Kuvasta 2 näkyy kunnonvalvonnan kehitys vuosikymmenittäin (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 s.12–13).



Kuva 2. Kunnonvalvonnan historiaa muokattu kohteesta (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 s. 12)

Ennen varsinaisia huoltosuunnitelmia laitteiden annettiin hajota, jonka jälkeen ne vaihdettiin. Tällaisia laitteita on edelleen suuri osa kuluttajatuotteista, jotka eivät sovi tarkastelukohteeseen. Reaktiivisessa huollossa laitteen kuntoa ei valvota, vaan laite korjataan vikaantuessaan. Tuotanto keskeytyy molemmissa tapauksissa ennalta arvaamattomana ajankohtana pysäyttäen tuotannon.

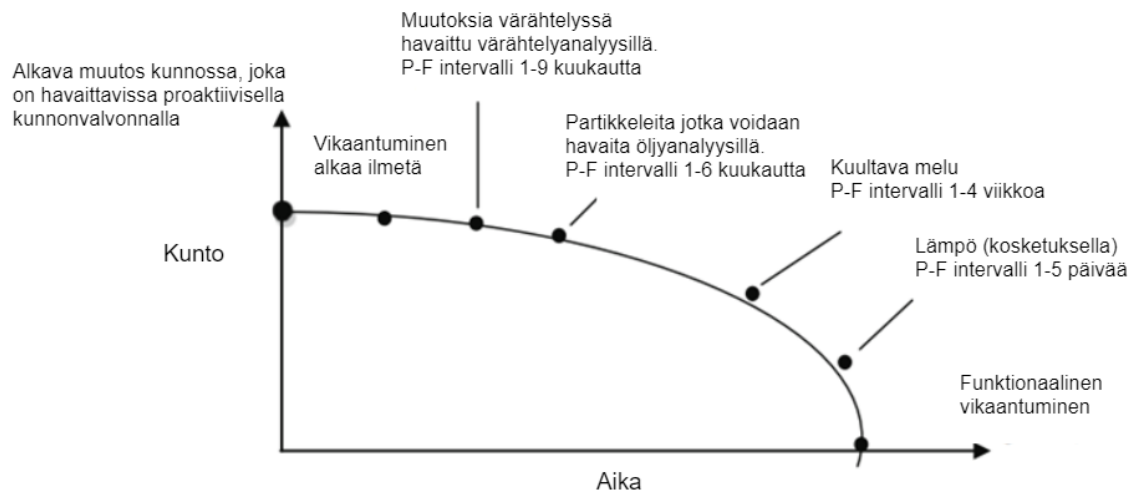
Ratkaisuna ennalta-arvaamattomuuteen yritykset alkoivat suorittaa ehkäisevää huoltoa määräaikaishuolloilla. Tehtaat suunnittelivat ennalta huoltoseisokit, jolloin laitteisto huollettiin. Ehkäisevään huoltoon ei kuulunut varsinaista kunnonvalvontaa, vaan huoltojaksot perustuivat arvailuun ja historiadataan (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 13–14).

Edelleen useissa yrityksissä on käytössä määräaikaishuoltoseisokit, jolloin tehdas on kokonaan pysähdyksissä ja laitteistoa huolletaan. Määräaikaishuollon heikkoutena on turha huolto, koska ehjän laitteen korjaaminen vaatii laitteen purkamista ja kokoonpanoa. Tällöin ehjä laite saatetaan kokoonpanna väärin tai altistaa esimerkiksi voiteluaineet likaantumisen luoden uusia suunnittelemattomia huoltoseisokkeja tuotantoon.

Ennakoiva kunnossapito poistaa satunnaislementin huoltosuunnitelmasta, koska se perustuu laitteen varsinaiseen kuntoon. Laitteesta otetaan reaaliaikaista dataa ja voidaan ennakoida, milloin huoltoseisokki tulisi tehdä ja pystytään esimerkiksi tilaamaan tarvittavat varaosat etukäteen (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 s.14–15).

2.4 Kunnonvalvontamenetelmän valinta laitteelle

Suuri osa laitteista vikaantuu satunnaisesti. Satunnaiseen vikaantumiseen huoltosuunnitelman tekeminen historiatiedon tai käyttöiän perusteella on lähes mahdotonta ilman kunnonvalvontaa. Kunnonvalvontamenetelmän valinta riippuu vahvasti laitteesta ja sen kriittisyydestä järjestelmässä (Kortelainen et al. s. 139–140). Mahdolliset havainnot ennen vikaantumista on havainnollistettu kuvassa 3.



Kuva 3 Vikahavainnot ennen vikaantumista muokattu kohteesta (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 s.54)

Aikaa havaitusta viasta itse vikaantumiseen kutsutaan P-F intervalliksi. Jos halutaan maksimoida aika reagoida vikaantumisiin kuvan tilanteessa, tulee valita kunnonvalvontamenetelmäksi partikkelianalyysi tai värähtelyanalyysi.

RCM eli luotettavuuskeskeinen huolto toimii eräänlaisena viitekehyksenä sopivan kunnonvalvontamenetelmän valinnalle. Liikkeelle lähdetään seitsemällä kysymyksellä: Mitä laitteen pitäisi tehdä ja mitä vaatimuksia sen toiminnalle on? Miten se ei toteuta näitä? Mikä aiheuttaa vikaantumisen? Mitä tapahtuu vikatilassa? Mitä merkitystä vialla

on? Mitä voidaan tehdä vian estämiseksi tai vaikutusten pienentämiseksi? Mitä tehdä, jos ennakoivaa toimenpidettä ei löydy? (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 s.17–18). Selvitetään mahdolliset vikatilat, vikojen aiheuttajat, niiden merkitykset ja kuinka viat voitaisiin poistaa tai minimoida vikojen vaikutukset.

Tämän jälkeen tehdään virheen toimintamallivaikutusten ja kriittisyyden analyysi (FMECA). FMECA:sta saadaan selville kriittiset osat järjestelmää vikatiheyden ja seurausten vakavuuden avulla. FMCEA auttaa valitsemaan oikean korjaustoimenpiteen kuhunkin tilanteeseen ja korostaa järjestelmän heikkouksia luotettavuuden näkökulmasta. FMECA:ssa ei ainoastaan korjata vikaa, vaan pyritään selvittämään todellinen syy vikaantumiselle ja korjaamaan se. (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 s.26–27).

Asiantuntijoiden arvioita täytyy hyödyntää, jos laitteesta ei ole riittävästi dataa. Voidaan hyödyntää esimerkiksi vikapuu menetelmää, jossa tarkastellaan kaikkia järjestelmän osia ja niiden vaikutusta toimintaan. Vikapuun avulla löydetään kriittisimmät komponentit järjestelmässä ja voidaan keskittyä näiden kunnonvalvontaan (Kortelainen *et al.* 2021 s.137).

Kunnonvalvontamenetelmän valinta helpottuu, kun tiedetään järjestelmän kriittiset kohdat toiminnan ja suuren vikatiheyden kohdalta. Jos laite ei ole kriittinen sen voidaan antaa vikaantua ennen korjaamista tai vaihtamista, ja voidaan keskittää resurssit kriittisempiin laitteisiin.

3. KUNNONVALVONTAMENETELMÄT JA DATAN KERÄYS

Tässä kappaleessa käydään läpi erilaisia kunnonvalvontamenetelmiä. Pääpainona tarkastellaan värähtely- ja öljyanalyysiä niiden varhaisen vikahavainnoinnin vuoksi. Lopussa käydään myös läpi datan keruuta jatkuvana ja katkonaisesti.

3.1 Kuntoon perustuva kunnonvalvonta

Kuntoon perustuvaa kunnonvalvontaa tarvitaan, kun laite on kriittinen järjestelmän toiminnan kannalta tai laitteen vikaantuminen aiheuttaa suuren turvallisuus tai taloudellisen riskin. Vikatilanteisiin voidaan varautua varaosilla ja varalaitteilla, jotka pienentävät huoltoseisokkien pituutta. Pidemmissä tuotantolinjastoissa voidaan hyödyntää puskurivarastoja, joita hyödynnetään laitteen huollon aikana mahdollistaen tuotannon, vaikka yksi tuotantolinjan osa puuttuisi kokonaan tuotantoketjusta.

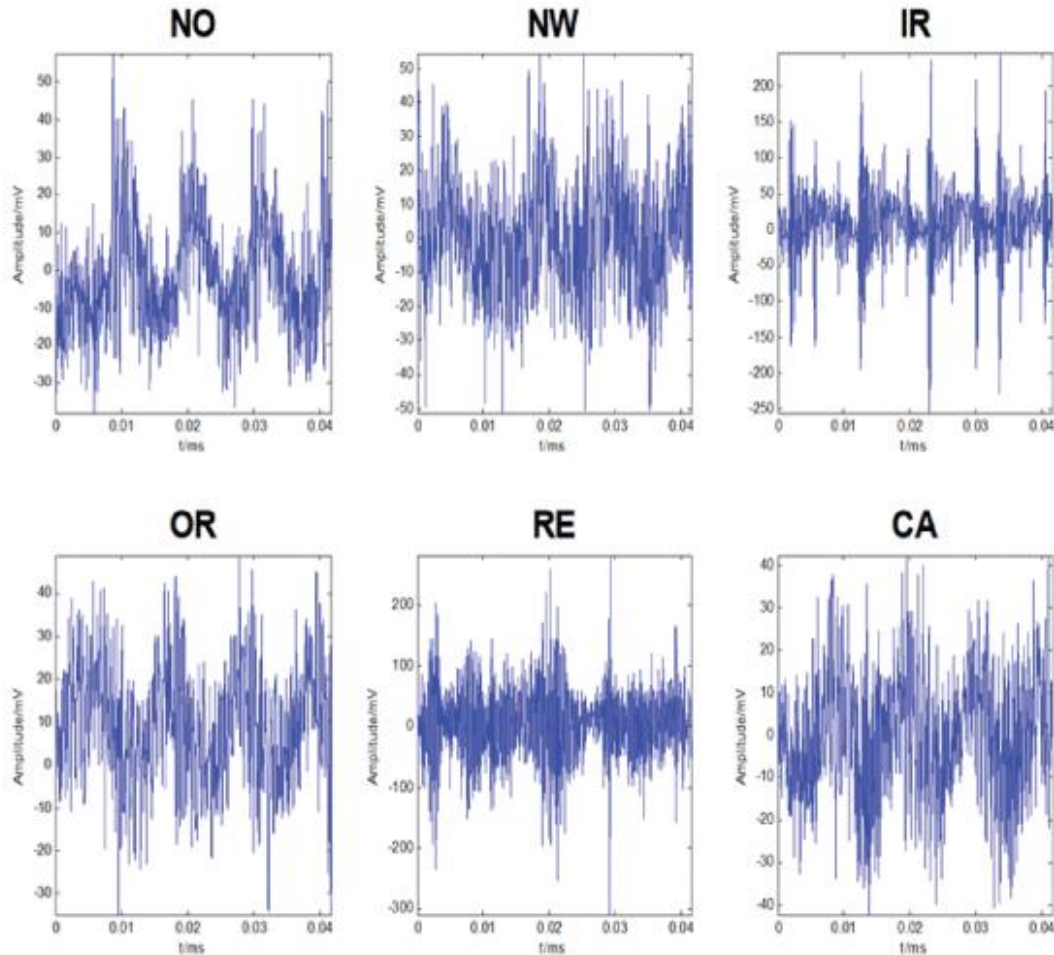
3.2 Värähtelyanalyysi kunnonvalvontamenetelmänä

Teollisuudessa käytetään voimansiirtoon paljon sähkömoottoreita ja sähkövaihdemoottoreita. (Nandi, S. et al. 2005) Noin puolet sähkömoottorien vikaantumisesta johtuu laakeriviasta. Laakerivian diagnosointiin värähtelyanalyysi sopii erittäin hyvin.

Laitteet tuottavat värähtelyä, vaikka ne olisivatkin hyvässä kunnossa. Tätä värähtelyä voidaan mitata esimerkiksi pyörivistä koneista (Randall, R.B. 2010 s.3–4). Värähtelyanalyysin vahvuuksia on välitön reaktio jopa pieniinkin muutoksiin ja se että vikaantunut komponentti voidaan tarkasti määritellä kasvaneen värähtelyn perusteella. Värähtelytason kasvun välitön havainto mahdollistaa vikaantuvan laitteen toiminnan pysäyttämisen ennen vikaantumista ja laite voidaan esimerkiksi vaihtaa korvaavaan säästäten sen suuremmalta vialta (Randall, R.B. 2010 s.6).

Laite voi vikaantua monesta eri syystä, mutta se näyttäytyy usein värähtelynä. Tämä mahdollistaa laitteen kunnon tarkastelun värähtelyanalyysillä purkamatta laitetta (Ahmed and Nandi, 2019 s. 7–8). Vikaantumista aiheutuu usein turhien huoltotoimenpiteiden aikana ja uudelleenkokoonpanossa. Laite altistuu pölylle ja muille epäpuhtauksille purettaessa ja kokoonpantaessa ja ne voidaan myös kokoonpanna virheellisesti luoden häiriötä sen toimintaan.

Värähtelyanturit voivat mitata esimerkiksi kiihtyvyyttä, nopeutta tai sijaintia. Anturit keräävät värähtelydataa ajan suhteen. Tätä dataa voidaan lukea joko koneavusteisesti tai ilman. Värähtelydatan arviointi silmämääräisesti vaatii asiantuntemusta ja tiedon laitteen normaalista värähtelytasosta (Ahmed and Nandi, 2019 s.33). Kuvasta 4 nähdään kuuden eri kunnossa olevan rullalaakerin värähtelydataa.



Kuva 4 Kuuden erikuntoisen rullalaakerin värähtelydataa (Ahmed and Nandi, 2018)

Kuvasta 4 on vaikea erottaa, että mitkä laakereista ovat vikaantuneet ilman tietoa ehjän laakerin värähtelystä. Suurimmat aallonpituudet löytyvät IR ja RE laakereilta, mikä viittaa näiden vikaantumiseen. IR laakerissa on mallinnettu vikaa tekemällä pieni ura laakerin sisärenkaaseen ja RE laakerissa on simuloitu korroosion aiheuttamaa vikaa laakerikuulien pintaan (Ahmed and Nandi, 2018). Korroosion aiheuttamassa viassa on enemmän epäsäännöllisyyttä värähtelyssä kuin sisärenkaan uran aiheuttamassa, mikä näkyy kohinana signaalissa. Ura sisärenkaassa näkyy säännöllisempänä värähtelynä kuin korroosion aiheuttama vika.

NO on uusi laakeri. Uuden laakerin värähtelysignaalissa on vähiten virhettä kohinan muodossa. Eniten kohinaa näkyy CA laakerissa, jossa laakerikehään tehtiin vika mahdollistaen kahden laakerikuulan vapaan epäsäännöllisen liikkumisen (Ahmed and Nandi, 2018). Laakerikehän vika aiheuttaa korroosion tavoin paljon kohinaa, mutta aallonpituus ei nouse yhtä suureksi. Laakerikuulien vapaa liikkuminen luo epäsäännöllistä värähtelyä laakerissa, mutta ei luo suuria piikkejä värähtelyyn.

Laakeri NW on käytetty laakeri, joka on hyvässä kunnossa. Uuteen laakeriin verrattuna siinä on enemmän kohinaa, mutta se liikkuu yhä samoissa aallonpituuksissa uuden kanssa. OR laakerissa on mallinnettu ulkorenkään vikaa tekemällä ura ulkorenkäaseen. Värähtelysignaalin aallonpituuden muutokset kasvoivat huomattavasti ehjiin laakereihin NO ja NW verrattuna (Ahmed and Nandi, 2018).

Laakereiden kunnan arviointi helpottuu huomattavasti, kun tiedetään ehjän laakerin antama signaali. Tämän jälkeen verrataan muiden värähtelytuloksia ehjään laakeriin. Vikatiloilla on myös ominaisensa värähtelysignaalit, mikä mahdollistaa paremman vian paikallistamisen ja vikasyyn löytämisen.

3.3 Öljyanalyysi kunnonvalvontamenetelmänä

Mekaanisten laitteiden suurimpia ongelmia on kitka, jonka vaikutuksen vähentämiseen tarvitaan toimivaa voitelua. Ilman voiteluainetta liikkuvat osat hankaavat toisiinsa lyhentäen niiden elinikää. Kunnollinen öljynvalvonta parantaa merkittävästi laitteiden käytettävyyttä ehkäisemällä mekaanisia vaurioita (Gresham and Totten, 2009).

Laitteen kunnan kannalta tärkeää on oikean voiteluaineen valinta ja valvontamenetelmä juuri kyseiselle laitteelle, joiden ansiosta voidaan havaita voiteluaineen kontaminaatio tai kulumisen ennen varsinaista laitteen vikaantumista (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 s.108).

Voiteluaineen kuntoa voidaan tarkastella sen viskositeetin avulla. Öljyn korkea viskositeetti pienentää aiheutuvaa värähtelyä, mutta kasvattaa lämpöenergiaa laitteessa. (Ismail, A.E. 2015). Voiteluaineen kunnosta kertoo myös siihen liuenneet partikkelit. Kontaminaatio öljyssä heikentää sen toimintaa ja voi viitata metallihiukkasina osien kulumiseen mahdollistaen todella aikaisen vian tunnistuksen (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 s.108–109). Voiteluaineen kuntoa voidaan tarkastella usealla eri tavalla. Kun tiedetään voiteluaineen kuntoon vaikuttavat tekijät, voidaan valita oikea kunnonvalvontamenetelmä kyseiselle laitteelle.

Ferrografia tarkastelee mikroskooppisia partikkeleita öljyssä. Partikkelit voivat olla hiekkaa tai muuta likaa, mikä heikentää voiteluaineen kuntoa tai metallihiukkasina, joiden

avulla voidaan havaita todella aikaisin esimerkiksi kulumisesta johtuvia vikoja. Partikkelianalyysi toimii samalla periaatteella, mutta sen avulla ei pystytä jakamaan partikkeleita esimerkiksi metallisiin ja epämetallisiin partikkeleihin (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 s. 108). Atomiemissiospektroskopiassa tarkastellaan öljyn ominaista säteilyä korkeassa lämpötilassa ja energiassa. Sen avulla voidaan myös havaita esimerkiksi metallipartikkeleita öljyssä, mikä viittaa kulumiseen laitteessa (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 s.109).

Öljyn viskositeettia tutkitaan kinemaattisen viskositeettitestin avulla. Viskositeettitestissä tarkastellaan öljyn virtausnopeutta kapillaariviskosimetrin läpi. Viskositeetti tarkoittaa vastustuskykyä virtaukselle eli mitä suurempi virtausnopeus sitä pienempi viskositeetti (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 s.109). Sedimenttitestausta käytetään matalaviskositeettisissä öljyissä. Sentrifugoinnin avulla erotetaan sedimentti öljystä ja tarkastellaan itse öljyn kontaminaatiota. Sedimenttitestauksella voidaan mitata öljyn puhtautta ja mahdollista kontaminaatiota.

Infrapunaspektroskopian avulla nähdään voiteluaineen heikkeneminen ja kontaminaatio veden ja hapen kanssa hyödyntäen molekyylien valoenergian absorbointia tietyillä aallonpituuksilla. Karl Fischer titraus testiä voidaan hyödyntää eristetyissä laitteissa esimerkiksi moottoreissa ja vaihteistoissa. Titrauksessa mitataan elektrodien läpi kulkeva sähkövirta, kun lisätään Fischer-reagenssi eli liuos, joka reagoi veden kanssa. Kemiallinen reaktio vapauttaa ioneja, joilla on pieni sähkövaraus. Veden määrä voiteluaineessa näyttäytyy sähkövirtauksena elektrodeissa (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 s.109).

Dielektristä lujuustestiä käytetään öljyn sähköneristyksen mittaamiseen. Sähköeriste öljyn eristyskyky heikkenee kontaminaation ja kulumisen myötä. Eristyskyky mitataan altistamalla näyte sähkölle ja mittaamalla sen eristyskyky (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 s. 109–110).

Öljyn happamuustasoa voidaan tarkastella potentiometrisellä titrauksella, mikä kertoo voiteluaineen kunnosta. Happamuutta voidaan tarkastella kokonaishappoluvun tai kokonaismääräisen emäsluvun avulla (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 s.109). Termografiaa eli lämpökuvausta voidaan hyödyntää öljyn kunnan valvonnassa tarkastelemalla voiteluaineen lämpötilaa. Lämpökuvaus soveltuu erinomaisesti esimerkiksi vaihdelaatikon kunnan tarkasteluun (Ismail, A.E. 2015).

Värähtelyanalyysiin verrattuna öljyanalyysin vahvuus on aika vikahavainnosta itse vikaantumiseen. Öljyanalyysillä voidaan havaita tuleva vika jopa 10 kertaa aiemmin (Nandi and Ahmed, 2020 s.8–9). Pidempi reaktioaika mahdollistaa tuotannon

suunnittelun niin, että huoltoseisokki saadaan tehtyä juuri oikealla hetkellä vähentäen menetettyä tuotantoa. Öljyanalyysin aikaisen viantunnistuksen takia sitä ei välttämättä tarvitse mitata jatkuvasti. Voiteluaineen kustannukset vaihtelevat, joten tarkemmat analyysit kannattaa suorittaa vain tarvittaessa. Tarkastellaan ensin yleistä kuntoa esimerkiksi viskositeettitestin avulla tai partikkelilaskurilla ja heikon tuloksen myötä tehdään tarkemmat testit ja analyysit. Voiteluaine kuluu, joten se pitää vaihtaa tietyin väliajoin, mutta sen kunto kannattaa tarkastaa ennen vaihtoa laitteissa, joissa öljyä on esimerkiksi satoja litroja, jotta rahaa ei menisi hukkaan.

3.4 Muita ainetta rikkomattomia kunnonvalvontamenetelmiä

Laitteen vikaantuminen on havaittavissa ihmisen aisteilla kuuntelemalla laitetta, tarkastelemalla sitä silmämääräisesti ja tuntemalla sen lämpeneminen. Aikaisemmin on kuitenkin havainnollistettu, että vikaantuminen on tässä vaiheessa jo pitkällä ja kunnon tarkastelu silmämääräisesti ei yleensä onnistu purkamatta laitetta.

Reaktioaikaa vikaantumiseen saadaan käyttämällä tarkempia välineitä kuin ihmissilmä. Visuaalinen tarkastus on yksi NDT:n eli ainetta rikkomattoman testauksen menetelmistä ja vaatii kunnolliset välineet ja asiantuntevan henkilön käyttämään niitä. Optinen boroskooppi, -kuituskooppi ja digitaalinen kuituskooppi ovat esimerkkejä laitteista, joiden avulla voidaan tarkastella koneenosien kuntoa vaikeistakin paikoista. Digitaalinen kuituskooppi mahdollistaa tallennuksen, jotta se voidaan lähettää asiantuntijan arvioitavaksi. Visuaalisen tarkastuksen tehostamiseksi voidaan hyödyntää väriaineita helpottamaan esimerkiksi halkeamien hahmottamista. Väriaineita ei välttämättä voida käyttää, jos tarkastelukohde on hankalasti saavutettavissa. (Beebe, R.S. 2004 s.146–147).

AE eli Akustinen emissio keskittyy enemmän vaihdelaatikossa tapahtuvaan vikaantumiseen. Vikaantuminen aiheuttaa poikkeavia ääniä esimerkiksi hankauman myötä, jonka AE sensorit havaitsee. Se toimii paremmin kuin värähtelyanturit suuressa melussa paremman SNR eli signaali-kohinasuhteen avulla. AE sensorit ovat kuitenkin huomattavasti kalliimmat ylläpitää kuin värähtelyanturit ja ovat vaikeampikäyttöisiä (Ahmed and Nandi, 2019 s.8).

Laitteen vikaantuminen yleensä vaikuttaa sen energian kulutukseen, jota voidaan tarkastella seuraamalla laitteen suorituskykyä. Lisääntynyt energiankulutus myös näkyy laitteessa lämpönä. Lämpökameran avulla voidaan havaita esimerkiksi vikaantuneita laakereita, joiden lämpötila on noussut esimerkiksi lisääntyneen kitkan vuoksi (Randall, R.B. 2010 s.6).

3.5 Datan kerääminen ja käsittely

Laitteen dataa voidaan kerätä jatkuvasti tai katkonaisesti esimerkiksi viikoittain. Jatkuvaa datankeruuta ei kannata käyttää laitteissa, jotka eivät ole kriittisiä suurempien kustannusten vuoksi. Jatkuvaa dataa varten asennettavat anturit kustantavat huomattavasti enemmän ja vaatii tietokoneelta enemmän muistia ja tehoa datan käsittelyyn. Jatkuva datan keruu mahdollistaa yllättävien vikatilojen ehkäisyn ja se sopii hyvin esimerkiksi värähtelyanalyysiin tai suorituskyvyn analyysiin (Randall, R.B. 2010 s.6).

Katkonaisen datan keruun vahvuuksia jatkuvaan verrattuna ovat pienemmät kustannukset ja mahdollisuudet tarkempaan analyysiin datasta. Esimerkiksi värähtelyn tarkasteluun voidaan käyttää kiihtyvyyssantureita, jotka voidaan siirtää helpommin laitteesta toiseen. Se ei myöskään vaadi tietokoneelta yhtä paljon muistia ja suorituskykyä pienemmän otoskoon vuoksi, mutta vikatilat voivat tulla yllättäen jättäen vähemmän aikaa reagoinnille (Randall, R.B. 2010 s.7).

Jatkuvan datan tarkastelua on vaikea toteuttaa ilman koneapua. Koneoppiminen on tärkeä osa kuntoon perustuvaa kunnonvalvontaa nyt ja tulevaisuudessa. Koneoppimisen avulla voidaan tehdä laitteille terveys indikaattorit, jotka nopeuttavat vikatilojen havaitsemista ja huoltotoimenpiteiden aloittamista. Koneoppiminen soveltuu signaalien tarkasteluun esimerkiksi värähtelysignaalin. Koneoppimisen käyttämistä hidastaa opettamisprosessi. Tarvitaan paljon dataa laitteen käyttäytymisestä eri terveystiloissa, jotta voidaan muodostaa tarkat algoritmit vikojen havainnointiin (Nandi and Ahmed, 2019 s.128).

Ihmissilmä voi helposti turtua hitaisiin muutoksiin ja ne jäävät havaitsematta. Algoritmi havaitsee nämä muutokset, koska sen muistissa on jatkuvasti laitteen terveystilojen raja-arvot. Värähtelysignaaleissa tärkeät signaalit voivat jäädä huomiotta taustamelun aiheuttaman kohinan vuoksi, mutta koneäly voisi havainnoida nämä. Koneoppimisen mahdollisuudet vikasignaalien tunnistuksessa ovat valtavat ja koneoppiminen tulee olemaan suuressa roolissa tulevaisuuden kunnonvalvonnassa.

4. SIMULOINTI KUNNONVALVONNASSA

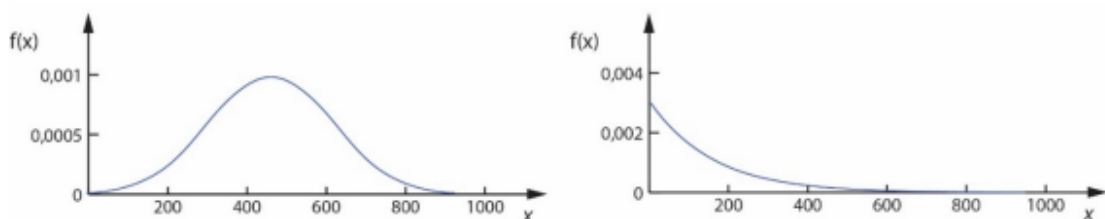
Kunnonvalvontaan meneviä kustannuksia on vaikea ennustaa etukäteen. Resursseja kuluu kunnossapidon palkkoihin, varaosiin ja uusiin laitteisiin. Pelkän historiatiedon perusteella voi tehdä arvauksia, mutta tarkempaa tietoa on vaikeampi saada. Tähän ratkaisuna on erilaiset simuloinnit, joilla tarkastellaan yhden laitteen tai koko laitteiston vikaantumista itse määritetyssä ajassa. Saadaan tarkempi tieto vikaantumisista, kuluvista varaosista ja huoltotyötunneista.

4.1 Simulointi teoriassa

Suurin osa vikaantumisesta tapahtuu satunnaisesti, joten sen tarkasteluun tarvitaan todennäköisyysjakaumia. Satunnaissuure kuvaa satunnaista ilmiötä tässä tapauksessa vikaantumista, jonka todennäköisyyksiä näillä jakaumilla tutkitaan (Kortelainen *et al.* 2021 s. 163).

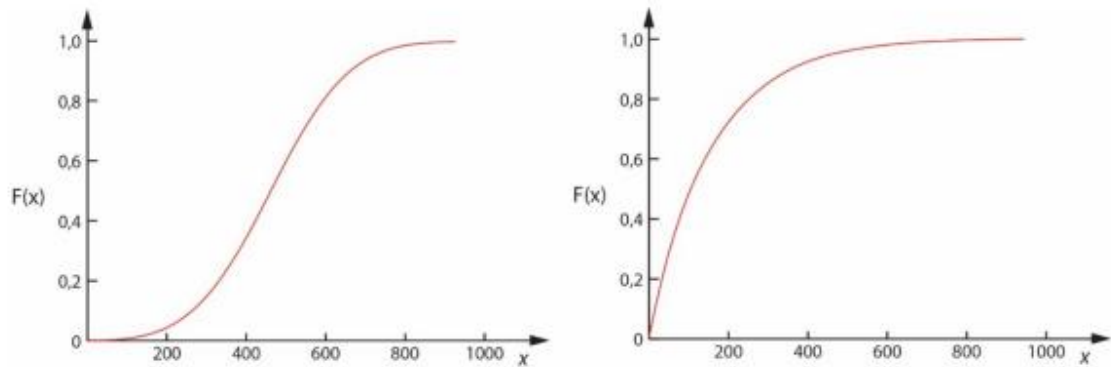
Todennäköisyysjakaumat jakaantuvat diskreetteihin- ja jatkuviin jakaumiin riippuen satunnaissuureen arvoista. Jos satunnaissuure voi saada vain tietyn äärellisen määrän arvoja, on kyseessä diskreetti jakauma. Jatkuvassa jakaumassa taas satunnaissuure voi saada äärettömän määrän arvoja tietyllä tarkasteluvälillä. (Kortelainen *et al.* 2021 s. 163).

Vikaantumisen satunnaisuuden takia yleensä käytössä on ääretön tapaus eli jatkuva jakauma. (Kortelainen *et al.* 2021 s. 163–164) Laskennan helpottamiseksi käytetään tiheys- ja kertymäfunktioita. Tiheysfunktio kuvaa vikaantumisen esiintymistiheyttä. Tiheysfunktiolla saadaan vika-ajan todennäköisyys laskettua pinta-alan avulla. Tiheysfunktion rajaama koko pinta-ala on 1. Kuvassa 5 on vasemmalla normaalijakauman ja oikealla eksponenttijakauman tiheysfunktiot.



Kuva 5 Tiheysfunktioita (Kortelainen *et al.* 2021 s.164)

Kertymäfunktio kertoo todennäköisyyden sille, että satunnaissuure saa saman tai pienemmän arvon kuin muuttuja x esimerkiksi vika-aika (Kortelainen *et al.* 2021 s. 164–165). Kertymäfunktioita on silmämääräisesti helpompi tarkastella ja analysoida, koska siitä saadaan suoraan todennäköisyydestä tarkasteltua vika-aika tai vastaavasti todennäköisyys jollekin vika-ajalle.



Kuva 6 Kertymäfunktioita (Kortelainen *et al.* 2021 s.165)

Vertailemalla kuvia 5 ja 6 havaitaan, että kertymäfunktioista on nopeampi tarkastella vika-aikoja ja todennäköisyyksiä kertymäfunktioista, koska se ei vaadi pinta-alan laskemista. Tarkkoihin arvoihin pääseminen vaatii kuitenkin myös kertymäfunktiossa vika-ajan tai todennäköisyyden laskemista funktiosta.

4.2 Prosessidata ja tilastollinen data simuloinnissa

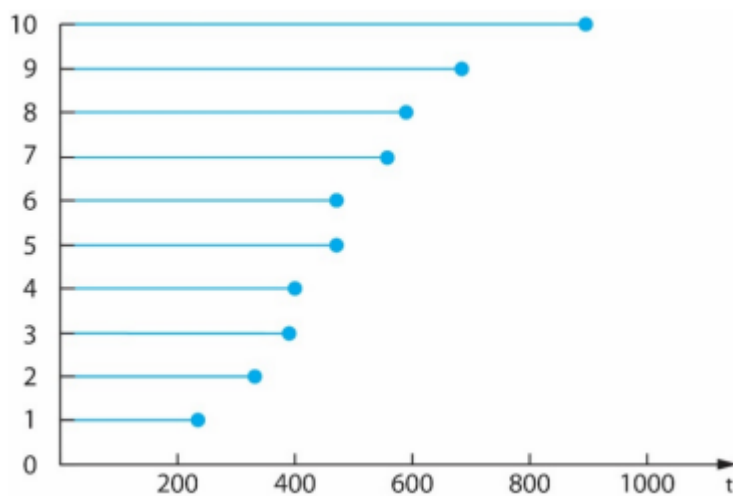
Laitteen kunnon simulointi vaatii paljon historiadataa laitteen toiminnasta. Ilman riittävää määrää dataa simulointiin sovitetussa käyrässä voi esiintyä paljonkin virhettä. Se millaista dataa kerätään ja mihin sitä voidaan käyttää pitää myös tietää.

Kerätty data jakaantuu laitteesta reaaliaikaisesti saatuun prosessidataan ja vika- ja korjaushistoriasta saatuun tilastolliseen dataan. Prosessidatan analysointiin soveltuu hyvin koneoppimismenetelmät, koska dataa tulee suuria määriä jatkuvasti. Prosessidataa voidaan hyödyntää vain kyseiselle laitteelle tai järjestelmälle, koska se perustuu yhden laitteen tai järjestelmän kuntoon (Kortelainen *et al.* 2021 s.158–159).

Tilastollista dataa eli laitteen vikaantumisesta ja korjauksesta saatua dataa saadaan hitaammin kuin reaaliaikaista prosessidataa. Pienempi määrä dataa mahdollistaa paremmin tarkastelun ilman koneoppimismenetelmiä ja sen avulla voidaan tarkastella koko laitteiston käyttäytymistä yhden laitteen tai järjestelmän sijaan (Kortelainen *et al.* 2021 s.158–159).

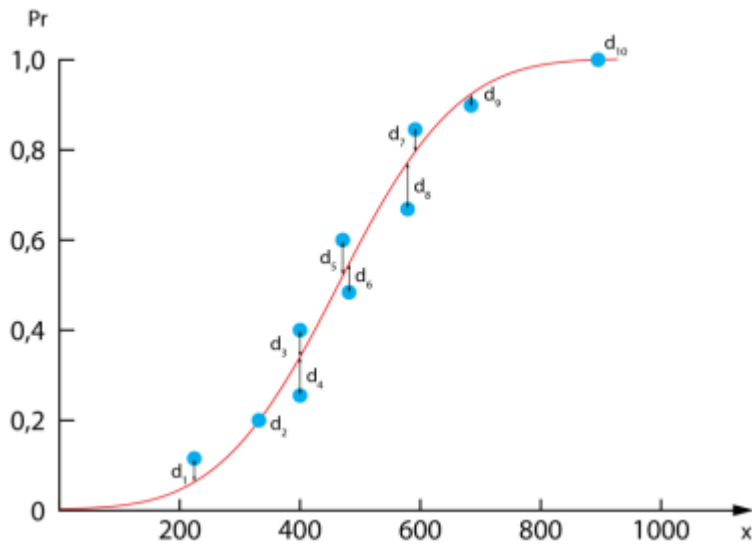
Prosessidatan vahvuudet piilevät siinä, että sillä pystytään ennakoimaan ja ehkäisemään laitteen vikaantumista tehokkaasti. Tilastollisen datan vahvuus on, että yritys saa koko laitteiston vikaantumisesta tietoa ja pystyy tekemään muutoksia toimintaansa, jos tulokset eivät miellytä. Eli tilastollinen data on hyödyllinen työkalu huoltokustannusten arviointiin ja koko laitoksen käytettävyyden arviointiin ja prosessidata on hyödyllinen yhden laitteen kunnon arviointiin.

Vika- ja historia datalla on helpompi lähteä tarkastelemaan laitteiston kuntoa. Simulointiin lähdetään muuttamalla data jakaumaksi. Empiirinen otoskertymäfunktio muodostetaan laittamalla vikaantumisesta saatu data suurusjärjestykseen x-akselille ja jakamalla y-akseli otoskokoilla, joka on tehty kuvassa 7.



Kuva 7 Empiirinen otoskertymäfunktio (Kortelainen et al. 2021 s.167)

Saadaan suuntaa antava kertymäfunktio, johon jakauma sijoitetaan esimerkiksi yleisesti pienemmän neliösumman kaavalla, missä jakauma menee mahdollisimman läheltä datapisteitä (Kortelainen et al. 2021 s.166–167). Otoskertymäfunktioon sijoitettu jatkuva jakauma näkyy kuvassa 8. Sovitetun jakauman avulla voidaan hakea todennäköisyyksiä tai vika-aikoja sijoittamalla funktioon vika-arvoja tai todennäköisyyksiä.



Kuva 8 Sovitettu jakauma otoskertymäfunktioon (Kortelainen et al. 2021 s.167).

Tietokoneella simuloitaessa satunnaisuus simulointiin luodaan satunnaismuuttujalla, joka on satunnainen luku nollan ja yhden väliltä. Kertymäfunktiossa tämä satunnaismuuttuja toimii y-akselina eli todennäköisyytenä vikaantumiselle (Kortelainen et al. 2021 s.168).

Simulaatiota voidaan hyödyntää tilastollisen datan avulla huollon kustannuksien ennustamisessa. Voidaan simuloida laitteiden vikaantumista, varaosien kulumista ja huoltotunteja. Sitä voidaan hyödyntää myös huoltovälien suunnitteluun, jos käytössä on määräaikaishuollot. Tilastollisen datan avulla voidaan siis ennustaa tulevia huoltokustannuksia ja prosessidatan avulla ennakoida vikatilanteita.

5. SÄHKÖMOOTTORIT JA VAIHDEMOOTTORIT

Tuotantolaitteiden käytettävyyden parantamisen keinoja on käyty läpi yleisesti, mutta nyt tarkastellaan tilannetta sähkömoottorien ja vaihdesähkömoottorien osalta. Kunnonvalvontana käytetään aikaan perustuvan kunnonvalvonnan (TBM) sijaan kuntoon perustuvaa kunnonvalvontaa (CBM), koska pyörievien koneiden vikaantumine on satunnaista 99 % ajasta (Ahmed and Nandi, 2019 s.3). Hyödynnetään tutkielmassa aiemmin läpi käytyjä keinoja käytettävyyden parantamiseksi kustannustehokkaasti.

5.1 RCM:n seitsemän kysymystä

Mitä vaihdesähkömoottorin pitäisi tehdä ja mitä vaatimuksia sen toiminnalle on (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 s.17–18)? Vaihdesähkömoottori muuttaa sähköenergian mekaaniseksi liike-energiaksi. Vaihte mahdollistaa vääntömomentin ja pyörimisnopeuden muuttamisen laitteessa. Jos huolto tapahtuu ulkoisen tahon toimesta, sille on määriteltävä tarkkaan vaatimukset suorituskyvystä esimerkiksi pyörimisnopeudesta, koska tätä pidetään jatkossa standardina ehjälle laitteelle.

Miten se ei toteuta näitä (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 s.17–18)? Tässä katsotaan, miten laite poikkeaa vaatimuksista sen toiminnan suhteen. Esimerkiksi laitteen hyötysuhde tippuu liian alhaiseksi tai laite ei yksinkertaisesti toimi. Mikä aiheuttaa vikaantumisen (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 s.17–18)? Laitteen vaihdelaatikon hammaspyörissä on kulumaa, koska voiteluaine kulunut. Mitä tapahtuu vikatilassa (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 s.17–18)? Kitka on suurempaa ja hammaspyörät pääsevät hankaamaan toisiinsa.

Mitä merkitystä vialla on (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 s.17–18)? Ei pysty siirtämään yhtä tehokkaasti ja tasaisesti voimaa. Mitä voidaan tehdä vian estämiseksi tai vaikutusten pienentämiseksi (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 s.17–18)? Vian estämiseksi voidaan tarkastella säännöllisin väliajoin voiteluaineen kuntoa, jotta havaitaan voiteluaineen kulumisen ja metallipartikkeleista hammaspyörien kulumisen. Mitä tehdä, jos ennakoivaa toimenpidettä ei löydy (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 s.17–18)? Jos ennakoivaa toimenpidettä ei löytyisi, niin laite pitäisi suunnitella uusiksi, jotta vikatila voitaisiin jatkossa estää.

5.2 Vaihdemoottorien vikaantumisen tarkastelu

Sähkövaihdemoottorille on alkuun tarkasteltava sen kriittisyys järjestelmässä. Jos tuotanto keskeytyy laitteen vikaantumisen myötä, se on kriittinen ja vaatii joko varalaitteen tai kunnonvalvontamenetelmän riippuen laitteen hinnasta tai molemmat. Suurille planeettavaihteistoille ei välttämättä ole taloudellisesti tai logistiikallisesti mahdollista hankkia varalaitetta varastoon.

Varalaitteen lisäksi voidaan varautua vikaantumiseen varaosilla. Tätä varten on tarkasteltava laitteen kriittiset komponentit. Tähän voidaan hyödyntää erilaisia vika-analyyseja esimerkiksi vikapuuta tai tässä tapauksessa asiantuntijoiden tietoa. Induktiomoottoreissa vikaantuminen johtuu noin 45 % ajasta laakerista ja vaihdemoottoreissa vaihteisto ja hammaspyörät on yksi suurimmista vian aiheuttajista (Soualhi, M et al. 2019). Muita pääkomponentteja vikaantumiselle on staattori, roottori ja akseli (Nandi, S et al. 2005). Eli voidaan ostaa varastoon edullisemmat varaosta kuten laakerit ja pienemmät hammaspyörät, mutta nämä ovat myös kriittiset komponentit, joiden kuntoa tulisi valvoa.

Laakereiden ja hammaspyörien vikaantumisen syitä tulee myös tarkastella, jotta voidaan korjata itse vian aiheuttaja eikä vain sen aiheuttamia vaurioita. (Stamboliska, Zhaklina. et al. 2015 s.108–109) Hammaspyörillä vikaantuminen johtuu voiteluaineen puutteesta tai kunnosta, joka ilmenee kulumana. (Nandi, S et al. 2005) Laakereille vikaantumista aiheuttaa esimerkiksi kontaminaatio, voiteluaineen kunto ja määrä, väärä asennus, liika kuorma ja virtapiikit. Laakeriin kohdistuvat rasitteet joko lisäävät lämpöenergiaa laakerissa, lisää värähtelyä tai aiheuttaa molempia.

Laakereiden kuntoa voidaan tarkastella värähtelyanalyysillä. Laitteen kriittisyyden mukaan voidaan valita joko jatkuva tai katkonainen datan keruu tapa. Koko laitteen kuntoon sopivan öljyanalyysin avulla voidaan erityisesti tarkastella kriittisiä komponentteja eli vaihteiston ja laakereiden kuntoa. Koko laitteen kunnon tarkasteluun sopii myös suorituskykyanalyysi ja lämpökamerat. Eli kriittisimmille laitteille voitaisiin hyödyntää jatkuvaa värähtelyanalyysiä ja katkonaista öljyanalyysiä aikaisessa virheen havainnoinnissa ja suorituskykyanalyysiä ja lämpökameroita myöhempään vian tunnistukseen. Vähemmän kriittisille laitteille riittää katkonaisesti dataa keräävä värähtelyanalyysi ja öljyanalyysi. Tärkeintä tarkastelussa on kriittisyyden tarkastelu ja oikean kunnonvalvontamenetelmän valinta.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Selvitimme tässä tutkielmassa, miten parannetaan tuotantojärjestelmien käytettävyyttä kustannustehokkaasti kirjallisuuskatsauksena. Tutkimuskysymykset olivat:

1. Miten valitaan kunnossapitomenetelmä?
2. Miten arvioidaan huollon kustannuksia?

Tärkeimpinä tekijöinä kunnossapitomenetelmän valintaan ovat järjestelmän kriittisten laitteiden löytäminen tuotannon ja turvallisuuden näkökulmasta ja näiden kriittisten komponenttien selvittäminen. Ilman kriittisyystarkastelua kunnonvalvonta ei ole tehokasta käytettävyyden tai kustannusten suhteen.

Kriittisten komponenttien tarkasteluun selvitimme erilaisia kunnonvalvontamenetelmiä ja tarkastelimme niiden soveltuvuuksia eri ympäristöihin. Tärkeää on oikean kunnonvalvontamenetelmän valitseminen oikealle laitteelle ja oikeaan ympäristöön.

Datan kerääminen tapahtuu jatkuvasti tai katkonaisesti. Jatkuva datan keruu mahdollistaa yllättävien vikatilojen havainnoinnin, mutta kustantaa enemmän ja vaatii koneoppimista ja suorituskykyä tietokoneelta. Simulointi mahdollistaa turvallisen pelikentän testata laitetta tai laitteistoa ja sen avulla voidaan arvioida huollon kustannuksia. Simuloinnilla saadaan tarkempia tuloksia mahdollisista huoltokustannuksista, vikojen määristä ja laitteiston yleisestä toiminnasta. Simulointi toimii johdolle päätöksenteon apuna ja paljastaa järjestelmän kriittisiä kohteita.

Case esimerkissä vaihdemoottoreista havaittiin kriittisiksi komponenteiksi laakerit ja hammaspyörät. Näiden kunnonvalvontaa sopii parhaiten värähtelyanalyysi ja öljyanalyysi, koska vikaantumisen syynä on usein voiteluaine tai liiallinen kuormitus. Huollon kustannuksia case esimerkissä ei päästy tutkimaan, koska vikadataa ei ollut.

Aineiston tutkimisen pohjalta omat havainnot ovat, että kunnossapitoon panostetaan entistä enemmän. Kunnonvalvontamenetelmiä tarvitaan kuitenkin enemmän ja esimerkiksi akustinen emissio ja virtamittaukset voisivat nousta tulevaisuudessa isompaan rooliin. Koneoppimisen ja tekoälyn kehittyessä pystytään tarkastelemaan entistä tarkemmin dataa ja havaitaan entistä aiemmin vikatiloja, mutta pitäisikö keskittyä enemmän luotettavampien osien kehitykseen vai parempaan viantunnistukseen. Ehkä vastaus on sekoitus molempia. Maapallolla on rajallinen määrä resursseja, joten niiden hukkaaminen ei ainakaan ole vastaus ongelmiin.

LÄHTEET

- Ahmed, H. & Nandi, A. K. (2018) Compressive Sampling and Feature Ranking Framework for Bearing Fault Classification With Vibration Signals. *IEEE access*. [Online] 644731–44746.
- Ahmed, H. & Nandi, A. K. (2019) *Condition monitoring with vibration signals : compressive sampling and learning algorithms for rotating machines*. [Online]. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Beebe, R. S. (2004) *Predictive maintenance of pumps using condition monitoring*. Kidlington, Oxford, UK ; Elsevier Advanced Technology.
- Gresham, R.M. and Totten, G.E. (2009) *Lubrication and maintenance of industrial machinery: best practices and reliability*. Boca Raton: CRC Press.
- Ismail, A.E. (ed.) (2015) *International Integrated Engineering Summit 2014: selected, peer reviewed papers from the 1st International Integrated Engineering Summit (IIES 2014), December 1-4, 2014, Batu Pahat, Malaysia*. Pfaffikon: TTP, Trans Tech Publ (Applied mechanics and materials, 773/774).
- Kenneth Holmberg *et al.* (2017) 'Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry'.
- Kortelainen, H. *et al.* (2021) *Tietämysperusteinen elinjakson hallinta*. 1st edn. Kunnossapitoyhdistys Promaint ry.
- Nandi, S. *et al.* (2005) Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors-A Review. *IEEE transactions on energy conversion*. [Online] 20 (4), 719–729.
- Randall, R. B. (2010) *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*. 1. Aufl. [Online]. Hoboken: Wiley.
- Soualhi, M. *et al.* (2019) Health monitoring of bearing and gear faults by using a new health indicator extracted from current signals. *Measurement : journal of the International Measurement Confederation*. [Online] 14137–51.
- Stamboliska, Zhaklina. *et al.* (2015) *Proactive Condition Monitoring of Low-Speed Machines*. 1st ed. 2015. [Online]. Cham: Springer International Publishing.