



Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka

Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka

Espoo, 1.12.2004

Toimittaja

Aino Helle

VTT Tuotteet ja tuotanto

Järjestäjä

VTT Tuotteet ja tuotanto



ISBN 951-38-6297-6 (URL:<http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

ISSN 1455-0873 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

Copyright © VTT 2005

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland
Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 4374

VTT Tuotteet ja tuotanto, Metallimiehenkuja 6, PL 1702, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 7077

VTT Industriella system, Metallmansgränden 6, PB 1702, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 7077

VTT Industrial Systems, Metallimiehenkuja 6, P.O.Box 1702, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7077

Esipuhe

Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka (Prognos) -tutkimushanke käynnistyi syksyllä 2003. Tekesin, yritysten ja VTT:n rahoittama kolmivuotinen tutkimushanke on luonteeltaan soveltava, teollisuuden tarpeiden pohjalta kohdistettu tavoitetutkimus, jossa pyritään kehittämään sekä sovelluskohtaisia että geneerisiä ratkaisuja teollisuuden käynnissäpidon hallinnan parantamiseksi. Prognostiikan haasteena on kyetä mittausten, historiatietojen ja mallien yhdistämisen ja analysoinnin kautta antamaan mahdollisimman luotettava ennuste jäljellä olevasta käyttöiästä ja vauriotodennäköisyydestä oikeiden ja oikea-aikaisten käyttö- ja kunnossapitotoimenpiteiden valinnan ja toteuttamisen mahdollistamiseksi ja suunnittelemattomien seisokkien välttämiseksi.

Hankkeen ensimmäinen seminaari pidettiin 1.12.2004 Otaniemessä ja siihen osallistui noin 50 henkilöä. Seminaari herätti laajempaa kiinnostusta, mitä osoitti se, että osallistujista noin viidennes edusti hankkeen ulkopuolisia yritystahoja. Seminaarin ohjelma jakaantui yleisempään hanketta ja sen aihepiiriä käsittelevään osaan sekä tutkimustahojen esitelmiin, jotka edustivat hankkeen ensimmäisen vuoden tutkimustuloksia ja selvityksiä. Tämän julkaisun sisältämien artikkelien lisäksi seminaarissa kuultiin teollisuuden esittämiä odotuksia ja näkökulmia hankkeesta ja laiteprognostiikan tulevaisuuden näkymistä. Hankkeen koordinaattorina toimittaja haluaa kiittää Seppo Tolosta Pyhäsalmi Mine Oy:stä ja Pasi Paloheimoa ABB Oy:n Sähkökoneista teollisuuden puheenvuoroista. Toimittaja kiittää myös Helena Kortelaista ja Kari Komosta hankkeen aihepiiriin läheisesti liittyvistä esitelmistä, joissa käsiteltiin käyttövarmuusmalleja ja fyysisen käytöomaisuuden hallintaa. Kirjoittajat kiittävät kaikkia hankkeessa mukana olevia tahoja tutkimusta kohtaan osoitetusta mielenkiinnosta sekä taloudellisesta ja teknisestä tuesta. Seminaarijärjestelyjen osalta suurimmat kiitokset kuuluvat Irina Granforsille. Lisäksi toimittaja haluaa kiittää Inkeri Repoa avusta seminaarimateriaalin kokoamisessa sekä Virpi Kupiaista avusta tämän julkaisun artikkelien editointityössä.

Sisällys

Esipuhe	3
Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka -tutkimushanke.....	7
Fyysisen käyttöomaisuuden hallinta – käynnissäpidon vaikutus yrityksen tuottavuuteen	15
Käyttövarmuusmallit	27
Taajuusvastefunktioiden hyödyntäminen kunnonvalvonnassa	39
Nosturin kunnonvalvonta	57
Lyhyen kantaman radiotekniikat ja niiden soveltaminen teollisuusympäristössä.....	67
Monilähteisten mittaustietojen yhdistäminen prognooseiksi ja päätöksenteon tueksi.....	77
Laitoksen tai koneen kolmiulotteinen malli käyttöliittymänä	89
Kunnossapidon kehityskohteiden tunnistaminen	99
Rasva- ja öljyvoideltujen kohteiden valvonta	107

Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka -tutkimushanke

Aino Helle
VTT Tuotteet ja tuotanto
Espoo

Tiivistelmä

Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka -tutkimushanke käynnistyi syksyllä 2003. Kolmivuotisen Tekes-rahoitteen tutkimushankkeen tavoitteena on luoda menetelmiä teollisuuden koneiden ja tuotantolinjojen käynnissäpidon hallitsemiseksi kehittämällä tekniikkaa niiden toimintakunnon, vikaantumistodennäköisyyden ja jäljellä olevan käyttöiän ennustamiseen. Käynnissäpidon hallinta kattaa laajan kokonaisuuden yksittäisistä komponenteista ja laitteista aina koko tuotantolinjaan tai laitokseen asti. Siihen tarvitaan sekä kokonaisvaltaisen, koko järjestelmän kattavan systemaattisen tarkastelun ja päätöksenteon tukivälineitä että järjestelmän osien, erityisesti sen kriittisten komponenttien toimintakunnon ja eliniän hallintaa. Prognostiikan haasteena on kyetä mittausten, historiatietojen ja mallien yhdistämisen ja analysoinnin kautta antamaan mahdollisimman luotettava ennuste jäljellä olevasta käyttöiästä oikeiden ja oikea-aikaisten käyttö- ja kunnossapitotoimenpiteiden valinnan ja toteuttamisen mahdollistamiseksi ja suunnitelmattomien seisokkien välttämiseksi. Hanke on luonteeltaan soveltava, teollisuuden tarpeiden pohjalta kohdistettu tavoitetutkimus, jossa pyritään kehittämään sekä sovelluskoh- taisia että geneerisiä ratkaisuja teollisuuden käynnissäpidon hallinnan parantamiseksi.

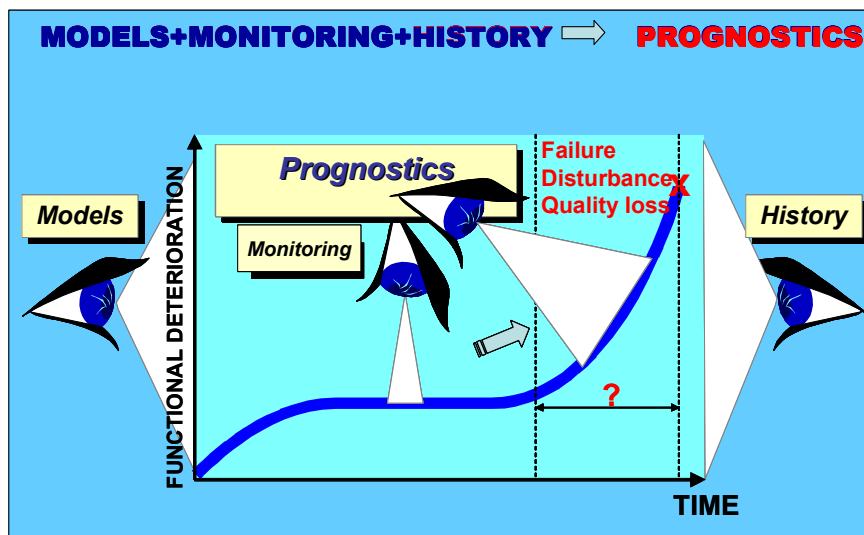
1. Tausta

Käyttövarmuuden parantamiseen tähtäävää tutkimusta ja kehitystyötä toteutettiin hyvin tuloksin Käyttövarmuus kilpailutekijänä (KÄKI) -teknologiaohjelmassa vuosina 1996–2000 [1, 2]. Ohjelma toi myös esiin runsaasti jatkokehitysaiheita ja vaikka aihepiiriin suoraan osuvaa teknologiaohjelmaa ei ole KÄKI-ohjelman jälkeen ollut käynnissä, käyttövarmuus ja käynnissäpidon hallinta nähdään Tekesissä suomalaisen teollisuuden kilpailukykyyn parantamisen kannalta tärkeänä, strategiisiin painoalueisiin kuuluvana tutkimusaiheena. Keskustelu mahdollisesta tutkimushankkeesta käynnistyi syksyllä 2002 Tekesin, usean tutkimustahon ja muutaman yrityksen välillä. Aihe täsmentyi prognostiikkaan ja kolmivuotinen Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka -tutkimushanke käynnistyi lokakuussa 2003.

Teollisuuden tuotantolaitteiden ja -menetelmien sekä niihin liittyvien tietojärjestelmien kehittyminen ja monimutkaistuminen asettaa niiden käyttövarmuuden hallinnalle entistä suurempia haasteita. Samalla taloudellisten riskien, ympäristövaikutusten ja turvallisuuden hallintaan kohdistuu yhä suurempia vaatimuksia. Suunnittelemattomien seisokkien aiheuttamat korjauskustannukset ja tuotannonmenetykset voivat nousta hyvinkin suuriksi: vuorokauden tuotantokatkoksen taloudellinen merkitys voi VTT:n selvityksen [3] ja hankkeessa mukana olevien yritysten oman arvion mukaan olla esimerkiksi sellu- ja paperiteollisuudessa, terästeollisuudessa tai kaivoksessa jopa 100 000–200 000 euroa. Käyttövarmuuden ja käynnissäpidon hallinnalla on oleellinen vaikutus yritysten tuottavuuteen ja kilpailukykyyn ja samalla korostuu myös laitteiden, prosessien ja tuotantojärjestelmien käynninaikaisen monitoroinnin, diagnostiikan ja prognostiikan tärkeä ja lisääntyvä merkitys.

2. Tutkimuksen tavoite ja osa-alueet

Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikkaan keskittyvän tutkimuksen tavoitteena on luoda menetelmiä teollisuuden koneiden ja tuotantolinjojen käynnissäpidon hallitsemiseksi kehittämällä tekniikkaa niiden toimintakunnon, vikaantumistodennäköisyyden ja jäljellä olevan käyttöiän ennustamiseen.

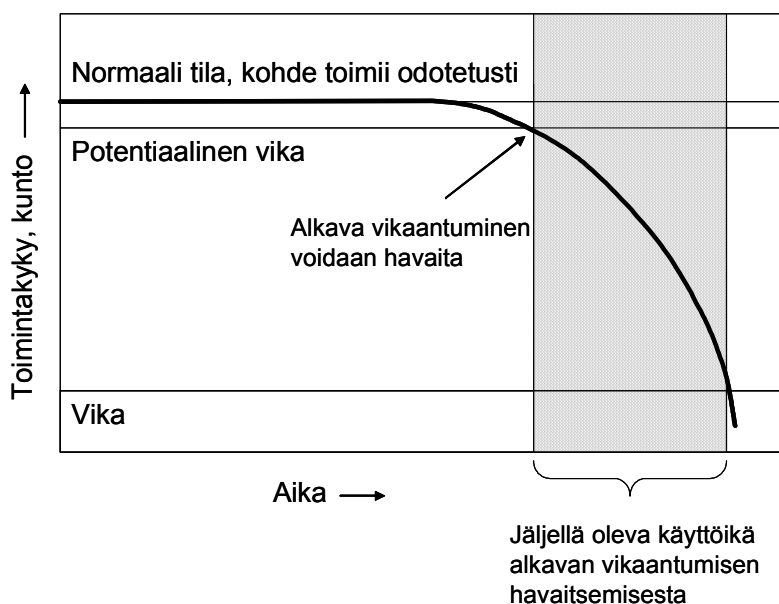


Kuva 1. Mallien, mittaus- ja historiatiedon yhdistäminen antaa mahdollisuuden prognostiikkaan, ennusteeseen tulevista.

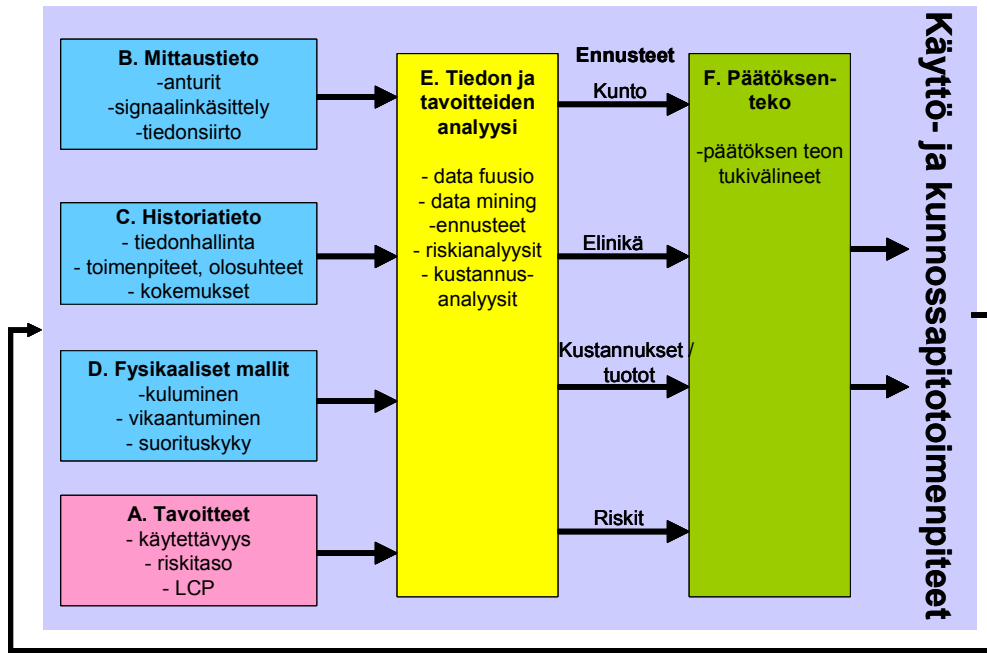
Tarkasteltavan kohteen, oli kyseessä yksittäinen kriittinen komponentti tai koko tuotantojärjestelmä, toimintakunnon heikkeneminen ajan mukana voidaan esittää esimerkiksi kuvan 1 mukaisesti. Toimintakunnon lopullisen menetyksen kriteereinä voi olla kohteen vaurioitumisen lisäksi myös häiriöt tai menetykset tuotannon määrällisten tai laadullis-

ten vaatimusten täyttymisessä. Kuvaaja voi perustua toimintakykyä heikentävän fyysikaalisen ilmiön tai sitä ilmentävän mitattavissa olevan vasteen ajan mukana tapahtuvan muutoksen malliin, esimerkiksi kulumisen tai värähtelymittaussignaalista lasketun piirteen malliin, tai laajempaa kokonaisuutta tarkasteltaessa esimerkiksi tuotantolinjan käyttövarmuusmalliin. Vastaavista kohteista saatavilla olevaa historiatietoa voidaan käyttää hyväksi mallien muodostamisessa ja verifiointissa. Käytössä olevien kohteiden tilaa voidaan seurata mittausten, tarkastusten tai aistihavaintojen perusteella, jolloin saadaan tietoa nimenomaan niiden sen hetkisestä tilasta ja sen muutoksesta aiempaan nähden. Mittauspohjaisen tiedon analysointi yhdessä historiatiedon ja ilmiöpohjaisten mallien kanssa antaa mahdollisuuden entistä tarkempaan diagnostiikkaan ja vikaantumisen ja häiriöiden kehittymisen ennustamiseen.

Käynnissäpidon hallinta kattaa laajan kokonaisuuden yksittäisistä komponenteista ja laitteista aina koko tuotantolinjaan tai laitokseen asti. Siihen tarvitaan sekä kokonaisvaltaisen, koko järjestelmän kattavan systemaattisen tarkastelun ja päätöksenteon tukivälineitä että järjestelmän osien, erityisesti sen kriittisten komponenttien toimintakunnon ja eliniän hallintaa. Kriittisten komponenttien jäljellä oleva käyttöikä vaikuttaa suoraan koneen tai tuotantolinjan kykyyn pysyä toimintakunnossa seuraavaan suunniteltuun seisokkiin asti.



Kuva 2. Valvottavan kohteen toimintakunto, alkavan vikaantumisen havaitsemisajankohta ja jäljellä oleva käyttöikä ennen vikaantumisen aiheuttamaa toimintakyvyn menetystä.



Kuva 3. Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka -hankkeen tutkimuksen osa-alueet.

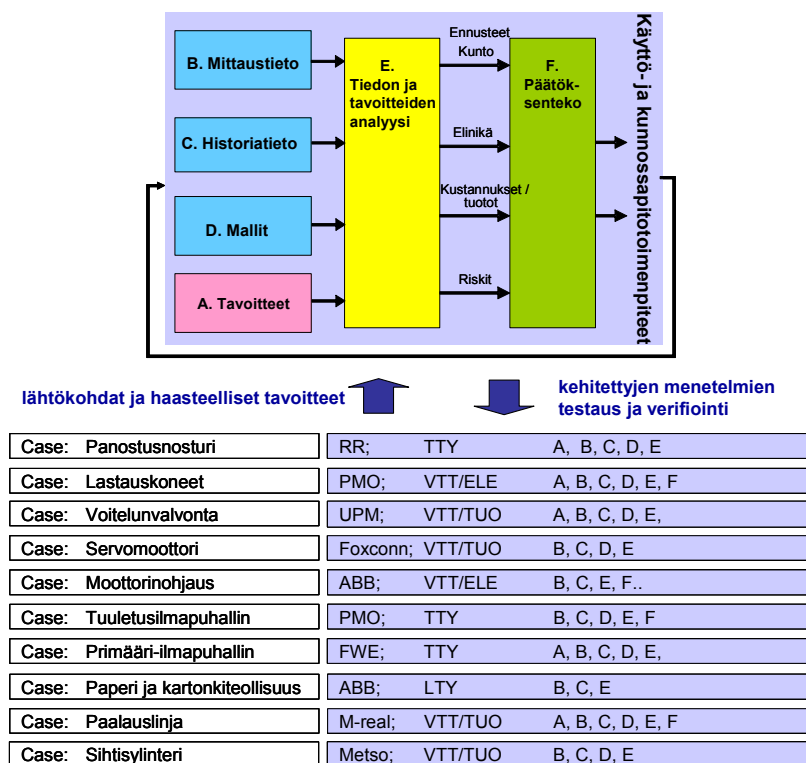
Prognostiikka edellyttää osaamista, menetelmiä ja tekniikkaa hyvin monelta eri osa-alueelta, kuva 3. Käynnissäpidon hallinnassa järjestelmän tai tuotantolinjan käytön tavoitteiden määrittely on tärkeä tehtävä, joka antaa perustan käytettävien menetelmien (esimerkiksi kunnossapidon ja kunnonvalvonnan menetelmät) valinnalle ja kehittämiselle. Mittaustiedon keräämiseen ja analysointiin tarvitaan monitorointiin soveltuvaa anturointia, tiedonsiirtoa ja signaalinkäsittelyä, joka voidaan tehdä osin paikallisesti kohteen ja anturin välittömässä läheisyydessä ja osin etävalvontakeskuksessa. Teollisuuden koneiden ja tuotantojärjestelmien kunnonvalvonnassa ja tuotantoprosessin ohjauksessa ja säädössä on käytössä paljon erilaisia mittauksia, joita voidaan hyödyntää tehokkaammin oleellisia tietoja yhdistämällä. Historiatiedot luovat tärkeän pohjan esimerkiksi kriittisten komponenttien määrittämiseksi ja niitä voidaan käyttää hyväksi mittaustiedon tulkinnessa ja mallien rakentamisessa ja verifiointissa. Mitä paremmin tarkasteltavan kohteen tilaan ja kuntoon ja sen seurannassa käytettäviin piirteisiin liittyvät ilmiöt tunnetaan ja osataan mallintaa, sitä paremmat edellytykset on ennusteiden tekemiseen mittaustiedon perusteella. Eri lähteistä saatujen tietojen yhdistäminen ja analysointi päätöksen tekoa tukeviksi ennusteiksi on haasteellinen ja vaativa menetelmäkehityksen kohde.

3. Case-lähtöinen toteutus

Tutkimuksen toteutus tapahtuu teollisuuden käynnissäpidon strategisten kehitystarpeiden pohjalta valittujen case-tapausten avulla kohdistuen niissä tarvittavien ratkaisujen ja käynnissäpidon hallinnan menetelmien kehittämiseen ottaen samalla mahdollisimman hyvin huomioon eri casien väliset synergiat ja kehitettävien ratkaisujen generisyyden ja

soveltamismahdollisuuden myös muissa kohteissa. Teollisuuden caset luovat lähtökohdat tutkimuksen toteuttamiselle antaen tarvittavaa historia- ja mittaustietoa sekä asettavat haasteelliset tavoitteet käynnissäpidon hallinnan menetelmien ja työkalujen kehittämiseen. Projektin aikana ne antavat myös mahdollisuuden kehitettyjen menetelmien testaamiseen ja verifiointiin.

Hankkeessa toteutettava tutkimus pohjautuu tällä hetkellä kymmeneen teollisuuden case-tapaukseen, ja kullekin caselle on nimetty sekä vastuullinen yritys että vastuullinen tutkimustaho, ks. kuva 4.



Kuva 4. Kaaviokuva tutkimuksen osa-alueiden kytkeytymisestä teollisuuden case-tapauksiin. Kunkin casen vastuullinen yritys ja tutkimustaho sekä caseen liittyvät osa-alueet on merkitty kuvaan.

Terästehtaan panostusnosturi, kaivoksessa käytettävä malmin lastauskone ja kaivoksen päätuuletusilmahuuhallin ovat kaikki tuotannon kannalta kriittisiä kohteita, joiden vikaantuminen voi aiheuttaa merkittäviä taloudellisia menetyksiä. Kaikki ovat kohteita, joissa on olemassa jossain määrin jatkuvaa valvontaa on-line-mittauksin sekä määräajoin tehtäviä mittauksia, diagnostiikkaa ja historiatietoja. Tavoitteena on vikaantumistapahtumien ja huoltotarpeen ennustamiseen kykenevän mittaussuureita ja prosessisuureita hyödyntävän käynninseuranta- ja prognostiikkajärjestelmän kehittäminen. Langan tiedonsiirto ja etädiagnostiikkamenetelmät sisältyvät myös osassa caseja tutkimus- ja kehitystyön piiriin. Kiertoleijukattilalaitoksen primääri-ilmahuuhallinjärjestelmä on

tuuletusilmapuhaltimen kanssa paljon yhteisiä piirteitä omaava kohde. Osalla edellä mainituista caseista on liittymäkohtia myös voitelunvalvonta-caseen, jossa tavoitteena on rasvavoiteluun liittyvien voiteluvirheiden tunnistaminen ja korjaaminen sekä voitelutilanteen ja vikaantumisen seuranta ja ennakointi mittauspohjaisin menetelmin.

Servomoottori-casessa tutkimus- ja kehitystyö kohdistuu sekä käytössä olevien servomoottoreiden vikatilanteiden ja korjaustarpeen ennustamiseen että huollettujen moottoreiden tulevan toimintakunnon ennustamiseen. Prosessiteollisuuden moottorinohjausjärjestelmiin liittyen tutkitaan sähkökäyttö- ja prosessimittausdatan integroimista ja tavoitteena on mittaus- ja historiatietoihin pohjautuva diagnostiikka ja prognostiikkajärjestelmä kunnossapidon toimenpideohjelmien esittämistä varten.

Paperi- ja kartonkitekiteollisuus-casessa tutkimus kohdistuu geneeriseen etädiagnostiikkakonseptiin sekä paperi- ja kartonkikoneiden laatusäätöjen diagnostiikkaan. Sovelluskohteina on erityisesti taajuudenmuuttajan etädiagnostiikka ja sähkökoneiden kunnonvalvonta. Paalauslinja-casessa tarkastelu on järjestelmätasolta lähtevää ja kohteena on koko paalauslinja ja erityisesti kunnossapidon suunnittelun kehittäminen. Sihtisylinteri-casessa tutkimus kohdistuu komponenttitason valvontaan, diagnostiikkaan ja prognostiikkaan tavoitteena kehittää pinnoitteen kulumisen seurantaan soveltuva on-line-valvontamenetelmä.

Osa tutkimushankkeen toteuttamiseen liittyvistä tehtävistä on sovelluskohtaisia, mutta osa on hyvinkin geneerisiä ja eri caseille yhteisiä. Eri lähteistä saatavan mittaustiedon ja historiatiedon yhdistäminen on yhteinen piirre suurelle osalle caseista. Mittauspohjaista tietoa on runsaasti saatavilla, mutta siitä on osattava erottaa ja hyödyntää vain se oleellinen ja tarpeellinen osa, jonka avulla kohteen tila ja kehittyminen voidaan diagnosoida ja ennustaa riittäväällä tarkkuudella ja luotettavuudella, tarkoitukseen kehitettäviä ja soveltuvia menetelmiä ja malleja käyttäen.

4. Hankkeen osapuolet

Tutkimushanke toteutetaan yritysten ja tutkimusosapuolien yhteistyönä tutkimustahojen ryhmähankkeena, jonka päärahoittajana on Tekes. Hankkeessa mukana olevat ja sen tuloksia hyödyntävät yritykset kattavat laajan osan arvoketjusta yritysten koostuessa laite- ja järjestelmävalmistajista loppukäyttäjiin ja kunnossapitopalveluita tuottaviin yrityksiin.

Hankkeen vastuullisena johtajana toimii prof. Kenneth Holmberg ja koordinaattorina erikoistutkija Aino Helle VTT Tuotteet ja tuotanto -yksiköstä. Johtoryhmän puheenjohtaja on kunnossapitopäällikkö Seppo Tolonen Pyhäsalmi Mine Oy:stä. Tekesissä hankkeen yhteyshenkilö on johtava teknologia-asiantuntija Mikko Ylhäisi.

Hankkeessa mukana olevat tutkimustahot ovat:

- VTT Tuotteet ja tuotanto
- VTT Elektroniikka
- VTT Tietotekniikka
- Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan osasto
- Oulun Yliopisto, Konetekniikan osasto ja
- Tampereen teknillinen yliopisto, Konedynamiikan laboratorio.

Hanketta rahoittavat yritykset ovat:

- Pyhäsalmi Mine Oy
- Rautaruukki Oyj
- Metso Paper Valkeakoski Oy
- UPM-Kymmene Oyj
- ABB Oy Sähkökoneet
- ABB Oy Pienjännitetuotteet
- M-real Oyj, Joutseno BCTMP
- Sandvik Tamrock Oy, TORO Loaders-divisioona
- Vacon Oyj
- Oy Botnia Mill Service Ab
- Foxconn Oy
- LSK Electrics Oy
- Foster Wheeler Energia Oy.

Hanke antaa hyvät mahdollisuudet tutkimustahojen yhteistyön syventämiseksi ja edistää aihepiirin tutkimustahojen ja teollisuuden välistä verkottumista. Hanke on esimerkki soveltavasta, teollisuuden tarpeiden pohjalta kohdistetusta tutkimuksesta, jossa pyritään kehittämään sekä sovelluskohtaisia että generisiä ratkaisuja teollisuuden käynnissäpidon hallinnan parantamiseksi.

5. Yhteenveto

Käyttövarmuuden ja käynnissäpidon hallinnalla on oleellinen vaikutus yritysten tuottavuuteen ja kilpailukykyyn. Tekesin, yritysten ja VTT:n rahoittama kolmivuotinen Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka -tutkimushanke käynnistyi lokakuussa 2003. Hankkeen tavoitteena on luoda menetelmiä teollisuuden koneiden ja tuotantolinjojen käynnissäpidon hallitsemiseksi kehittämällä tekniikkaa niiden toimintakunnon, vikaantumistodennäköisyyden ja jäljellä olevan käyttöiän ennustamiseen. Tutkimuksen toteutus tapahtuu case-lähtöisesti teollisuuden käynnissäpidon strategisten kehitystarpeiden pohjalta valittujen case-tapausten avulla. Tutkimus kohdistuu niissä tarvittavien ratkaisujen ja käynnissäpidon hallinnan menetelmien kehittämiseen ottaen samalla huomioon

casien väliset synergiat ja kehitettävien ratkaisujen geneerisyyden ja soveltamismahdollisuuden myös muissa kohteissa. Hankkeessa on mukana kolme VTT:n tutkimusyksikköä ja kolme teknillistä yliopistoa sekä 13 yritystä.

Lähteet

- [1] Holmberg, K. (ed.). Competitive Reliability 1996–2000. Final Report. Technology Programme Report 5/2001 TEKES, Helsinki, 2001. 134 s.
- [2] Competitive Reliability 1996–2000. Evaluation Report, Technology Programme Report 10/2001. TEKES, Helsinki, 2001. 42 s.
- [3] Holmberg, K., Komonen, K., Oedewald, P., Peltonen, M., Reiman, T., Rouhiainen, V., Tervo, J. & Heino, P. Safety and Reliability – Technology Review. Research Report BTUO43-031209, VTT Industrial Systems, Espoo, 2004. 80 s. + liitt. 4 s.
- [4] Wilson, A. (ed.). Asset maintenance management. A guide to developing strategy & improving performance. Conference communication, U.K., 1999. 858 s.
- [5] Moubray, J. Reliability-centred Maintenance. 2nd edition. Butterworth–Heinemann, U.K. 1997. 426 s.

Fyysisen käyttöomaisuuden hallinta – käynnissäpidon vaikutus yrityksen tuottavuuteen

Kari Komonen
VTT Tuotteet ja tuotanto
Espoo

Tiivistelmä

Pääomavaltaisessa teollisuudessa ja infrastruktuuri-investoinneissa käyttöomaisuuden tuottavuudelle asetetaan tulevaisuudessa entistä enemmän painoa. Kiristynyt kilpailu ja yritysten pääomantuotto- ja käyttökatetavoitteet edellyttävät pääoman kiertonopeuden nousua (Kärri 2000). Tämä merkitsee edelleen sitä, että muiden liiketoimintaparametrien pysyessä muuttumattomina investointiaste tulee laskemaan. Tämä taas tarkoittaa sitä, että teollisuuden käyttövarmuuden ja käyttöasteen pitää nousta.

1. Johdanto

Käynnissäpidon merkitys on erittäin suuri etenkin pääomavaltaisessa teollisuudessa. Useilla pääomavaltaisilla toimialoilla pääoman tuottavuuden parantamisen merkitys näyttää tulevaisuudessa korostuvan. Asetetut tuottavuus- ja kilpailukykytavoitteet vaativat siis myös fyysisen käyttöomaisuuden käytön tehostumista (Kärri 2000). Julkinen kehityspanos on painottunut viime aikoina vahvasti teknologiateollisuuteen. Samalla pääomavaltaisen teollisuuden merkitys työpaikkojen säilyttäjänä on kuitenkin kasvanut. Pääomavaltaisen teollisuuden pitkän aikavälin kannattavuuden merkitys korostuu myös sen välillisesti työllistävän vaikutuksen vuoksi. Tuotannollisen toiminnan tarpeita tyydyttämään on muodostunut kasvava osaamisintensiivisiä teollisia palveluita ja tuotteita tarjoava sektori, jonka kehittyminen ja menestyminen perustuu kotimaiseen teolliseen asiakkaaseen. Esimerkiksi metsäklusteri työllistää Suomessa noin 200 000 henkeä. Metsäklusteri kasvaa 3–4 % vuodessa ja se pysynee myös tulevaisuudessa Suomen suurimpana klusterina. Metsäklusterin, johon kuuluu mm. metsäteollisuus, metsäteollisuuden kone- ja automaatiovalmistajat, kemikaalitoimittajat ja pakkausteollisuus, osuus teollisuuden tuotannosta on 30 % ja viennistä jopa 40 % (Metsäteollisuus ry 2004).

Pääomavaltaisen teollisuuden merkityksen Suomen kansantaloudessa voidaan perustellusti olettaa säilyvän suurena. Tähän voidaan löytää useita syitä. Pääomavaltaisen teollisuuden tuotannon ja viennin määrä lyhyellä sekä pitkällä aikajänteellä on kasvava ja sen

osuus Suomen teollisesta tuotannon jalostusarvosta on oleellinen (noin 40 %). Samanlaisesti mm. FAO:n pitkänaikavälin arvioiden mukaan metsäteollisuuden tuotteiden kysyntä tulee kasvamaan tulevaisuudessa edelleen. Vuoteen 2010 mennessä arvioidaan paperin ja kartongin kulutuksen kasvavan noin 2,5 % vuodessa. Kemianteollisuuden ja metallin jalostuksen rooli on Suomessa yhä vahva. Outokumpu ja Rautaruukki ovat investoineet sekä uusiin linjoihin että vanhojen linjojen kehittämiseen. Energiateollisuus investoi ja kehittää toimintaansa. Teollisuuden (pääosin pääomavaltainen teollisuus) kunnossapidon tehtävissä työskentelee n. 50 000 henkilöä ja kunnossapitoon käytetään 3,5 miljardia euroa vuosittain (Kunnossapitoyhdistys ry 2001).

Käyttövarmuuden, käyttöasteen, laadun sekä yleensä tuotantojärjestelmien ja laitteistojen elinajan tuottokyvyn ja riskien hallinnan parantaminen ovat entistä tärkeämpiä tekijöitä pääomavaltaisen teollisuuden kilpailukyvyn varmistamisessa. Tulevaisuuden tuottokyvyn varmistamiseksi on huolehdittava myös tuotantojärjestelmien aineettoman pääoman hyödyntämisen kehittamisestä sekä tuotantojärjestelmien markkina-arvon säilyttämisestä tai nostamisesta (Komonen et al. 2004).

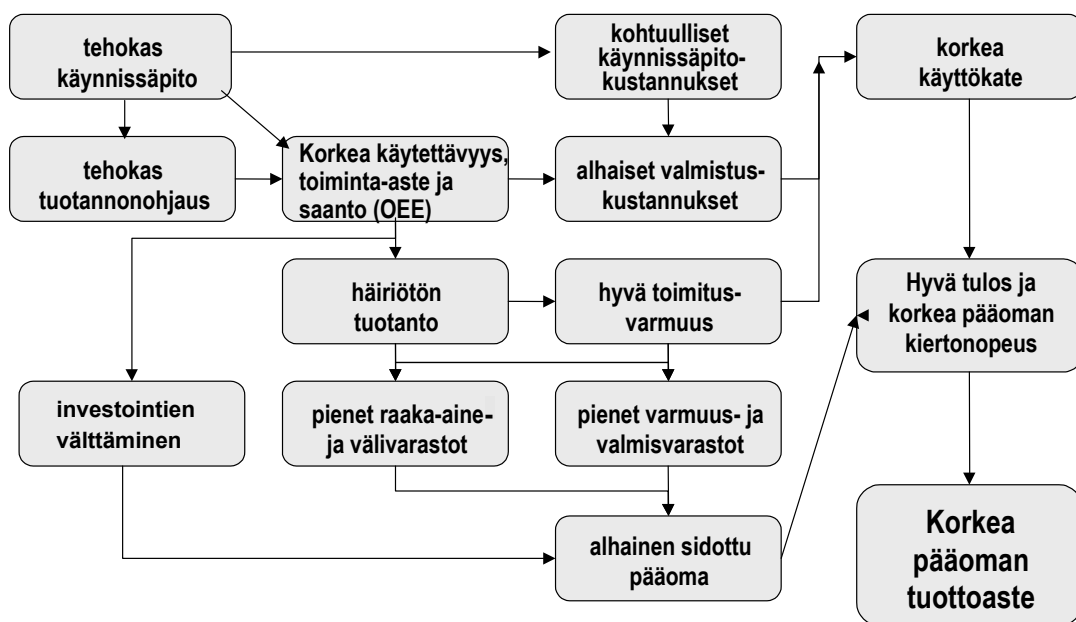
Käyttövarmuuden merkityksen lisääntymiseen on selviä syitä: (1) Teollisuuden pääomavaltaisuus sekä automaatioaste ovat lisääntyneet ja samalla (2) pääoman tuottovaatimukset ovat kasvaneet, (3) raaka-aine-, puskuri- ja lopputuotevarastot pyritään pitämään mahdollisimman alhaisina, (4) asiakkaan vaatimukset sekä toimitusvarmuuden ja tuotteen laadun suhteen ovat lisääntyneet ja (5) epäkäytettävyyden epäsuorat kustannukset ovat merkittävät. Joissakin tilanteissa heikko käyttövarmuus saattaa aiheuttaa turhia investointitarpeita. Eräillä toimialoilla kunnossapidosta, käyttövarmuuden tärkeästä ylläpitäjästä, on tullut eräs kilpailukyvyn tärkeimmistä tekijöistä. Näin ollen Idhammarin vuonna 1983 esittämistä kunnossapidon merkityksen kasvuun vaikuttavista tekijöistä useimmat ovat yhä päteviä (Idhammar 1983).

2. Pääoman tuottavuuteen ja tuottoasteeseen vaikuttavia tekijöitä

Pääoman tuottavuus tarkoittaa yksinkertaisten sitä, kuinka paljon tuotantoa saadaan aikaan tietyllä pääomakannalla. Kansantalouden tasolla pääoman *tuottavuus tarkoittaa tutkittavan kansantalouden bruttoarvonlisäyksen suhdetta pääomakantaan* (Junka 2003). Yrityksen pääoman tuottoaste taas määritellään *yrityksen saavuttaman tuloksen (ennen korkoja ja veroja) ja sijoitetun pääoman suhteena*. Pääoman tuottoasteeseen vaikuttavia tekijöitä kuvataan usein ns. Du Pontin mallin avulla. Pääoman tuottoaste ja pääoman tuottavuus ovat siis eri asioita, vaikka niihin voidaankin vaikuttaa osittain samojen tekijöiden avulla.

Pääoman tuottoasteeseen ja tuottavuuteen voidaan vaikuttaa käynnissäpidon avulla. Tässä yhteydessä käynnissäpito voidaan määritellä kunnossapidon sekä sellaisten käyttökäytöhenkilöstön suorittamien toimenpiteiden kuten puhtaanapidon, puhdistuksien, voitelun, asetuksien, tuotantokoneiden pienten korjauksien, konekohtaisen kunnonvalvonnan ja tuotantokyvyn seurannan muodostamaksi kokonaisuudeksi. Käynnissäpito sisältää siis sekä kunnossapidon että käytön suorittamia tuotantolaitteiston tuotantokykyyn vaikuttavia toimenpiteitä.

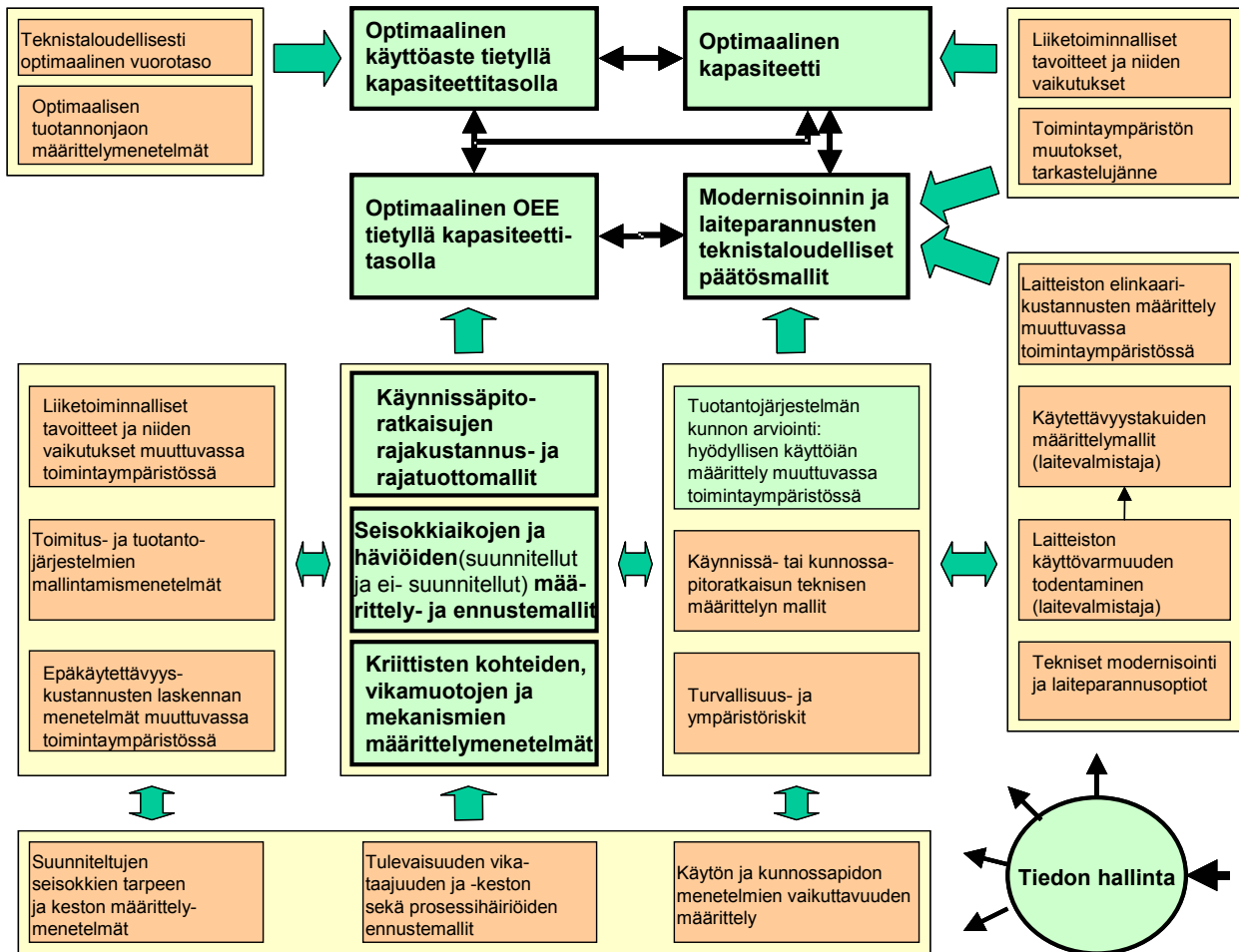
Tehokkaan kunnossapidon vaikutuksia pääoman tuottoasteeseen on kuvattu kaaviokuvain useissa esityksissä. Kuvassa 1 on pelkistetty Du Pontin mallin ja kunnossapidon vaikutuksia kuvaavat esitykset yhdeksi kokonaisuudeksi.



Kuva 1. Käynnissäpidon vaikutus yrityksen pääoman tuottoasteeseen.

Käynnissäpito vaikuttaa suoraan ja tuotannonohjauksen kautta tuotannon kokonaistehokkuuteen (OEE), joka taas on käytettävyyden, toiminta-asteen (nopeuden) ja saannon (laatukertoimen) tulo. Korkea OEE mahdollistaa samalla organisaatiolla ja pääomakanalla suuremman myynnin, mikä taas alentaa tuotettua yksikköä kohti laskettuja valmistuskustannuksia. Toisaalta korkea tuotannon kokonaistehokkuus merkitsee häiriötöntä tuotantoa, josta seuraa taas hyvä toimitusvarmuus sekä varastojen pienentynyt tarve. Hyvä toimitusvarmuus parantaa myyntimahdollisuuksia ja pienet varastot lisäävät pääoman kiertonopeutta. Koska korkea OEE lisää tuotantokapasiteettia, myös investointitarve pienenee. Kohtuulliset käynnissäpidon kustannukset parantavat yrityksen tulosta ja edelleen pääoman tuottoastetta. Pääoman kiertonopeus paranee myös edellä mainittujen tekijöiden avulla, koska sitä voidaan parantaa joko myyntiä lisäämällä tai sidottua pääomalla alentamalla.

Käynnissäpidon vaikutuksia voidaan tarkastella myös käyttöomaisuuden hallinnan näkökulmasta. Näitä vaikutuksia on tarkasteltu käyttöomaisuuden hallinnan ("Asset managementin") roadmapissa, joka valmistui VTT toimesta elokuussa 2004 (Komonen et al. 2004). Tällöin näkökulma on laajempi. Esimerkiksi tuotannon korkean kokonaistehokkuuden lisäksi etsitään optimaalista käyttöastetta ja kapasiteettia. Toisaalta parannuksia laitteiston suorituskykyyn, käytettävyyteen ja laaduntuottokykyyn haetaan myös teknisten parannusten ja modernisointien kautta. Käyttöomaisuuden hallinnan eräs osamalli on havainnollistettu kuvassa 2 (muunnoksin Komonen et al. 2004).



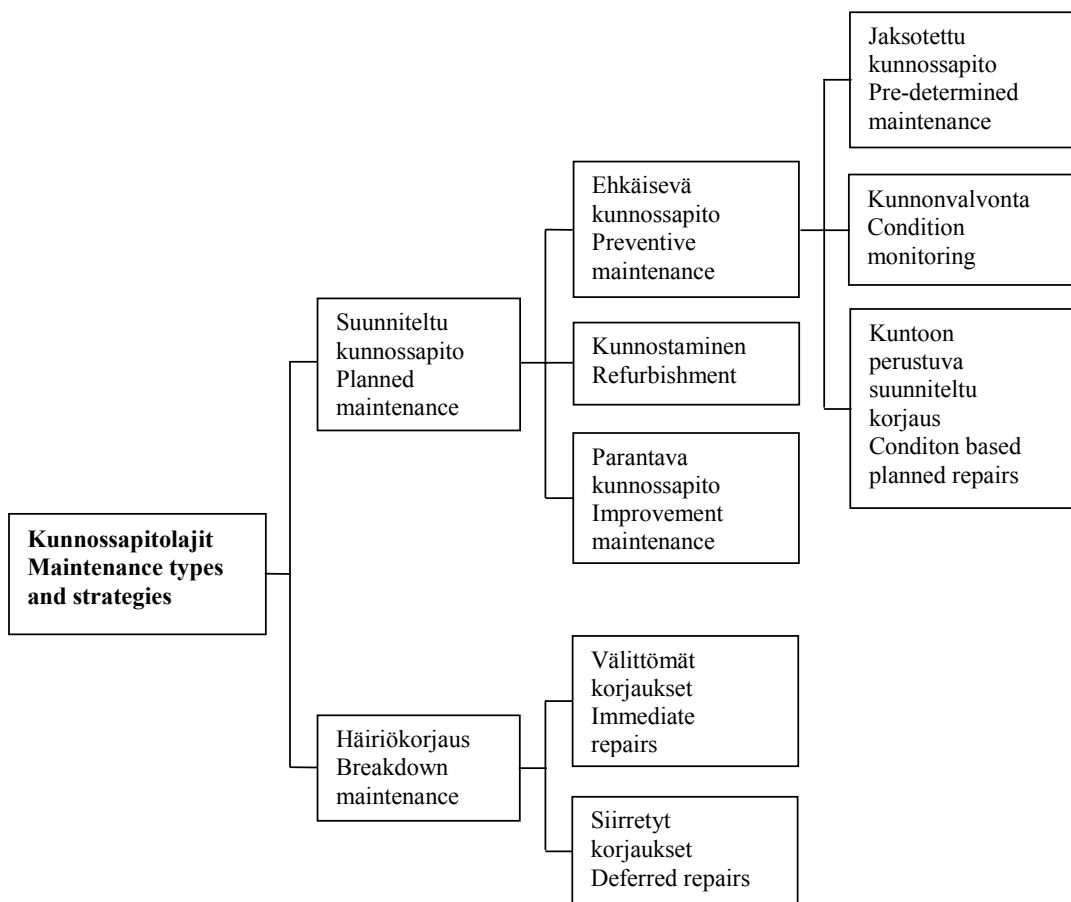
Kuva 2. Käyttöomaisuuden hallinnan näkökulma pääoman tuottavuuden ja tuottoasteen parantamisessa.

Käyttöomaisuuden hallinta ei tarkastele pääoman tuottavuutta poikkileikkauksena vuositason tasolla, vaan pikemminkin LCP:n – elinjaksolaskelmien näkökulmasta. Tällöin elinjaksovoitot määräytyvät laitteiston "markkinaiän" pikemmin kuin teknisen iän perusteella. Kun tarkastelujänne on pidempi kuin vuosi, erilaiset liiketoimintaympäristössä tapahtuvat muutokset alkavat vaikuttaa ja tekevät suunnittelu- ja päätöksentekotilanteesta dynaamisen. Käynnissäpidon tehokkuuteen eivät vaikuta pelkästään käytön toimenpiteet tai kunnossapito erikseen, vaan myös niiden keskinäinen yhteispeli ja koordinaatio.

Kunnossapidon eräänä suunnittelutavoitteena onkin ns. tuotantoikkunoiden hyödyntäminen siten, että kunnossapitoperusteiset seisokkiajat ovat mahdollisimman alhaiset.

3. Käynnissä- ja kunnossapitolajit

Käynnissä- ja kunnossapito voidaan jakaa suunniteltuihin ja suunnittelemattomiin toimenpiteisiin. Suunniteltuja ja ajoitettuja toimenpiteitä ovat ehkäisevät toimenpiteet, komponenttien kunnostaminen työpajassa sekä parantava kunnossapito. Ehkäisevät toimenpiteet ovat taas jaksotettuja tai kuntoon perustuvia. Ehkäiseviä toimenpiteitä voidaan tehdä käynnin aikana tai ne vaativat seisokin. Vaaditun toimenpiteen voi edelleen suorittaa joko käyttö tai kunnossapito. Häiriökorjaukset ovat suunnittelemattomia kunnossapitotoimenpiteitä. Tätä ryhmittelyä on havainnollistettu kuvassa 3.



Kuva 3. Kunnossapitolajit (PSK 2003).

Viimeisten vuosikymmenien aikana teknologinen kehitys on aiheuttanut sen, että laitteiston käytettävyys on oleellisesti parantunut. Tämä parannus on tulosta laitteiston toimintavarmuuden ja käynnissä- tai kunnossapidettävyyden kasvusta. Häiriötasot ovat laskeneet useimmilla toimialoilla, jonka seurauksena laitteiston käytettävyys ja OEE

ovat parantuneet. Myöskin kunnossapidon suhteelliset kustannukset ovat laskeneet (kustannukset/tehtaan jälleenhankinta-arvo tai kustannukset/tuotannon määrä). 1990-luvun lopulle asti häiriöiden määrän ja keston alentamista pidettiin tärkeimpänä tuottavuutta parantavana tekijänä. Viimeisten vuosien aikana yhä tärkeämmäksi tekijäksi on kuitenkin noussut ehkäisevien toimenpiteiden frekvenssin ja keston pienentäminen. Tämä saattaa aiheuttaa sen, ettei suunniteltujen toimenpiteiden osuus kaikista toimenpiteistä, tarvittavista henkilötyötunneista tai kustannuksista välttämättä lisäännä. Suunniteltujen toimenpiteiden tehostuminen nojaa toisaalta todennäköisyyspohjaisiin komponenttien jäljellä olevan eliniän ennustemalleihin ja toisaalta parantuneisiin tarkastus ja kunnonvalvontamenetelmiin.

Tarkastuksiin ja kunnonvalvontaan liittyen on havaittavissa kaksi keskeistä trendiä.

- riskitietoisien tarkastuksen yleistyminen ja
- reaaliaikaisen ja jatkuvan monitoroinnin kehittyminen.

”Riskitietoisien tarkastuksen (Risk Informed In Service Inspection, RI-ISI) menetelmät ovat yleistymässä. Menetelmän avulla kohdistetaan tarkastukset sinne, missä niillä saavutetaan suurin vaikuttavuus. Tavoitteena on samanaikainen vaurioriskien aleneminen ja kustannusten säästö, sillä riskitietoisella lähestymistavalla voidaan optimoida tarkastusohjelmat sekä turvallisuuden että taloudellisten resurssien kannalta. Deterministisesti määriteltyihin tarkastusohjelmiin verrattuna riskitietoisissa tarkastusohjelmissä tarkastettavien kohteiden määrä on yleensä huomattavasti pienempi. Suppeamman tarkastusohjelman ja aiempaa lyhyempien tarkastus- ja huoltoseisokkien johdosta voidaan saavuttaa huomattaviakin taloudellisia säästöjä (Komonen et al. 2004)”.

Kunnonvalvonta on luonteeltaan kunnossapidon operatiivista toimintaa eli kunnossapitotoimenpiteen ajoituksen suunnittelua, mutta samanaikaisesti se on kuitenkin strateginen työkalu ehkäisevälle kunnossapidolle tulevaisuudessa asetettavien tavoitteiden vuoksi. Koska monet yritykset ovat saavuttaneet hyvin alhaisen häiriöseisokkitason, huomio on kiinnitetty suunniteltujen seisokkien tehostamiseen, kuten edellä jo todettiin. Kunnonvalvonnan, diagnostiikan ja prognostiikan laajempi ja laadukkaampi käyttö on yksi tärkeimmistä suunniteltujen seisokkien tehostamisen keinoista. Näin ollen kunnonvalvonnasta tulee myös tärkeä kunnossapitostrateginen työkalu. Kunnonvalvonnan käytön laajentaminen on perusteltavissa investointien tuottolaskelmien avulla. Kuntoon perustuvassa kunnossapidossa, kuten yleensä taloudellisissa ilmiöissä, vallitsee vähenevien rajatuottojen laki. Tämä tarkoittaa sitä, että mitä laajemmin kunnonvalvontaa sovelletaan, sitä tarkempia tuottolaskelmia vaaditaan. Kunnonvalvontainvestointien tuottolaskelmat vaativat tietoa, jota on nykyisin vain harvoin tarjolla. Laskelmien pitää perustua kunnonvalvontamenetelmän tehokkuuden kvantitatiivisiin arvioihin. Kuntoon perustuvan käynnissäpidon tehokkuutta voidaan kuvata kolmen mittarin avulla (Komonen et al. 2004):

1. kuinka monta prosenttia kehittyvistä vioista voidaan havaita ennen vikaantumista (detecting effectiveness); Al-Najjar (2000) käyttää tässä yhteydessä käsitettä ”effectiveness”
2. kuinka tarkasti vikaantumisajankohta voidaan määrittellä (predicting accuracy); Al-Najjar (2000) käyttää tässä yhteydessä käsitettä ”accuracy”
3. kuinka suuri osa vioista voidaan ennustaa niin aikaisin, että ehkäisevät toimenpiteet voidaan suorittaa aidoissa suunnitelluissa seisokeissa ja/tai ns. tuotantoikkunan aikana (scheduling effectiveness).

Kunnonvalvontamenetelmien tehokkuudesta on vain vähän kvantitatiivista empiiristä tietoa. Tällaisen tiedon tuottaminen on tulevaisuuden haasteita.

Tuotantojärjestelmän laajamittainen kunnonarviointi on järkevää ja tarpeellista yritys-kauppojen, laajennus- ja korvausinvestointien, laajojen kausikorjausten tai kunnossapito-ohjelmien revisioiden yhteydessä. Menettely voi olla täysin kattava tai sitten se voi koskea jotain pienempää osakokonaisuutta. Mahdollisia kattavan tuotantojärjestelmän kunnonarvioinnin osa-alueita voivat olla

- laitteiston kokonaiskunnon ja tuottokyvyn arvio
- laitteiston turvallisuus- ja riskianalyysi
- käyttövarmuus- ja luotettavuusanalyysi
- käyttövarmuusvaatimusten allokointi eri laitteille
- käyttö- ja vikatilastojen analysointi
- kriittisten kohteiden tarkempi kunnon arviointi
- kunnossapito- ja käynnissäpitomenetelmien arviointi
- kunnossapidon materiaalitoimintojen arviointi
- käyttövarmuus- ja turvallisuustiedon hallinnan menetelmien ja niiden käytön arviointi
- automaatiojärjestelmien ja niiden käytön arviointi
- automaatiojärjestelmien kunnossapidon arviointi
- automaatiojärjestelmän luotettavuuden arviointi (Komonen et al. 2004).

4. Käynnissäpidon tunnuslukuarvoja 2001–2003

Käynnissäpidon kustannukset ja epäkäytettävyys eivät ole enää alentuneet vuoden 2000 jälkeen. Myöskään eri kunnossapitolajien osuudet eivät ole muuttuneet kovin paljon. Karkea kirvestyö on useissa yrityksissä jo tehty ja tämän jälkeen myönteinen kehitys tunnusluvuissa vaatii tarkkaa analyysia ja toimenpiteiden huolellista suunnittelua. Tässä tilanteessa sekä teknillisen kehityksen että toimintatapojen kehityksen tulee edetä synkronoidusti toisiaan tukien. Teknillisen kehityksen osalta kunnonvalvonnan, diagnostiikan ja prognostiikan sekä määrällinen että laadullinen kehitys on tärkeää.

Taulukon 1 mukaan vuosina 2001–2003 liukuvan keskiarvon perusteella käyntiaste oli noin 69 %. Käyntiasteen nostamismahdollisuuksiin vaikuttavat esimerkiksi tuotteiden kysyntä, pääoman ja työn hintasuhde sekä toimialan pääomavaltaisuus. OEE:n arvo 75 % tarkoittaa sitä, että vain ¾ kapasiteetista saadaan hyödynnettyä. OEE:n kasvu taas parantaa pääoman tuottoastetta. Käytettävyyteen vaikuttaa tulevaisuudessa yhä enemmän, kuten edellä todettiin, ehkäisevien toimenpiteiden frekvenssi ja toteutuksen tehokkuus. Kaikki kunnossapidon tarvitsema aika ei kuitenkaan merkitse menetettyä tuotantoa (liikevaihtoa), vaan osa toimenpiteistä voidaan tehdä tuotannollisten käyttöseisokkien aikana tai ulkoisista syistä johtuvien seisokkien puitteissa (esimerkiksi kysyntäpula). Näin ollen kunnossapidosta aiheutuva liikevaihdon menetys oli keskimäärin vain 2,6 %.

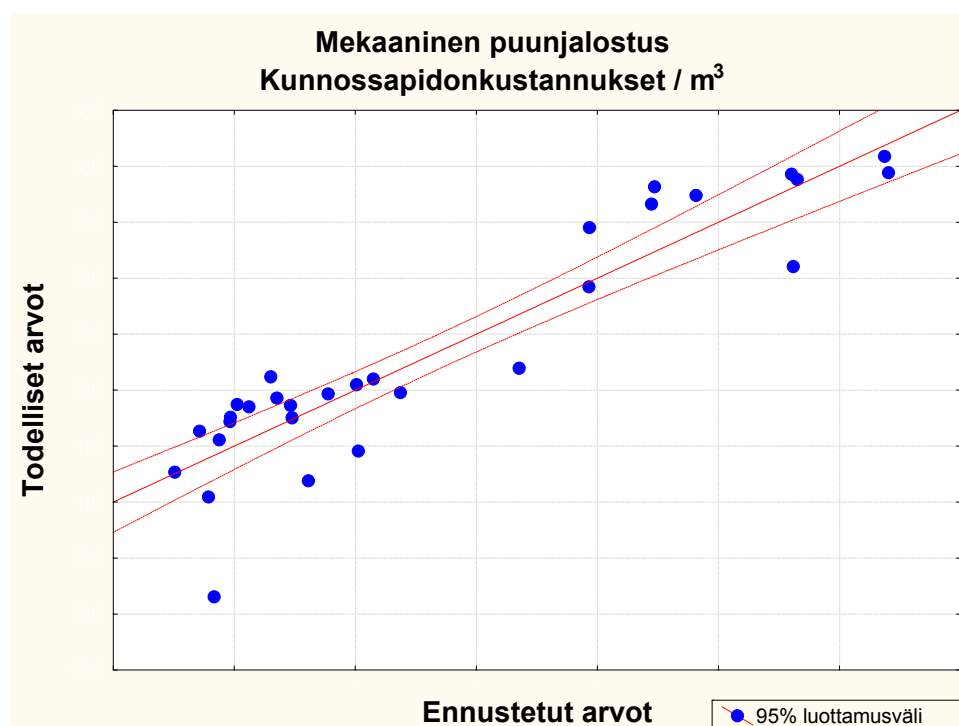
Taulukko 1. Käynnissäpidon tunnuslukuarvoja Suomen tehdasteollisuudessa vuosina 2001–2003 Kunnossapitoyhdistyksen vuosina 2002–2004 suorittaman kyselyn mukaan (Kunnossapitoyhdistys 2004).

Tehdasteollisuus		2001–2003
Käyntiaste	%	69,1
OEE (K*N*L) Tuotantojärjestelmän kokonaistehokkuus	%	74,8
Käytettävyyys	%	90,1
Kunnossapidon takia menetetty tuotanto (% liikevaihdosta)	%	2,6
Kunnossapidon kustannukset / tehtaan liikevaihto	%	4,5
Koneiden kp-kustannukset / koneiden jälleenhankinta-arvo (JHA)	%	4,0
Ehkäisevän kp:n henkilötyötunnit / kunnossapidon henkilötyötunnit	%	36,8
Parantavan kp:n henkilötyötunnit / kunnossapidon henkilötyötunnit	%	15,1
Suunnitellun kunnossapidon tunnit / kunnossapidon henkilötyötunnit	%	64,3
Häiriökorjaushenkilötunnit / kunnossapidon henkilötyötunnit	%	35,6
Mittaavan kunnossapidon osuus henkilötyötunneista	%	5,2

OEE:n ja menetetyn tuotannon lisäksi toinen tärkeä pääoman tuottoasteeseen vaikuttava tekijä on kunnossapidon kustannukset. Kunnossapidon kustannukset olivat tarkastelujaksolla keskimäärin 4,5 % liikevaihdosta ja 4,0 % suhteessa tuotantolaitoksen jälleenhankinta-arvoon. Yhteensä kunnossapidosta aiheutuneet kustannukset suhteessa liikevaihtoon olivat siis 7,1 % liikevaihdosta. Tähän tulisi lisätä vielä käyttötoimintojen aiheuttamat menetykset, jotka useilla toimialoilla ovat suuremmat kuin kunnossapidon kustannukset. Parantavalla kunnossapidolla on erittäin suuri merkitys kunnossapidon kustannustasoon (suurempi kuin ehkäisevällä kunnossapidolla). Parantavan kunnossapidon osuus kunnossapidon työtunneista oli tarkastelujaksolla n.15 %. Valtaosa henkilötyötunneista oli suunniteltuja tunteja, mutta vain 5,2 % prosenttia niistä oli mittaavaa kunnossapitoa. Käynnissäpidon vaikutuksia tuote-, väli- ja raaka-ainevarastoihin ei yrittäjäselvityksillä ole selvitetty samoin kuin käytettävyyden ja kunnossapidon kustannuksia.

5. Olosuhteiden vaikutus

Osa OEE:n ja käynnissäpidon kustannuksiin vaikuttavista tekijöistä on tuotantolaitteiston ja niiden ylläpidon kannalta ulkoisia tekijöitä. Osa näistä tekijöistä ulkoisia vain kunnossapitojohdolle ja osa myös tuotantojohdolle. Toisaalta nämä tekijät saattavat olla edellä mainituille henkilöille ulkoisia vain lyhyellä aikajänteellä. Tällaisia ulkoisia tekijöitä voivat olla teknologia, tuotantolaitoksen koko ja integraatioaste, tehtaan käyttöaste, ulkoiset luonnon olosuhteet jne. Empiirisen aineistosta voidaan määrittää tilastomatemattisten menetelmien avulla kullekin tuotantolaitokselle käytettävyyden tai käynnissäpidon kustannusten odotusarvo, jota voidaan edelleen verrata todelliseen toteutuneeseen arvoon. Kyseistä vertailua on havainnollistettu kuvassa 4.



Kuva 4. Tuotantolaitoksen olosuhteiden vaikutus käynnissäpidon kustannuksiin (aikaisempia vertailuja on esittänyt esimerkiksi Komonen 2002 c).

Kuvassa on esitetty kunnossapidon kustannukset suhteessa tuotettuun kuutiomäärään, jolloin saadut lukuarvot ottavat huomioon sekä laitteiston käytettävyyden että kunnossapidon kustannukset. Diagonaalien alapuolella olevat pisteet edustavat odotusarvoa parempaa tulosta, kun taas sen yläpuolella olevat pisteet edustavat odotusarvoa huonompaa tulosta. Jos piste on luottamusvälin ulkopuolella tulos on hyvin luotettava. Näin ollen se, että tuotantolaitosta kuvaava tunnuslukuarvo eroaa aineiston keskiarvosta, ei anna selkeää informaatiota siitä, onko tehtaan suoritustaso hyvä vai huono.

Esimerkkejä olosuhdetekijöiden yleisimpiä vaikutussuuntia on esitetty alla (esim. Komonen 2002 a):

1. mitä suurempi pääomakanta tai integraatioaste sitä alhaisemmat suhteelliset kustannukset
2. mitä suurempi tuotantomäärä tai käyttöaste samalla pääomakannalla, sitä suuremmat kustannukset suhteessa jälleenhankinta-arvoon ja sitä matalammat kustannukset suhteessa tuotantomäärään
3. mitä kahdennetumpi tuotantoprosessi on sitä alemmat ovat suhteelliset kustannukset.

Käynnissäpitoon ja erityisesti kunnossapitoon kohdistuu siis mittakaavavaikutus. Mittakaavavaikutus voi olla joko teknistä tai organisatorista. Tulevaisuudessa organisatorinen mittakaavavaikutus pienenee kunnonvalvonnan, diagnostiikan ja prognostiikan kautta. Sen sijaan teknisiä mittakaavavaikutuksia niillä ei ole. On uskottavaa, että käynnissäpidon operatiiviset kustannukset tulevat laskemaan tulevaisuudessa lisääntyvän kunnonvalvontaan perustuvan käynnissäpidon kautta.

Taulukko 2. Tuotannon kokonaistehokkuus ja tuotantojärjestelmän käytettävyys eräillä toimialoilla vuonna 2000 (Komonen 2002 b).

	OEE (K*N*L)	Käytettävyys
	%	%
Elintarviketeollisuus	69,6	84,0
Puutavaran- ja tuotteiden valmistus	71,7	89,0
Massa- ja paperiteollisuus	78,3	90,9
Kemian-, muovi- ja kumiteollisuus	81,9	91,3
Perusmetalliteollisuus		93,7
Kone-, metallituote- ja sähköteknillinen teollisuus		87,8
Kone- ja metallituoteteollisuus		91,1

Toimialan tai toimialan jonkin segmentin kilpailun tiukkuus vaikuttaa myös paineisiin kehittää käyttövarmuutta. Usein elinkaarensa stagnaatiovaiheessa olevilla segmenteillä hintakilpailu on kovaa ja katemarginaalit ovat pieniä. Vaikka tuotteiden standardisuus, korkea käyttöaste, prosessimainen tuotantojärjestelmä ja matala katetaso (%) lisäävät painetta käyttövarmuuden parantamiseen, se ei tarkoita sitä, ettei muissa liiketoimintaympäristöissä käyttövarmuuden parantamiseen olisi tarvetta eikä siitä olisi liiketaloudellista hyötyä (Komonen 2002 b). Toimialakohtaiset tunnuslukuarvot on esitetty taulukossa 2.

Yleisesti ottaen olosuhdetekijöiden vaikutus on huomattava ja toisaalta tätä vaikutusta on lyhyellä aikajänteellä vaikea eliminoida. Olosuhdetekijöiden lisäksi käynnissäpidon kustannuksiin vaikuttaa oleellisesti käytössä oleva laskentajärjestelmä.

6. Yhteenveto

Suomen tehdasteollisuudella on tarve nostaa pääoman kiertonopeutta, mikäli pääoman-tuottoasteelle ja tulokselle asetetut tavoitteet aiotaan saavuttaa. Käynnissäpidolla ja kunnossapidolla on merkittävä vaikutus pääoman kiertonopeuteen ja tuottoasteeseen. Erityisesti tämä vaikutus tulee näkyviin silloin kun tuotannon kokonaistehokkuutta nostamalla voidaan välttää laajennusinvestoinnit. Tulevaisuudessa merkittävä haaste onkin ehkäisevän kunnossapidon vaatimien suunniteltujen seisokkien tehostaminen ja turhan kunnossapitotyön välttäminen. Kunnonvalvonta, diagnostiikka ja prognostiikka ovat tämän kehittämistyön merkittävimpiä välineitä.

Lähteet

Al-NAjjar, B. 2000. Impact of real time measurements of operating conditions on effectiveness and accuracy of vibration based maintenance policies: A case study in aper mills. A case study, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 6, No. 4, s. 275–286.

Idhammar, C. 1983. *A Cost Effective Maintenance, The Forgotten Profit*. Koulutusmateriaali. Helsinki 2/1983.

Junka, T. 2003. VATT Tutkimuksia 95. Maailman kilpailukykyisin maa? Tuottavuus ja investoinnit Suomessa 1975–2000.

Komonen, K., Räikkönen, M., Laakso, K., Rosqvist, T., Rissanen, T., Auvinen, O., Riihimäki, M., Solin, J., Kortelainen, H., Hämäläinen, J. & Jalonen, M. 2004. *Asset Management – Roadmap*. Espoo, VTT. BTUO43-041272. 112 s.

Komonen, K. 2002 a. A cost model of industrial maintenance for profitability analysis and benchmarking. *International Journal of Production Economics*, 79 (2002), s. 15–31.

Komonen, K. 2002 b. *Käyttövarmuustakuut*. Espoo, VTT. BVAL73-021194. 42 s.

Komonen, K. 2002 c. Views on performance indicators and benchmarking in industrial maintenance. *Maintenance* 5, s. 52–56.

Komonen K. 2004. *Kunnossapidon tunnuslukuja. Vuotta 2003 koskevan kyselyn tuloksia*. Rajamäki. Kunnossapitoyhdistys ry. Toimitettu julkaistavaksi.

Kunnossapito Suomessa 2004. Kalvosarja. [viitattu 26.11.2004]. Saatavissa:
<http://www.kunnossapito.fi/tataon/index.html>

Kärri T. 2000. Perusteellisuus muuttuvassa toimintaympäristössä 2000–2030: Malli investointitarpeelle. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Tutkimusraportti 121. 49 s.

Metsäteollisuus ry. [viitattu 2.8.2004].
<http://www.forestindustries.fi/talous/merkitys/metsaklusteri.html>

PSK 6201. 2003. Maintenance. Terms and Definitions. Helsinki. PSK Standardisation. 30 s.

Käyttövarmuusmallit

Helena Kortelainen
VTT Tuotteet ja tuotanto
Tampere

Tiivistelmä

Tuotantolinjojen, koneiden ja laitteiden käyttövarmuus on merkittävä kilpailutekijä niin tuotantolaitokselle kuin kone- ja järjestelmätoimittajillekin. Käyttövarmuusmalli kokoaa yhteen tarkasteltavan järjestelmän käytettävyyteen vaikuttavat tekijät ja sitoo järjestelmän yhdeksi kokonaisuudeksi. Käyttövarmuusmallin avulla voidaan paikantaa merkittävimmät käytettävyyttä heikentävät kohteet ja vertailla vaihtoehtoisia parannusratkaisuja. Mallien avulla resurssit voidaan kohdentaa tehokkaasti sekä järjestelmän suunnittelu- että käyttövaiheessa.

1. Johdanto

Valmistavassa teollisuudessa tuotantolinjojen, koneiden ja laitteiden korkea käyttövarmuus on merkittävä tekijä pyrittäessä ylläpitämään ja parantamaan laitosten tuottavuutta. Korkea käyttövarmuus merkitsee turvallista ja häiriötöntä tuotantoa, alhaisia korjaavan kunnossapidon kustannuksia ja vähäistä laatuhävikkiä sekä hyvää toimitusvarmuutta. Asiakkaan tarpeen mukaan optimoitu ja todennettavissa oleva käyttövarmuus on kilpailutekijä myös teollisuuden kone- ja laite-toimittajille. Joillakin teollisuuden aloilla laite-toimittajalta edellytetään luotettavuuden ja turvallisuuden todentamista esimerkiksi RAMS¹-spesifikaation avulla, tai käyttövarmuustakuuta suorituskykyyn liittyvien takuiden lisäksi.

Käyttövarmuudella tarkoitetaan SFS-IEC-standardin 50(191) mukaan kohteen kykyä suorittaa vaadittua toimintoa, kun ulkoiset edellytykset toiminnon suorittamiseen ovat olemassa. Käyttövarma laite tai laitos toimii siis halutulla tavalla aina tarvittaessa. Laitoksen käyttövarmuuteen vaikuttaa käytössä olevien, usein eri-ikäisten koneiden ja laitteiden toimintavarmuuden ja kunnossapidettävyyden lisäksi kunnossapitovarmuus ts. laitoksen kunnossapito-organisaation kyky palauttaa vikaantunut laite toimintakuntoon. Laajan tuotantojärjestelmän toiminnan häiriöttömyyteen vaikuttaa myös mm. järjestelmän rakenne ja järjestelmän eri osien välillä olevat välivarastot.

¹ RAMS, Reliability, Availability, Maintainability, Safety = toimintavarmuus, käytettävyyys, kunnossapidettävyyys ja turvallisuus

Käyttövarmuuden analysointia varten kohde – tuotantolinja tai sen osa – on mallinnettava. Käyttövarmuusmallin avulla laajaakin järjestelmää voidaan tarkastella yhtenä kokonaisuutena. Mallinnusmenetelmiä on lukuisia. Käyttövarmuusmalli voi olla luonteeltaan kvalitatiivinen tai kvantitatiivinen, jolloin sen avulla voidaan laskea järjestelmän käytettävyys edellyttäen, että tarvittava data on saatavilla. Käyttövarmuusmallin avulla voidaan vertailla esimerkiksi vaihtoehtoisten investointivaihtoehtojen tai kunnossapidon muutosten vaikutusta järjestelmän käytettävyyteen ja siten kohdistaa rajalliset resurssit mahdollisimman tehokkaasti. Laitos- ja laitesuunnittelussa malli tarjoaa keinon vertailla nopeasti eri laite- ja järjestelmäratkaisujen vaikutusta tuotantolaitoksen käytettävyyteen.

2. Käyttövarmuus ja käytettävyys

Käytettävyys (Availability performance) on käyttövarmuuden mittari ja se kuvaa kohteen kykyä suoriutua tehtävästään ilman vika-aikaa tai tuotantokatkoksia (SFS-IEC 50(191)). Käytettävyys voidaan laskea eri hierarkiatasoilla laitteille, osajärjestelmille tai koko tuotantolinjalle. Käytettävyys määritellään toteutuneen ja suunnitellun käyttöajan suhteena:

$$A = \frac{\text{toteutunut_käyttöaika}}{\text{suunniteltu_käyttöaika}} \quad (1)$$

Tuotanto- ja käyttöajan menetystä aiheuttavat teknisten järjestelmien viat. *Vika* ymmärretään usein kohteen täydellisenä toimimattomuutena, mutta standardin SFS-IEC 50(191) määritelmän mukainen kohteen vaadittu toiminto sisältää myös laadulliset ja määrälliset vaatimukset. Kohde on vikaantunut, jos mitattu laatua tai määrää kuvaava suure ei ole sallitun poikkeaman rajoissa. Ennakoivia huoltotöitä ja suunniteltuja seisokkeja ei lueta vioiksi, mutta em. standardin mukaan myös *ehkäisevä kunnossapito* alentaa käytettävyyttä.

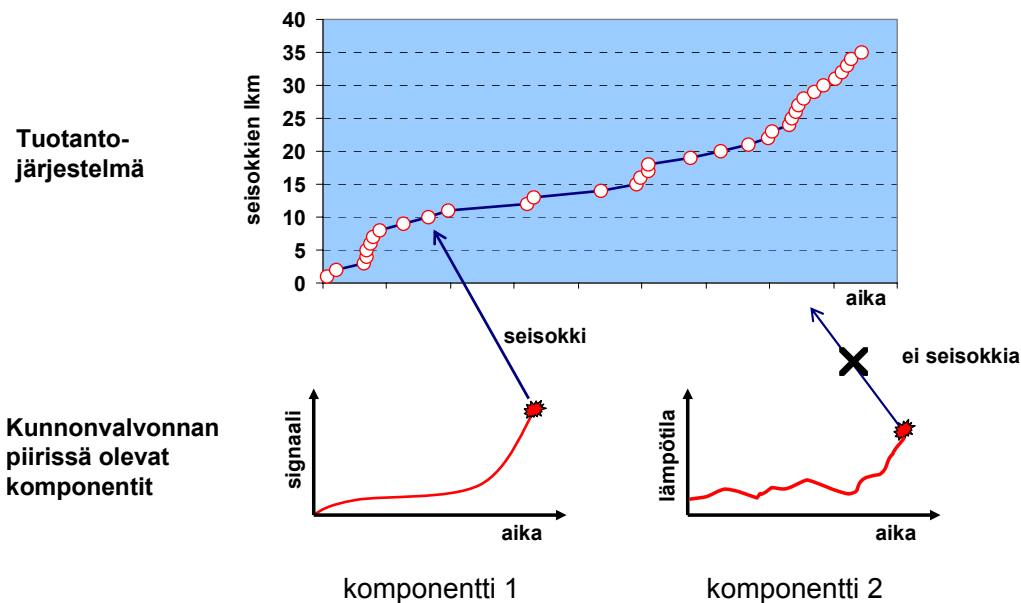
Prosessiteollisuudessa erilaisten *prosessihäiriöiden* osuus tuotantoajan menetyksestä voi olla huomattava. Häiriön varsinainen aiheuttaja ei aina ole yksiselitteisesti määritettävissä. Laitteen toiminnan keskeytyminen esimerkiksi tukkeutumisen tai likaantumisen vuoksi voi johtua prosessiolosuhteista, mutta se voi johtua myös huonosta suunnittelusta, kunnossapidon laiminlyömisestä, pinnan kulumisesta tai sakeusmittarin vikaantumisesta.

Suunniteltua tuotantoaikaa määrättäessä huomioidaan useilla aloilla sopimustekniset ja lakisääteiset ajanjaksot, jolloin työvoima ei ole käytettävissä. Myös suunnitellut vuosisoisokit tai vastaavat voidaan ottaa huomioon. Toisaalta, tuotantolaitokseen sitoutunut pääoma aiheuttaa kustannuksia riippumatta laitoksen toiminnasta. Järviön (1997) mukaan kustannusperusteisesti ajateltuna käytettävyyden vertailuajan pitäisikin olla pelkkä kalenteriaika.

Luotettavuusalan standardeissa esitettyjä lukuisia käytettävyyden määritelmiä ei voida aina sellaisenaan käyttää, vaan valittavat mittarit on sovellettava teollisuudenalan ominaispiirteitä vastaaviksi. Prosessiteollisuuden käytettävyyden mittareissa on otettava kantaa erityisesti prosessihäiriöistä ja tuotannon seisokeista johtuviin keskeytyksiin. Käytettävyyden mittareita ja laskentaa on yksityiskohtaisemmin tarkastellut mm. Kortelainen (1999).

3. Käyttövarmuusmallit

Käyttövarmuuden analysointia varten kohde – yksittäinen laite, tuotantolinja tai sen osa – on mallinnettava. Yksittäisen laitevian vaikutus tuotantoon riippuu laitteen kriittisyydestä tuotannon jatkuvuuden suhteen sekä mm. järjestelmän rakenteesta ja säiliö-/varastokapasiteetista.

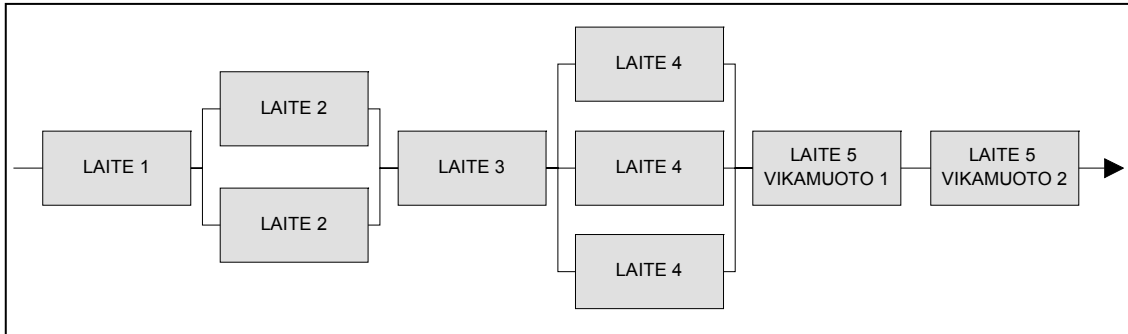


Kuva 1. Esimerkki tuotantojärjestelmän seisokkien kertymäkuvaajasta.

Käyttövarmuusmallin avulla voidaan tarkastella yksittäisen toiminnon merkitystä koko järjestelmän toiminnan kannalta. Käyttövarmuusmallit voivat olla luonteeltaan kvalitatiivisia tai kvantitatiivisia, jolloin niihin yhdistetään käytettävyyden laskentaa. Tuotantojärjestelmän käyttövarmuusmallin laatimiseen liittyvistä ongelmista tärkein on osajärjestelmien luotettavuustekninen kytkentä toisiinsa. Yksinkertaisesta, peräkkäisistä vaiheista koostuvasta järjestelmästä poiketen mallinnuksessa saatetaan joutua huomioimaan haarautuvat ja puskuroituvat virtaukset. Mallin käyttökelpoisuuden kannalta keskeinen tekijä on saada malli vastaamaan todellista järjestelmää, jolloin mallin avulla saatavat tulokset ovat luotettavia ja helposti kohdennettavissa.

3.1 Luotettavuuslohkokaavio

Luotettavuus (RBD)²- ja käyttövarmuuslohkokaavio(ABD)³ avulla tutkitaan järjestelmän toiminnallisten kokonaisuuksien vaikutusta järjestelmän käyttövarmuuteen. Lohkokaaviomallissa yksi lohko edustaa osajärjestelmää, komponenttia, vikamuotoa tai toimintoa. Lohkoista rakennetaan järjestelmän malli halutulla tarkkuudella käyttämällä sarja- ja rinnakkaisrakenteita. Luotettavuus- ja käyttövarmuuslohkokaavio on tarkoitettu järjestelmän käytettävyyden laskennan pohjaksi.



Kuva 2. Esimerkki osatoiminnon luotettavuusteknisestä rakenteesta (Pursio 1999).

Luotettavuus- ja käyttövarmuuslohkokaavio kuvaa järjestelmän luotettavuusteknisenä rakenteena. Rakenne koostuu sarjaan ja rinnan kytketyistä lohkoista, joihin sisältyy järjestelmän käytettävyydestä. Jokainen lohko edustaa yhtä osajärjestelmää, jolla on tietty käytettävyys A . Laskentaa varten tarvitaan vähintään kunkin lohkon keskimääräinen vikaantumis- ja toipumisaika.

Sarjarakenteisen järjestelmän käytettävyys lasketaan osajärjestelmien käytettävyyksien tulona.

$$A = A_1 A_2 \dots A_n$$

Rinnakkaisrakenteisessa järjestelmässä yksi osajärjestelmästä riittää pitämään järjestelmän toiminnassa. Rinnakkaisrakenteen käytettävyyden laskennassa määritetään ensin osajärjestelmien epäkäytettävyyksien tulo. Käytettävyys saadaan järjestelmän epäkäytettävyyden komplementtina.

$$A = 1 - (1 - A_1)(1 - A_2) \dots (1 - A_n)$$

² RBD Reliability Block Diagram

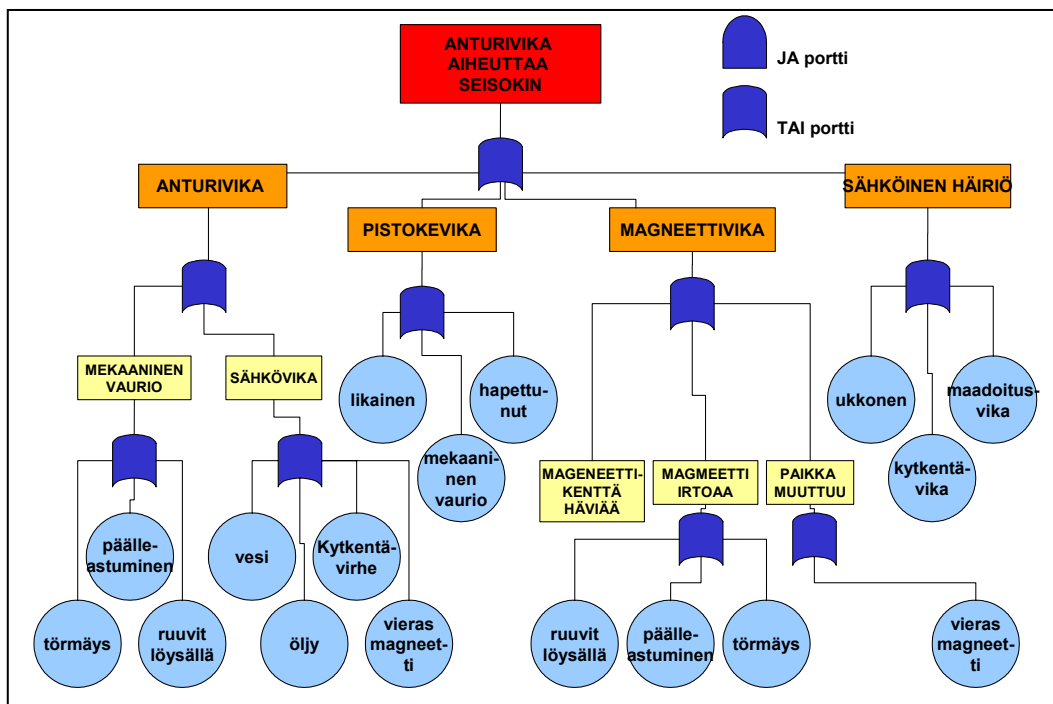
³ ABD Availability Block Diagram

Rinnakkaisrakenteen käytettävyys on suurempi kuin yksittäisen osajärjestelmän käytettävyys. Sarjarakenteessa tilanne on päinvastainen. Monimutkainen järjestelmä sisältää yleensä sekä sarja- että rinnakkaisrakenteita, joten järjestelmä täytyy jakaa laskentaa varten pienempiin kokonaisuuksiin.

3.2 Vikapuu

Vikapuuta käyttämällä selvitetään TOP- eli huipputapahtuman todennäköisyys sen aiheuttavien perustapahtumien todennäköisyyksien avulla. Vikapuu voi olla myös kvalitatiivinen kuvaus, jonka avulla havainnollistetaan syyn ja seurauksen suhteita eri järjestelmätasoilla. Järjestelmän heikoimmat kohdat ja muuten huomaamatta jäävät vikayhdistelmät tulevat ilmi. Vikapuu on käyttökelpoinen vaihtoehto lohkokaaviolle varsinkin, jos kaavio on vaikea konstruoida.

Vikapuumallin rakentamisen edellytyksenä on, että järjestelmän toiminta ja käyttäytyminen eri olosuhteissa tunnetaan hyvin. Tärkeimmille järjestelmävioille (TOP-tapahtuma) laaditaan oma vikapuunsa. Vikaan johtavat ensisijaiset syyt selvitetään ja näille haetaan osasyitä halutulle perustapahtumatasolle asti. Tarvittava tieto voidaan kerätä esim. vika- ja vaikutusanalyysin avulla.



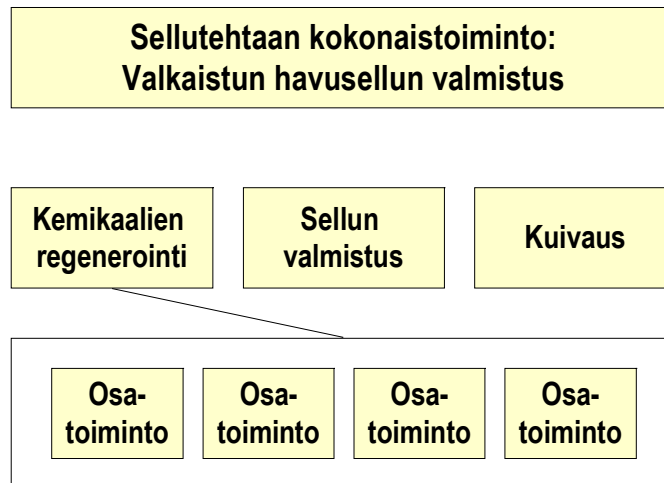
Kuva 3. Erään anturin vikapuuanalyysi (Lannes 1999).

Lohkokaavion sarjarakenne korvataan vikaapuussa TAI-portilla ja rinnakkaisrakenne JA-portilla. TAI-portissa mikä tahansa porttiin liittyvistä lohkoista riittää kohteen vikaantumiseen. Kaikkien JA-porttiin liittyvien lohkojen on vikaannuttava kohteen vikaantuessa.

3.3 Tuotantolinjan toiminnallinen kuvaus

Tuotantolaitoksella, kuten yleisesti ihmisen suunnittelemissa ja rakentamissa järjestelmissä, on jokin toiminnan perustavoite, jonka toteuttamiseksi järjestelmä on suunniteltu. Tuotantolaitoksen toiminnan tavoite on tuotteen valmistaminen. Laitoksen toiminta voidaan mallintaa toisiinsa kytkettyjen tietyn tavoitteen saavuttamista varten suunniteltujen kokonaisuuksien yhdistelmänä. Toiminnot yhdistävät laitteet, ohjelmistot, työprosessit, työorganisaation ja muut laitoksen osat toisiinsa. Toiminnallisen mallintamisen vahvuutena voidaan pitää sen soveltuvuutta monimutkaisten teollisuusprosessien mallintamiseen. Tunnetuimpia toiminnallisen kuvauksen menetelmiä ovat SADT⁴ ja sen sovelluksena syntynyt IDEF⁵.

Tyypillistä on tuotettujen kuvausten hierarkkisuus, josta osa esimerkkinä sellutehtaan toiminnallisesta kuvauksesta (kuva 4). Päätoiminto tai -tavoite hajotetaan osatoimintoihin (-tavoitteisiin) ja edelleen tarvittaessa aina komponentteihin saakka, jotta toimintoihin vaikuttavat tekijät ja mahdollisesti niiden välillä olevat riippuvuudet saadaan selville. Pienten ja yksinkertaisten kohteiden tapauksessa toiminnallinen kuvaus saattaa yhtyä kohteen fyysiseen rakenteeseen.

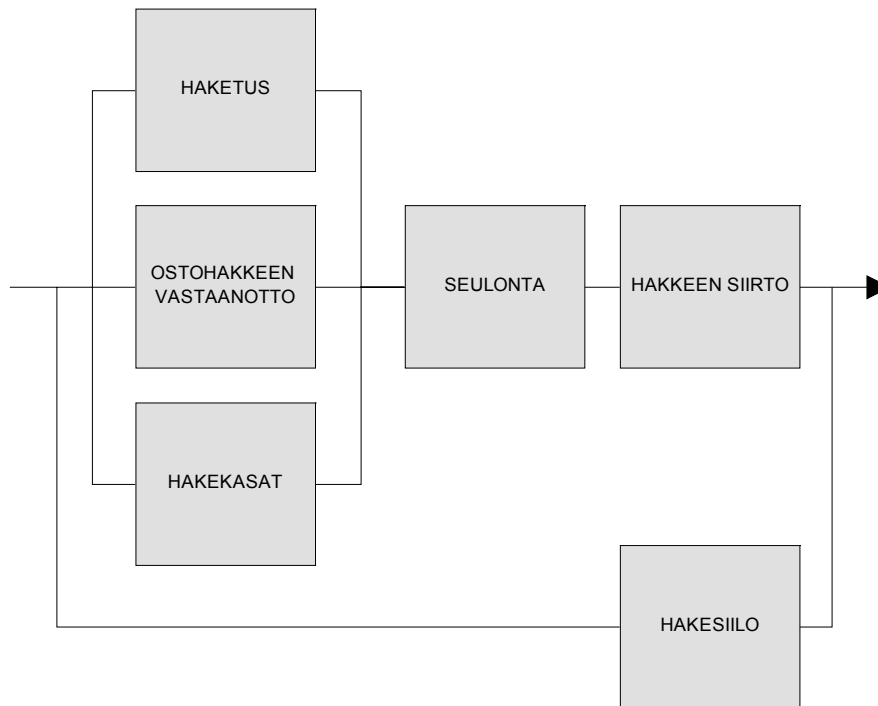


Kuva 4. Hierarkkisen toiminnallisen kuvauksen lohkokaavion muodostuminen: sellutehtaan kokonaistoiminto ja kolme päätoimintoa (Pursio et al. 1999).

⁴ SADT Structured Analysis and Design Technique

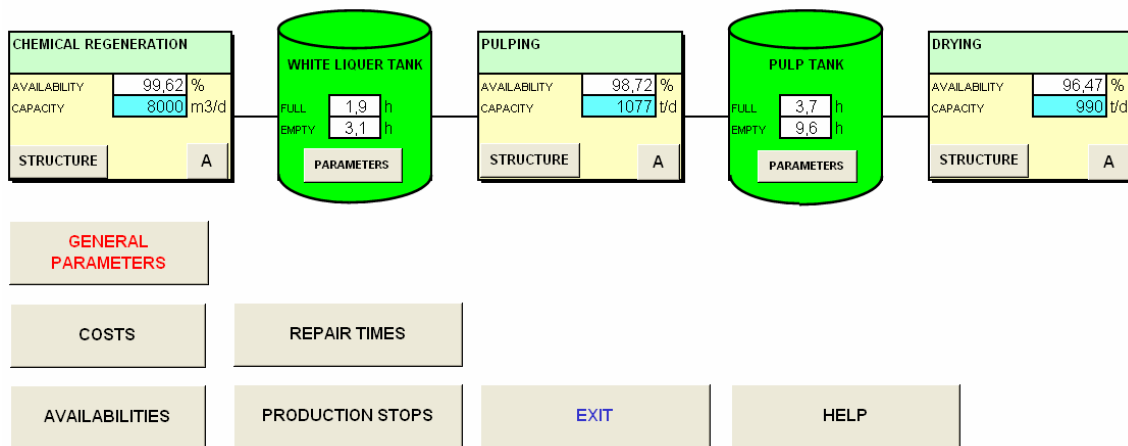
⁵ IDEF Integration DEFinition language

Kvantitatiivisen käyttövarmuusmallin keskeinen osa on tarkasteltavan kohteen luotettavuusteknisen rakenteen malli, johon käytettävyyden laskenta perustuu. Luotettavuustekninen rakenne poikkeaa virtauskaavion rakenteesta erityisesti säiliöiden ja varastointikapasiteetin esittämisen osalta. Luotettavuusteknisesti katsottuna säiliö (tai varasto) on kytketty rinnan vastaavan prosessin osan kanssa, jolloin säiliö (tai varasto) parantaa kyseisen tuotantojärjestelmän osan käyttövarmuutta. Välivarastoinnin mallinnusta havainnollistaa sellutehtaan raaka-aineen käsittelyn kuvaus (kuva 5).



Kuva 5. Raaka-aineen käsittelyn luotettavuustekninen rakenne, jossa hakkeen varastointi on huomioitu (Pursio 1999).

Toiminnallisen kuvauksen periaatteilla muodostettuun käyttövarmuusmalliin kerätään tietoa, joka tukee käyttövarmuuden laskentaa vastaavalla tavalla kuin luotettavuuslohkokaavio- tai vikapuumalleihinkin. Laskenta voidaan toteuttaa esimerkiksi simulointiohjelmistolla, joita on kaupallisesti saatavilla, tai taulukkolaskentaohjelmistolla. Esimerkkinä taulukkolaskentaohjelmiston soveltamisesta sellutehtaan käyttövarmuusmalli, joka toteutettiin Käyttövarmuus kilpailutekijänä teknologiaohjelman tutkimushankkeessa (Pursio 1999, Pursio et al. 1999).



Kuva 6. Käyttövarmuusmallin MExcel-sovellus (Kortelainen & Pursio 2001).

Käyttövarmuusmallien edellyttämä vikaantumisia, tuotantohäiriöitä, korjausaikoja ja seisokkeja koskevaa tietoa saadaan laitosten tiedonhallintajärjestelmistä. Usein kirjatut tiedot ovat kuitenkin puutteellisia ja niitä joudutaan täydentämään asiantuntija-arvioin. Prosessiteollisuudessa säiliöiden merkitys puskurina eri osastojen välillä on merkittävä, josta syystä ne on huomioitava myös koko tuotantojärjestelmää koskevassa käyttövarmuusmallissa. Säiliöiden vaikutuksen huomioimiseksi vaadittavat tiedot saadaan yleensä automaatiojärjestelmistä.

4. Esimerkkejä käyttövarmuusmallien hyödyntämisestä

Käyttövarmuusmalli kokoaa yhteen tarkasteltavan järjestelmän käytettävyyteen vaikuttavat tekijät. Luotettavuustekninen rakenne sitoo järjestelmän yhdeksi kokonaisuudeksi. Osajärjestelmien käytettävyyksiä vertailemalla paikannetaan käytettävyyttä eniten huonontavat kohteet ja mahdolliset parannukset voidaan kohdentaa oikein. Varsinkin suunnitteluvaiheessa on erittäin hyödyllistä vertailla muutosten vaikutuksia järjestelmän kokonaistoiminnon kannalta.

Käyttövarmuusmalli voi perustua tarkasteltavan järjestelmän toiminnan simulointiin, jolloin malli saadaan vastaamaan paremmin järjestelmän todellista toimintaa. Simuloinnissa pystytään huomioimaan vikaantumisvälin ja toipumisaikojen taustalla olevat tilastolliset jakaumat, joiden määrittämissä puitteissa yksittäiset vikaantumis- ja toipumisaikat vaihtelevat. Myös säiliöiden pinnankorkeus voidaan määrittellä satunnaismuuttujaksi, joka vaihtelee tietyn jakauman puitteissa.

4.1 Laite- ja laitossuunnittelu

Teknisesti nopeasti kehittyvien koneiden ja laitteiden käyttövarmuutta ei voida suunnitteluvaiheessa tarkastella pelkästään käytössä olevan konekannan käyttökokemustietoja analysoimalla. Tuotteisiin kehitetään jatkuvasti suorituskykyvaatimusten noustessa uusia teknisiä ratkaisuja, joiden luotettavuuden arviointiin ei löydy referenssejä olemassa olevista tuotteista. Uuden laitteen tai toiminnon tuotekehitysprosessin aikana on kuitenkin mahdollista ennustaa ja parantaa kohteen käyttövarmuutta, jos systemaattinen käyttövarmuus- tai luotettavuusanalyysi liitetään suunnittelukatselmuksen osaksi (Lannes 1999). Käyttövarmuusmallin ja sen perustana olevien tarkastelujen avulla voidaan myös huomioida käyttövarmuuden kannalta tärkeät seikat oikealla tavalla asennus-, käyttö- ja kunnossapito-ohjeissa.

Laitossuunnittelun tärkeä osa on laitevalintojen tekeminen. Joillakin teollisuuden aloilla laitetoimittajalta edellytetään luotettavuuden ja turvallisuuden todentamista esimerkiksi RAMS⁶-spesifikaation avulla. Toiminnalliseen kuvaukseen perustuva käyttövarmuusmalli soveltuu hyvin laitteistovaihtoehtojen arviointiin, koska toiminnallinen kuvaus ei käsittele tietyn toiminnon toteuttavan järjestelmän yksityiskohtia ja erilaiset laitteistot voidaan kuvata samana toimintona. Käyttövarmuusmallin avulla voidaan tarkastella myös vaihtoehtoisten laiteratkaisujen kunnossapitoon liittyvien vaatimusten vaikutusta järjestelmän käytettävyyteen.

Prosessivaiheiden välisillä säiliöillä on huomattava merkitys laitoksen käyttövarmuuteen. Kun sellutehtaan säiliökapasiteettia ei huomioitu laitoksen käytettävyyden laskennassa, oli laskettu käytettävyys lähes 20 prosenttiyksikköä mitattua arvoa pienempi (taulukko 1). Toisaalta suuri välisäiliökapasiteetti hidastaa lajinvaihtoja ja aiheuttaa kustannuksia. Valinnassa joudutaan huomioimaan useita, keskenään ristiriitaisia tekijöitä, ja mallintaminen on ainoa keino eri vaihtoehtojen arviointiin ja optimointiin.

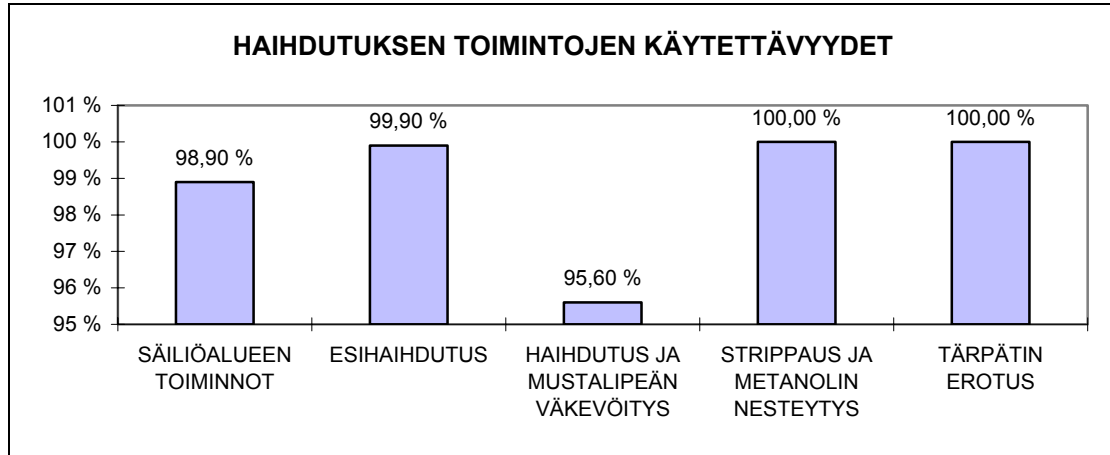
Taulukko 1. Säiliökapasiteetin vaikutus laitoksen käyttövarmuuteen sellutehtaalla (Kortelainen & Pursio 2001).

	<i>Sellun tuotannon käyttövarmuus, %</i>
<i>Sellutehdas, ei säiliökapasiteettia</i>	76
<i>Sellutehdas, nykyinen säiliökapasiteetti</i>	93
<i>Sellutehdas, rajoittamaton säiliökapasiteetti</i>	95

⁶ RAMS, Reliability, Availability, Maintainability, Safety = toimintavarmuus, käytettävyys, kunnossapidettävyys ja turvallisuus

4.2 Kunnossapidon ja investointien suunnittelu

Käyttövarmuusmallin avulla tarkastellaan eri osatekijöiden vaikutusta tuotantolinjan käytettävyyteen, jolloin käytettävyyden kannalta kriittiset osatekijät voidaan paikantaa.



Kuva 7. Sellutehtaan käyttövarmuusmalli – käytettävyyden kannalta ongelmallisten kohteiden tunnistaminen (Pursio 1999).

Käyttövarmuusmallin pohjana olevien vikatietojen perusteella epäkäytettävyyden varsinainen aiheuttaja voidaan tunnistaa. Kuvassa 7 esitetyssä tapauksessa merkittävimäksi epäkäytettävyyden aiheuttajaksi osoittautuivat haihduttamon laippavuodot. Parannukset voidaan kohdistaa tehokkaasti, kun epäkäytettävyyden syy on rajattu mahdollisimman tarkasti. Käyttövarmuusmallin avulla voidaan laskea vaihtoehtoisten parannustoimenpiteiden vaikutus osajärjestelmän ja koko tuotantolinjan käyttövarmuuteen. Tämä antaa hyvän pohjan myös parannus- ja korjausinvestointien kannattavuuden arvioinnille.

Taulukko 2. Modernisointi- ja korjausinvestointien vaikutus käyttövarmuuteen – esimerkkejä (Kortelainen & Pursio 2001).

	<i>Järjestelmän käyttövarmuus, %</i>
<i>Kartonkikone: vanhentunut sähköjärjestelmä korvataan uudella</i>	+0,3 %-yksikköä
<i>Paperikone: siirtyminen naruttomaan päänvientiin</i>	+ 0,7 %-yksikköä

5. Yhteenveto

Käyttövarmuusmallit ovat tärkeä ja toistaiseksi liian vähän hyödynnetty työkalu monimutkaisten ja laajojen järjestelmien käyttövarmuuden analysoimisessa. Koneen, järjestelmän tai tuotantolaitoksen elinkaaren eri vaiheisiin soveltuvia menetelmiä ja ohjelmistoja on myös kaupallisesti saatavilla. Kvantitatiivisten mallintamismenetelmien hyödyntämisen esteenä on usein käytettävissä olevan käyttövarmuustiedon puute. Asiantuntija-arviot ovat usein tärkein tiedon lähde.

Käyttövarmuusmalli kokoaa yhteen tarkasteltavan järjestelmän käytettävyyteen vaikuttavat tekijät. Laajojen järjestelmien käyttövarmuusmallit toteutetaan hierarkkisesti järjestelmän kokonaistoiminnosta lähtien. Luotettavuustekninen rakenne sitoo järjestelmän yhdeksi kokonaisuudeksi, jota käsitellään laskennan kannalta tasavertaisesti. Osajärjestelmien käytettävyyksiä vertailemalla paikannetaan käytettävyyttä eniten huonontavat kohteet ja mahdolliset parannukset voidaan kohdentaa oikein. Käyttövarmuusmallin avulla voidaan laskea vaihtoehtoisten ratkaisujen vaikutus osajärjestelmän ja koko tuotantojärjestelmän käyttövarmuuteen. Tämä antaa hyvän pohjan sekä käyvän laitoksen parannus- ja korjausinvestointien kannattavuuden arvioinnille että suunnitteluvaiheen päätöksentekoon.

Lähteet

SFS-IEC 50(191) 1996. Sähkötekniillinen sanasto. Suomen standardisoimisliitto. 143 s.

Järviö, J. 1997. TPM – Tuottava Kunnossapito. Kunnossapito (5), s. 42–46.

Kortelainen, H. 1999. Käyttövarmuuden mittarit. Tampere. VTT, RISB005. 22 s.

Pursio, S. 1999. Tuotantolinjan käyttövarmuusmalli. Diplomityö. Tampere. 85 s.

Lannes, P. 1999. Käyttövarmuus paperikoneen kiinnirullaimen tuotekehityksessä. Teoksessa: Käyttövarmuus ja käyttökunnon hallinta. Espoo 18.11.1999. Holmberg, K. (ed.). VTT Symposium 196. Espoo, VTT. S. 65–74. ISBN 951-38-5272-5. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/symposiums/1999/S196.pdf>

Pursio, S., Kortelainen, H. & Horttanainen, J. 1999. Sellutehtaan käyttövarmuusmalli. Teoksessa: Käyttövarmuus ja käyttökunnon hallinta. Espoo 18.11.1999. Holmberg, K. (ed.). VTT Symposium 196. Espoo, VTT. S. 7–19. ISBN 951-38-5272-5. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/symposiums/1999/S196.pdf>

Kortelainen, H. & Pursio, S. 2001. Availability performance stands for plant efficiency. Paperi ja Puu – Paper and Timber, Vol. 83, No. 4, s. 292–296.

Taajuusvastefunktioiden hyödyntäminen kunnonvalvonnassa

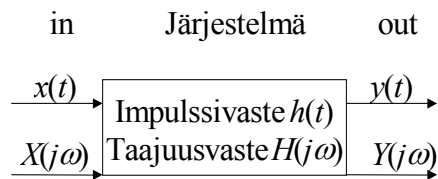
Ville Järvinen & Juha Miettinen
Tampereen teknillinen yliopisto, Konedynamiikan laboratorio
Tampere

Tiivistelmä

Tässä paperissa käsitellään taajuusvastefunktioita sekä niiden käyttöä. Aluksi lyhyesti ja yleisesti, myöhemmin sovelluksien avulla. Sovelluksissa otetaan aluksi katsaus anturin (tarkemmin kiihtyvyyssanturin) taajuusvasteeseen. Pietsoanturin taajuusvasteen hallitseminen on avain virheettömiin mittauksiin mutta avaa myös vastevirheen osittaisen korjauksen mahdollisuuden myötä uusia mahdollisuuksia. Seuraavaksi käsitellään suotimia, jotka ovat mittaajan ja analysoijan perustyökaluja. Suotimen taajuusvaste amplitudille sekä vaiheelle on suunnittelijan ratkaistavissa. Asiantuntevasti toteutettuna suotimia voidaan soveltaa paitsi taajuuskomponenttien poistoon tai – päästöön, mutta myös analyyttisen laskennan apuvälineinä. Samoin, derivoinnin ja integroinnin taajuuskäyttäytymistä katsotaan niiden taajuusvasteiden avulla. Operointi on vaihtoehtoisesti toteutettavissa joko taajuus- tai aikatasoisina. Lopuksi tehdään lyhyt katsaus herkkyysoanalyysin ja analyyttisen mallin päivitykseen. Tämä on paljon tutkittu alue, jota sovelletaan rakenteen vaurioanalyysissä. Tässä paperissa käsitellään vaurioanalyysiä taajuusvastefunktioiden avulla, ominaismuotoanalyysi jätetään huomiotta.

1. Taajuusvastefunktion olemus

Taajuusvaste on taajuustasoinen kuvaus järjestelmän sisäänmeno- ja ulostulosuureiden välillä. Järjestelmä voi olla fyysinen rakenne, puhdas matemaattinen toimitus tai vaikka sähköpiiri. Järjestelmän input I . sisäänmenosuure ja output O . vaste, ulostulosuure, ovat asianomaiseen tarkasteluun sopiviksi valittuja. Niiden yksiköt voivat olla erilaiset, esim. jännite sisäänmenosuureena ja paine vasteena. taajuusvastefunktion (FRF, Frequency Response Function) yksikkö määräytyy niiden suhteesta. Seuraava kuva havainnollistaa taajuusvastefunktion käyttöä. Järjestelmän kuvaus on tehty impulssi- tai taajuusvasteen avulla. Malli ei rajoitu järjestelmän dynaamisen käyttäytymisen kuvaamiseen, vaan ottaa huomioon myös kvasistaattisen ja staattisen liiketilan.



Kuva 1. Järjestelmän käyttäytyminen on kuvattu vastefunktion avulla.

Kuvassa $t =$ aika [s], ω taajuus [rad/s], $j = \sqrt{-1}$. Järjestelmän vaste $y(t)$ tai $Y(j\omega)$ määritetään aikatasossa konvoluutiolla $y(t) = x(t)*h(t)$ tai vastaavasti taajuustasossa suoralla kertolaskulla $Y(j\omega) = X(j\omega) H(j\omega)$. Taajuusvastefunktio on kompleksinen (muotoa $a + jb$) sisältäen näin sekä amplitudi- että vaihetiedon. Impulssivastefunktio sitä vastoin on yleensä reaalinen. Impulssivasteen ja taajuusvasteen voi muodostaa toisistaan Fouriermuunnoksen ja -käänteismuunnoksen avulla. Reaalinen impulssivaste takaa taajuusvasteen symmetrisyyden nollataajuuden suhteen. Käytännössä taajuusvastetta määritettäessä vaste on siis laskettava positiivisille sekä negatiivisille taajuuksille, jotta siitä käännetty impulssivaste olisi reaalinen.

Kirjallisuudessa samaa käsitellään usein z - tai Laplace-muunnoksella. Taajuusvastefunktiosta käytetään nimitystä siirto- tai systeemifunktio, kun impulssivasteesta otetaan z -muunnos. Sijoittamalla $j\omega = z$ saadaan $Y(z)=X(z) H(z)$, jossa $H(z)$ on nyt siirtofunktio. z - tai Laplace (s) -muunnokset ovat usein helpompia käsiteltäviä analyttisesti kuin Fourier-perusteiset muunnokset.

2. Mitattavan suureen ja mittausvasteen välinen yhteys

Mittausjärjestelmän tehtävänä on muuttaa haluttu fysikaalinen suure jännitemuotoiseksi, joka voidaan sen jälkeen tulostaa graafiksi tai tallettaa digitaaliseen muotoon. Sitä, kuinka hyvin mittalaite tästä muunnoksesta suoriutuu, voidaan kuvata erilaisin järjestelmän ominaisuuksia kuvaavin piirtein.

Mittalaite sisältää anturin, vahvistimen, lähettimen, AD-muuntimen tai vastaavia komponentteja. Mikään komponentti ei toimi ideaalisesti vaan aina tietyn asteisena virhelähteenä, kuitenkin tässä yhteydessä huomioimme ainoastaan suuremman luokan vääristymät.

Anturin perusvaatimuksena on usein pidettävä sen lineaarista vastetta eli ulosantia mitattavan suureen amplitudin suhteen. Lineaarisuus on suoraviivaista käyttäytymistä, toisin sanoen toimitaan jonkin suoran yhtälön mukaisesti $y=kx+b$, jossa suoran kulmakerroin k vastaa anturin suoraviivaista herkkyyttä esim. mV/g tai V/m tiettyyn suureen x . Usein lineaarisuus amplitudin suhteen toteutuu, mutta markkinoilla on myös epälineaarisia antureita. Näissä epälineaarisuus on ilmoitettu esim. prosentteina maksi-

miulosannista. Vaikkakin epälinearisuuden osuus olisi vähäinen, se aiheuttaa aina hankaluuksia mittaustuloksen käsittelyssä. Epälineaarisen anturin herkkyyttä ei voida käsitellä yhdellä luvulla, vaan se muuttuu jatkuvana mittausalueen yli ja on vakio vain tietyn pisteen välittömässä läheisyydessä, differentiaalisen etäisyyden päässä.

Siitäkin huolimatta, että anturi tai mittajärjestelmä käyttäytyisi lineaarisesti amplitudin suhteen tietyllä amplitudialueella, virhe on usein olemassa taajuusriippuvana. Kaikki anturit ovat rajoitettuja toimialueeltaan paitsi amplitudin myös taajuuden suhteen, tai yhdistelmänä taajuuden ja amplitudin suhteen. Yhdistetty rajoitus kertoo anturin dynaamisen mittausalueen, joka voidaan ylittää joko amplitudia tai taajuutta kasvattamalla. Jos anturin amplitudi- tai dynaamista mittausaluetta ei ylitetä, anturin taajuusvaste jää virhelähteeksi suureen ja mittaustuloksen välisenä kuvauksena.

Otetaan tarkasteluun kunnonvalvonnassa usein käytetty pietsosähköinen kiihtyvyydsenturi. Sen vaste alhaisiin taajuuksiin rajoittuu sähköiseen taajuusvastefunktioon H_e [6]:

$$H_e(j\omega) = \frac{jRC\omega}{1 + jRC\omega} = \frac{\omega T}{\sqrt{1 + (\omega T)^2}} e^{j\phi}$$

$$T = RC$$

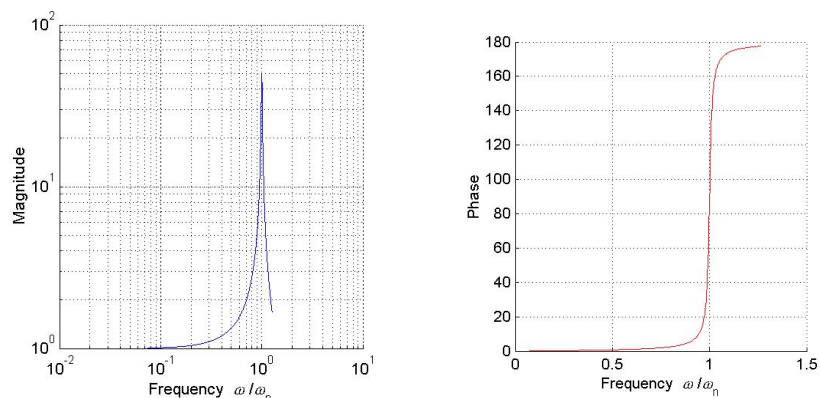
$$\phi = \pi/2 - \tan^{-1}(\omega T)$$
(1)

missä R , C ovat järjestelmän (anturi + kaapeli + tiedonkeruulaitteisto) resistanssi, kapasitanssi, T aikavakio. Aikavakio ilmoitetaan yleensä valmistajan toimesta anturin kalibrointisertifikaatissa.

Korkeammilla taajuuksilla anturin mekaaninen vaste aiheuttaa käyttökelpoisen taajuusalueen rajoituksen. Anturin liikeyhtälöstä saadaan sen mekaaninen taajuusvaste H_m :

$$H_m(j\omega) = -\omega^2 m + j\omega c + k$$
(2)

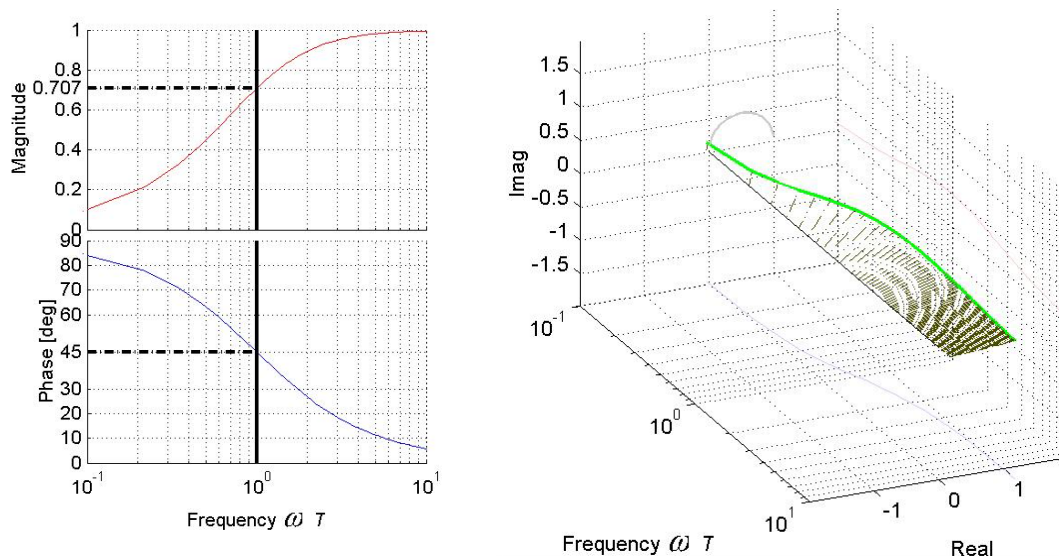
Anturin kokonaistaajuusvaste on näiden tulo $H_e(j\omega) H_m(j\omega)$. Seuraavassa kuvassa esitetään mekaaninen taajuusvaste ominaistaajuuden ω_n yli.



Kuva 2. $H_m(j\omega)$; amplitudivaste (vas.) ja vaihevaste. Magnitudi on suhteellinen siirtymä x/x_{static} .

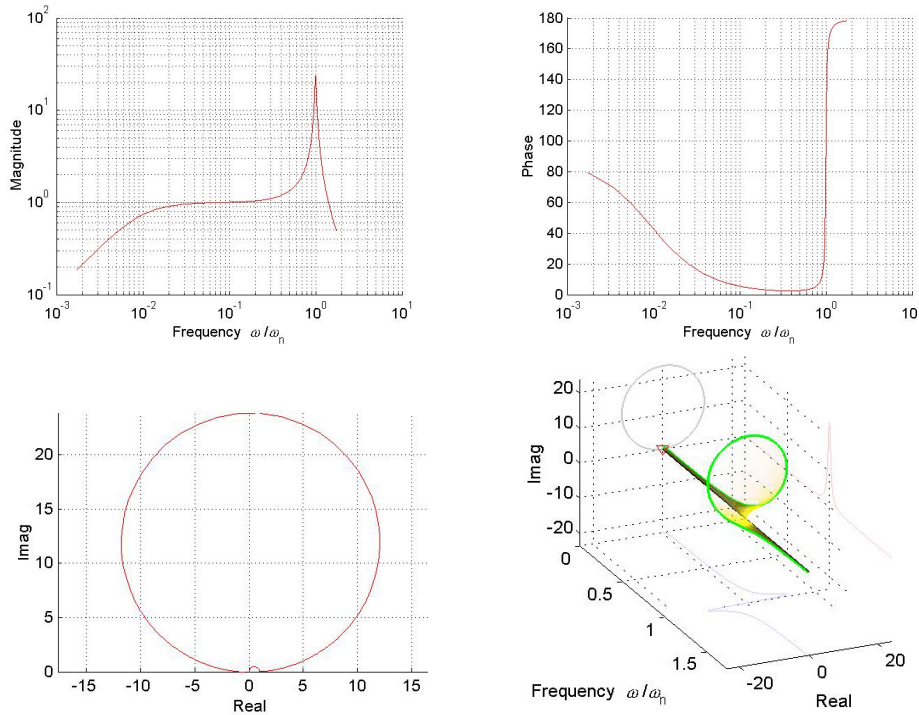
Edellisessä kuvassa amplitudi- (vas.) ja vaihevaste (oik.) kuvaavat yhden vapausasteen järjestelmän taajuuskäyttäytymisen. Amplitudivaste on skaalattu suhteelliseksi siirtymäksi x/x_{static} , eli siitä voi lukea taajuusvasteen vahvistuskertoimen. Yleensä ottaen vahvistusta 4–5 ja suurempaa pidetään vaarallisena, jolloin resonanssin vaara on ilmeinen.

Pietsoanturin sähkökäyttäytyminen perustuu omiin differentiaaliyhtälöihinsä, joista ratkaistu taajuusvastefunktio oli esitetty edellä. Alla olevassa kuvassa on esitetty sähköisen vasteen amplitudi- ja vaihevasteet (vas.) sekä vastaava 3D-esitys (oik.). Kuvista havaitaan amplitudin vaimenevan nolnaan sekä vaiheen vääristyvän 90 astetta, kun taajuus lähenee nolaa. Aika-akseli on skaalattu ωT :ksi (T aikavakio). Kun ωT on 1, vaihevääristymä on 45 astetta ja signaalin teho puolittunut. Tämä on usein viitattu -3 dB:n piste, jossa amplitudi vastaavasti on vaimentuneena $1/\sqrt{2}$ -osaan (=0,707).



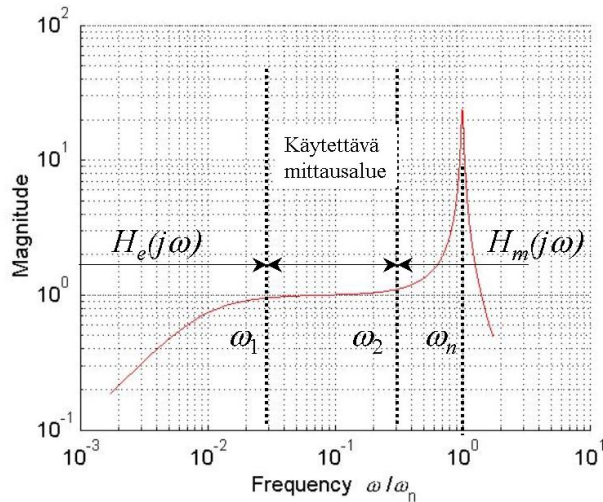
Kuva 3. Pietsoelektrisen kiihtyvyyssanturin taajuusvastefunktio alhaisilla taajuuksilla. Sähköinen vaste. Magnitudi- ja vaihevasteet (vas.) sekä 3D-kuvaaja (oik.).

Määritetyt mekaaninen ja sähköinen taajuusvaste yhdistetään kertomalla ne keskenään. Tämän yhdistetyn vasteen taajuuskäyttäytyminen on esitetty seuraavassa kuvasarjassa. Ylhäällä suhteellinen magnitudi (vas.) log-log-graafina sekä vaiheen siirto lin-log-kuvaajana (oik.). Alhaalla Real-Imag-esitys (vas.) sekä taajuusvasteen 3D-kuvaaja (oik.).



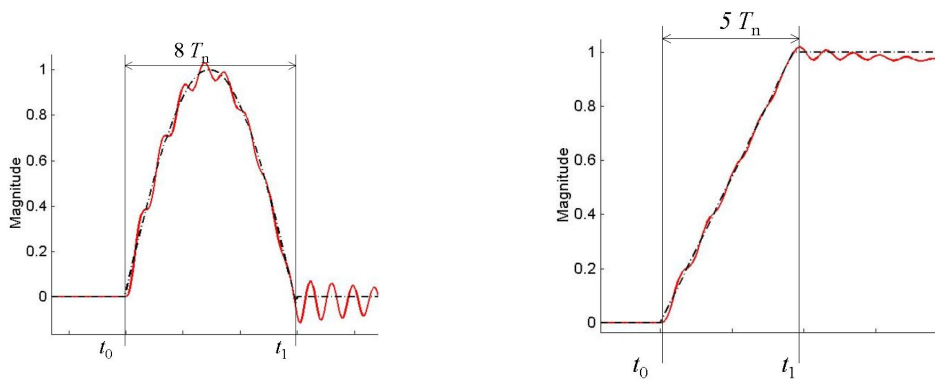
Kuva 4. Pietsoanturin yhdistetty sähköinen ja mekaaninen taajuusvaste. Ylhäällä magnitudi (vas.), vaihe (oik.). Alhaalla Nyquist-diagrammi (vas.) ja FRF:n 3D-kuvaaja (oik.).

Otetaan tarkempi katsaus yllä olevan kuvasarjan ylävasempaan kuvaan. Kuvaan voidaan tehdä karkea jaottelu sähköisen $H_e(j\omega)$ sekä mekaanisen $H_m(j\omega)$ taajuusvasteen hallittavista taajuusalueista. Näiden välissä on käyttökelpoinen mitta-alue välillä $\omega_1 \dots \omega_2$. Kuvan mukaan ominaistajuus ω_n aiheuttaa signaaliin n. 20-kertaisen vahvistuksen. Vahvistus riippuu yksinomaan laskennassa käytetystä vaimennuskertoimesta.



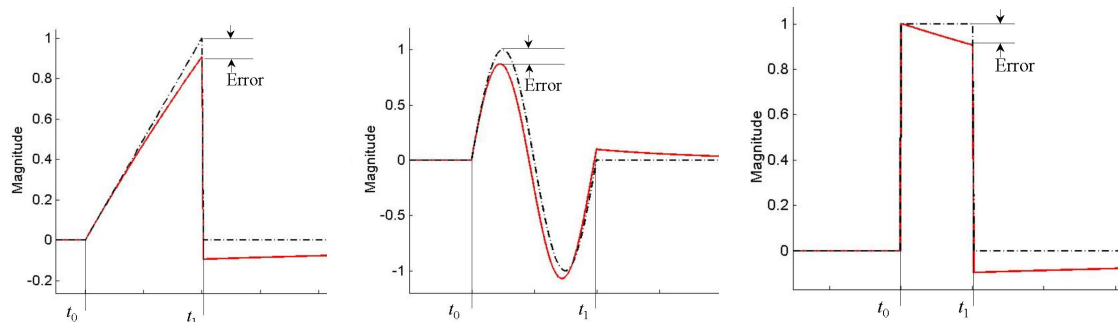
Kuva 5. Pietsoanturin kokonaisvaste sisältäen mekaanisen ja sähköisen taajuusvasteen virhealueet sekä käyttökelpoisen mittausalueen välillä $\omega_1 \dots \omega_2$, ω_n on ominaistajuus.

Kun anturin taajuusvaste on selvillä, sitä voidaan hyödyntää antamalla erimuotoisia testisignaaleja syötteenä. Ensimmäisenä tuodaan esiin anturin mekaanisen taajuusvasteen värähtely, kun lyhytkestoisen pulssin kestoaika $t_0 \dots t_1$ on $8 T_n$ ja $5 T_n$. T_n on $1/\omega_n$, siis ominaistajuuden jakso.



Kuva 6. Kiihtyvyyssanturin mekaaninen vaste puolisiniaalloon (jakso $8 T_n$) ja nousevaan ramppiin (jakso $5 T_n$) [6].

Kiihtyvyyssanturin sähköinen vaste, tai tarkemmin ottaen aikavakio T , aiheuttaa vasteesseen luonteeltaan erityyppisen vääristymän. Seuraavissa kuvissa T :n suhde pulssin kesto- aikaan on valittu siten, että kuvassa määritetyn virheen osuus on 10 %. Kolmioaallolla tämä suhde $T_n / (t_1 - t_0) = 5$, sinin jaksolle 6 sekä suorakaidepulsille 10.



Kuva 7. Kiihtyvyyssanturin sopimattoman aikavakion vääristämät vasteet. Virheet kaikissa kuvissa 10 %. Aikavakion ja pulssinkestojen suhteet 5 kolmioaallolla, 6 sinillä sekä 10 suorakaideaallolla [6].

Yllä esitetty aikavakion ja pulssin keston suhteet on syytä huomioida, kun transienttimaisia signaaleja yritetään mitata kiihtyvyyssanturilla. Esimerkiksi yksi sinijakso saadaan mittauksesta, jossa kohde kiihdyttää – hidastaa – pysähtyy, liikkeen suunnan vaihtumatta. Jos virheen osuutta halutaan pienentää 5 %:iin, ovat vastaavat suhteet 10, 12 ja 20. Kahden prosentin virheeseen päästään suhteilla 25, 32 ja 50.

Kun anturin taajuusvaste tiedetään, on virheen osuutta mahdollista pienentää kertomalla saatu virheellinen vaste käänteisellä taajuusvastefunktiolla. Pietsoanturin tapauksessa tämä virheen korjaus ei kuitenkaan toimi aivan nollataajuuteen saakka, jossa signaali/kohina suhde on heikko.

Toisin kuin pietsoanturit, venymäliuskaperustainen tai kapasitiivinen kiihtyvyyssanturi vastaavat nollataajuuteen saakka, jolloin taajuusvastefunktioiden alhaisen taajuuden vääristymät eivät aiheuta mittaajalle ongelmia. Näiden anturityyppien käyttö mittauksissa ei ole kuitenkaan vakiintunut kenttäolosuhteissa, sillä niillä on enemmän ongelmia korkeamman taajuuden vastealueilla sekä käytettävyydessä.

3. Suodattimet

Suotimia käytetään signaalin keruussa sekä käsittelyssä lähes systemaattisesti. Analogisia suotimia mallinnetaan vastaavilla digitaalisilla, jotta suotimen ominaisuudet tulevat testatuksi ennen rakentamista. Lisäksi, analogiset suodimet korvataan tämän päivän tiedonkeruuyksiköissä ominaisuuksiltaan vastaavilla digitaalisilla, jolloin suotimia ei tarvitse fyysisesti erikseen rakentaa.

Kaikki suodimet omaavat taajuusvasteensa, joka muokkaa syötteen. Lopputulos, suodatettu signaali i. vaste, on aikatasossa operoiden konvoluutio sisään menevästä aikasar-

jasta ja suotimen impulssivastefunktiosta. Taajuustasossa vaste on sisäänmenon FFT-muunnoksen ja suodattimen taajuusvasteen tulo.

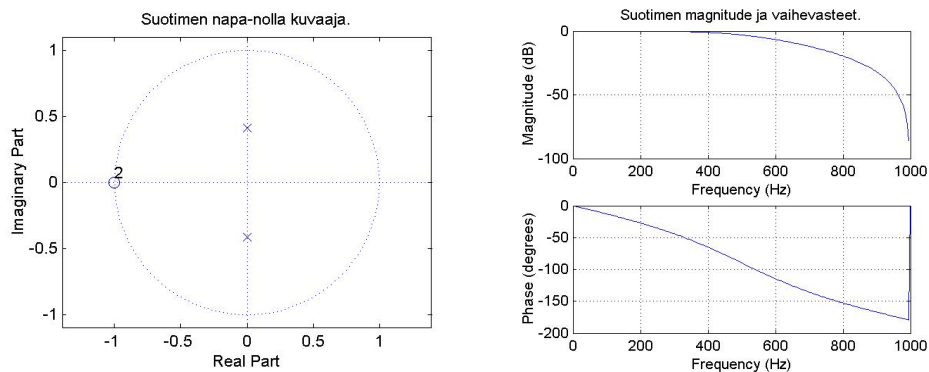
Kaikkien IIR (Infinite Impulse Response) -suodinten siirtofunktiot ovat muotoa (impulssivasteen z-muunnos)

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^K b_k z^{-k}}{1 - \sum_{m=1}^M a_m z^{-m}} \quad (3)$$

Jos laskenta halutaan tehdä $H(\omega)$ - tai $H(f)$ -tasossa, z :n paikalle laskennassa sijoitetaan $z = e^{-j(2\pi f)/f_s}$, jossa f on diskreetti taajuus, jolle vastetta määritetään ja f_s keruutaajuus, jolla taajuus normalisoidaan.

IIR-suotimen stabiilisuus tutkitaan napa-nolla-kuvion avulla. Napojen (vrt. ominaistajuuDET) ja nollien (vrt. antiresonanssit) määrittämiseksi funktio ensin lavennettava termillä z^x , jossa x on itseisarvoltaan suurin eksponentti. Tämä muuntaa lauseen eksponentit positiiviksi. Navat löytyvät sitten osoittajan, nollat nimittäjän juurista. IIR-suodin on stabiili vain, jos sen siirtofunktion kaikki navat ovat yksikköympyrän sisäpuolella. Suodattimen mahdollinen epästabiilisuus johtaa suodatetun signaalin hallitsemattomaan värähtelyyn aiheuttaen vahvasti virheellisen suodatustuloksen.

Perinteisesti IIR-suodinten suunnittelu on suoritettu suunnittelemalla ensin vastaava analoginen suodin ja muuntaa se sitten digitaaliseen muotoon. Kerroinvektorien a ja b määrittämisessä ei kannata kuitenkaan käytännössä muistaa lainkaan analogisen prototyypin käyttöä, Matlab tai moni muu numeerisen laskennan ohjelma osaa määrittää ne. Esimerkiksi Matlab-komento `[b, a] = butter(2, 0.5);` antaa toisen asteen Butterworth-suodinta kuvaavat kerroinvektorit b , a 0.5x Nyquist taajuiselle alipäästösuotimelle. Tälle suotimelle keruutaajuudelle 2 kHz piirretyt napa-nolla-kuvaaja ja amplitudi- sekä vaihevaste näkyvät kuvassa 8.



Kuva 8. Alipäästösuotimen (Butterworth, 2. kertaluku) napa-nolla-kuvio (vas.) ja amplitudi- sekä vaihevasteet (oik.) keruutaajuudella 2 kHz.

Periaatteeltaan suotimet ovat vaimentimia suunnitellun taajuusalueen yli. Vahvistus on yleisesti ottaen suotimelle epätyypillistä käyttäytymistä, ja esiintyessään indikoi suotimen ei-toivottua värähtelyä jolloin suodin on epästabiilissa tilassa. Seuraavaksi otetaan katsaus taajuusvasteisiin, joilla taajuusaluetta hallitaan paitsi vaimennuksen myös vahvistuksen avulla.

4. Integraattori, derivaattori

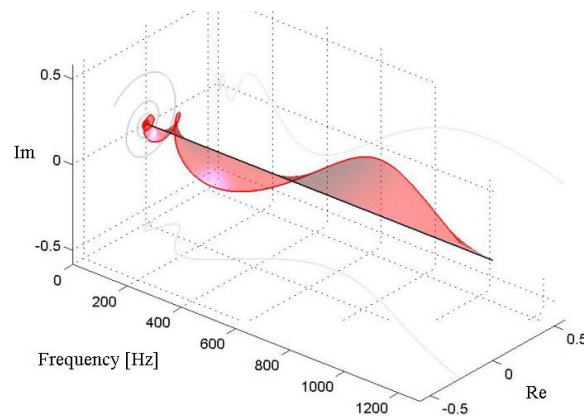
Edellä esitettiin laskennallinen malli fyysiselle IIR-suotimelle, joka on usein mukana joko laskennallisesti tai fyysisesti kunnonvalvonnan mittauksissa ja analyyseissä. Samalla tavoin, sähköpiiriä jäljittelevä dynaaminen malli voitaisiin muodostaa vaikka operatiiviselle vahvistimelle, integraattorille, derivaattorille, modulaattorille tai demodulaattorille. Näin kehitetyn parametrin mallin käyttäytymistä voitaisiin taajuustasossa sittemmin tutkia laskennallisten amplitudi- ja vaihevasteiden, taajuusvastefunktioiden, avulla. Integrointi, derivointi, demodulointi ja modulointi kuuluvat vahvasti kunnonvalvonnan mittausten signaalin käsittelyyn ainakin laskennallisina.

Taajuusvasteetta tarkastellessa ei siis aina tarvitse olla perustana jotain fyysistä järjestelmää. Kun signaalia käsitellään aikatasossa, on sillä aina vaikutus myös taajuustasoon. Taajuustasoinen vaikutus havaitaan yksittäisten taajuuskomponenttien amplitudi- ja vaihemuutoksina, joita amplitudi- ja vaihevasteet hallitsevat (aikatasoisessa operoinnissa impulssivaste). Signaalin käsittelyssä ei aina tarvitse toimia reaaliaikaisesti, vaan off-line-prosessointi on mahdollista. Joissakin tapauksissa, yleensä off-line-analyyseissä, aikatasoisen operoinnin sijaan kannattaa käyttää vastaavaa taajuustasosta algoritmia. Tämä sen vuoksi, että usein laskenta taajuustasossa on joko nopeampaa, yksinkertaisempaa (vrt. z - tai s -muunnokset) tai havainnollisempaa. Esimerkiksi konvoluutiointegraalin käyttö autokorrelaation, ristikorrelaation tai differentiaaliyhtälön vasteen määrittämiseksi syötetylle herätteelle ovat raskaita laskettavia aikasarjoina, mutta toteutettuina taajuustasossa ovat kertaluokkia nopeampia prosessoitavia. Toisena esimerkkinä integrointi on diskreetille aikasarjalle huomattavasti helpompi toteuttaa taajuustasossa, joka aikatasoisena vaatisi paitsi laskenta-aikaa myös erilaisia approksimointikeinoja (trapezoidal, central difference jne.) diskreetille aikasarjalle hyvän laskentatarkkuuden saavuttamiseksi. Integroinnin ja derivoinnin suhteen on aika- ja taajuustasoisien laskennan välillä suljettua muotoa oleva yhteys:

$$\begin{aligned}
 x(t) &\xleftrightarrow{F} X(j\omega) \\
 \frac{d^m}{dt^m} x(t) &\xleftrightarrow{F} (j\omega)^m X(j\omega) \\
 \int_{-\infty}^t x(\tau) d\tau &\xleftrightarrow{F} \frac{1}{j\omega} X(j\omega) + \pi X(0)\delta(\omega)
 \end{aligned} \tag{4}$$

Keskimmäinen yhtälö on derivoinnin, jälkimmäinen integroinnin. Derivointi vahvistaa taajuusriippuvaisesti kaikkia taajuuskomponentteja termillä $(j\omega)^m$, jossa m on positiivinen kokonaisluku. Kyseisessä termissä j suorittaa vaihesiirron, joka pysyy taajuudesta riippumattomana samana yli taajuusalueen. Integroinnissa taajuustasoinen vahvistus on käänteinen ollen $1/j\omega$.

Käytännön sovelluksena taajuustasoisesta derivoinnista S. Lahdelman artikkeli [4], jossa käytetään edellä esitetyn kokonaisluvun m sijaan murtolukua tai kompleksilukua. Tämän kaltaisissa derivaatoissa olisi diskreetti-aikainen operointi erityisen työläs toteuttaa, sillä se johtaisi aikasarjan 'puuttuvien' datapisteiden määrittämiseen jollain sovitusalgoritmilla aiheuttaen laskentaan siten myös amplitudi- ja vaihevääristymiä. Kompleksilukuderivaatalla amplitudivahvistus saadaan logaritmiseksi, joten logaritmisten, taajuusriippuvien, värähtelysuositusten tarkastaminen on yksiselitteisempää; kaikkien tarkasteltavien taajuuksien amplitudit saavat kompleksisen derivaatan jälkeen vertailussa saman arvon.



Kuva 9. Derivointioperaattorin $x^{(0.4 + 3j)}$ taajuusvastefunktio.

Edellinen kuva esittää kompleksilukuisen derivoinnin amplitudi- ja vaihevasteen tarkasteltavan taajuusalueen yli (derivaattaoperaattorin taajuusvastefunktio). Kompleksilukuderivaatan vaiheen kääntö taajuusalueella ei sinänsä ole merkitsevää, mutta ei haitallinenkaan, sillä tarkastelun päämääränä on amplitudien suuruuksien arviointi.

5. Rakenteiden dynamiikka

Järjestelmän dynamiikka kuvataan systeemi-, moodi- tai vastemallilla. Systeemimalli koostuu liikeyhtälöistä, moodimalli moodiparametreista, kuten ominaisarvoista, ja vastemalli taajuus- tai impulssivasteista. Kun mikä tahansa näistä malleista tiedetään, siirtyminen toiseen malliin on mahdollinen. Seuraavassa järjestelmästä tehdään ensin systeemimalli l. tilamalli (spatial model), joka sisältää systeemin liikeyhtälöt ulkoisine

voimiseen. Liikkeyhtälöt johdetaan yleisesti joko Newtonin 2. lain ja Eulerin momenttiyhtälöiden avulla tai käyttäen Lagrangen yhtälöä. Toisen kertaluvun diskreetille lineaariselle systeemille liikkeyhtälöt esitetään yleensä matriisimuotoisena

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (5)$$

missä $[M]$ on systeemin massa-, $[C]$ vaimennus- ja $[K]$ jäykkyyismatriisi, jotka ovat yleensä tunnettuja. $\{x(t)\}$ on usein tuntematon etäisyys-paikka-vektori $\{pystyvektori\}$ l. sarakematriisi, koko $N \times 1$, $\{\dot{x}(t)\}$ nopeusvektori, $\{\ddot{x}(t)\}$ kiihtyvyyksvektori, $\{f(t)\}$ voima-vektori. Kaikki matriisit $[]$ ovat $N \times N$ -matriiseja, joissa N on tarkasteluun mukaan otettujen vapausasteiden lukumäärä. Usein tätä mallia käytettäessä tehdään seuraavat oletukset: matriisit $[M]$, $[C]$, $[K]$ ovat vakioita ja symmetrisiä, $[M]$ on ei-singulaarinen l. omaa käänteismatriisinsa, ominaisarvot ovat erilliset, kaikki ominaismuodot ovat alkiriittisesti vaimennettuja sekä systeemi on stabiili ja kausaalinen.

Tästä systeemiä kuvaavasta yhtälöstä (yhtälöryhmästä) voidaan laskea vasteet, jos vain herätteet ovat tunnetut, tai vastaavasti herätevoimat, jos vasteet ovat tunnetut. Yhtälöiden ratkaisemiseksi integrointi suljettuun muotoon ei onnistu kuin hyvin yksinkertaisissa tapauksissa. Muulloin on käytettävä numeerista integrointia, kuten Newmarkin, Wilsonin tai Runge-Kuttan algoritmeja. Tästä mallista voidaan siirtyä moodimalliin, jossa systeemin dynaaminen käyttäytyminen ilmoitetaan ominaistajuuksien, vaimennuksien ja muotojen avulla. Jokaisella ominaistajuudella on yksilöllinen värähdysmuotonsa ja vaimennuksensa. Vastemalli taas määrittää systeemin dynamiikan taajuus- tai impulssivasteiden avulla. Vastemalli on ainoa suoraan mitattavissa oleva. Siirtyminen mitattavasta vastemallista moodimalliin tehdään siten, että ominaismuodot, taajuudet ja vaimennukset haetaan mitatuista taajuusvastefunktioista erilaisin käyränsovitusmenetelmin.

Olettaen nyt yhtälön (5) herätteeksi harmoninen voima, vaste on myös harmoninen eli $\{f(t)\} = \{F(\omega)\}e^{j\omega t}$ sekä vaste $\{x(t)\} = \{X(\omega)\}e^{j\omega t}$, missä X on kompleksinen amplitudi määritettynä jokaiselle taajuudelle ω . Oletuksen mukaan rakenne vastaa syötteen taajuudella, mutta amplitudi ja vaihe sen sijaan ovat muuttuvia. Sijoittamalla nämä edelliseen systeemin liikkeyhtälöön saadaan

$$(-\omega^2[M] + j\omega[C] + [K])\{X(\omega)\}e^{j\omega t} = \{F(\omega)\}e^{j\omega t} \quad (6)$$

Katsomalla edellistä yhtälöä havaitaan herätteen ja vasteen välillä vaikuttavan termit ensimmäisten sulkeiden sisällä. Tämä sulkulauseke on nyt systeemin taajuusvastefunktio matriisi, merkitään $[H(\omega)]$ ja kirjoitetaan

$$[H(\omega)] = (-\omega^2[M] + j\omega[C] + [K])^{-1} \quad (7)$$

Nyt yhtälö (6) voidaan edelleen lausua muodossa

$$\{X(\omega)\} = [H(\omega)]\{F(\omega)\} \quad (8)$$

jossa $[H(\omega)]$ on taajuusvastefunktio­matriisi (tässä reseptanssimatriisi). Matriisi sisältää $N \times N$ taajuusvastefunktiota jokaisen vapausasteen välille ja on yleensä symmetrinen resiprookkiteoreeman mukaisesti. Jos näin on, taajuusvaste pisteestä j pisteeseen k on sama kuin pisteestä k pisteeseen j . Tämän lisäksi matriisi on redundanttinen, millä perusteella sen mikä tahansa elementti voidaan määrittää, jos vain mikä tahansa rivi tai sarake on tiedetty. Yhtälö kuvaa nyt aiemmin mainittua vastemallia, johon siirtyminen suoritettiin systeemimallista.

Yhtälöstä (8) havaitaan reseptanssimatriisin yksikön olevan $[m/N]$. Vastaavasti nopeus- tai kiihtyvyy­svasteisissa tapauksissa matriisit kutsuttaisiin mobiliteetiksi ja inertanssiksi, yksiköt $[ms^{-1}/N]$ ja $[ms^{-2}/N]$. Taajuusvastefunktiot esitetään toisinaan myös yksiköttöminä, esim. suhteellisina etäisyyksinä, havainnollistaen näin funktion vahvistavia (>1) ja vaimentavia (<1) taajuusalueita. Dynaamisessa analyysissä sovelletaan myös näiden käänteismatriiseja, nimettyinä dynaamisen jäykkyyden, mekaanisen impedanssin ja näennäisen massan matriiseiksi.

5.1 Rakenteen valvonta taajuusvastefunktioiden avulla

Taajuusvastefunktioiden muuttumista rakenne­vaurioiden tunnistamisessa on käytetty kymmeniä vuosia. Kuitenkin tämä on edelleen kehittyvä ja paljon tutkittu alue.

Rakennekokonaisuutta ajatellen rakenne­vauriolla voidaan tarkoittaa rakennemateriaalin vaurioita, kuten halkeilua, särön kasvua, korroosiota, nurjahdusta, lommahdusta tai kerroskuoriutumista. Toisaalta rakenne­vaurioita voivat olla rakenneliitosten vauriot, kuten pultti-, niitti-, hitsi- tai liimaliitosten löystyminen tai murtuminen. Rakennemateriaalin vauriot eivät juurikaan vaikuta massamatriisiin, kun taas rakenneliitoksen vauriot tuovat herkemmin muutoksen systeemin jäykkyys- sekä massajakaumaan. Lisäksi vikaantumiset kuten epätasapainoon ajautuminen massan lisäyksellä tai irtoava komponentti tuovat dynamiikkaan muutoksen massamatriisin välityksellä. Muuttuneet massa-, vaimennus- tai jäykkyy­sjakaumat sijoitetaan alkuperäisten matriisien paikalle muodossa [1, 7, 11, 13]

$$[M_o] = [M_a] + [\Delta M_o] \quad [C_o] = [C_a] + [\Delta C_o] \quad [K_o] = [K_a] + [\Delta K_o] \quad (9)$$

missä $[\Delta M_o]$, $[\Delta C_o]$, $[\Delta K_o]$ ovat virheen osuudet sisältävät matriisit ja alaindeksi a viittaa alkuperäisen tilanteen, siis rakenne­vaurioiden analyysissä vaurioitumattoman rakenteen matriiseihin. Tätä ajatustapaa käytetään vastaavasti myös dynaamisen mallin päivi-

tyksessä, jossa laskettu malli laitetaan vastaamaan mitattua. Tällöin matriisit alaindeksillä a viittaavat vastaaviin analyttisiin.

Taajuusvastefunktioiden (tässä tapauksessa reseptanssien) eroavaisuudet kahden tilanteen välillä voidaan laskea ns. epälineaarisen perturbaation avulla

$$[H_o(\omega)]_i - [H_a(\omega)]_i = -[H_a(\omega)](-\omega^2 [\Delta M_o] + [\Delta K_o] + j[\Delta C_o])[H_o(\omega)]_i \quad (10)$$

Rakenteen valvonnassa vaurion tapahduttua sen olemassaolo tulee ensisijaisesti havaita. Tämän jälkeen tulee mahdollisesti arvioitavaksi sen vakavuusaste, ja edelleen on usein tarvetta myös paikantaa se. Tärkein vaihe on vaurion synnyn luotettava havainnointi.

Ehdottomasti yksinkertaisin keino havaita dynamiikassa tapahtunut muutos on ominaistaajuuksien siirtymisen seuranta. Järjestelmän tärkeimmät ominaistaajuudet saadaan mitattua yhdestä sopivasti valitusta mittauspisteestä, kun taas ominaismuotojen muutoksiin tarvitaan täydellinen mittapisteverkko sekä näille ominaismuotoanalyysianalyysi. Lisäksi, yhdestä mittauksesta voidaan niin halutessa selvittää vaimennusparametrit. Rakennevaurion läsnäolo voidaan siis selvittää yksipistemittauksella, mutta vaurion vakavuusaste ja sijainti tarvitsevat käytännön rakenteissa yleisesti lisämittauksia. Ominaistaajuuden samanasteinen siirtyminen voi aiheutua useista eri vauriokohdista ja vakavuusasteista [9].

Taajuussiirtymän havaitsemiseksi on oleellista, että syntynyt vaurio sijaitsee rakenteen kantavissa osissa, kuormituksen alaisissa kohteissa. Useat tutkimukset ovat havainneet, että analyysissä saavutetaan parempia tarkkuuksia jos vaurio sijaitsee suhteellisen suuren jännityskentän alueella [2, 3, 8]. Lisäksi, mittausposition täytyy olla värähtelymuodon alueella, jossa muodon kaarevuus on suuri.

Käytännön tulokset ovat osoittaneet, että taajuussiirtymät ovat luokkaa 0.01...1 %, joten niiden mittauksiin ja analysointiin tulee valmistautua sen mukaisesti. Näin pienet muutokset voivat aiheutua vaihtuvista ympäristöolosuhteista kuten lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Sen sijaan ominaismuotojen vaimenninparametrien on havaittu reagoivan vaurioihin yleensä herkemmin; muutoksen osuuden on pienissäkin vaurioissa todettu olevan suuruudeltaan 100–200 % [12].

Seuraavaksi esitellään taajuusvastefunktioihin perustuvat vaurion tunnistamismenetelmät, jotka Maia et al. [5] on kerännyt yhteen. Menetelmät havaitsevat taajuusvastefunktioissa tapahtuneet muutokset. Toisin sanoen niillä on käyttöarvoa vasta silloin, kun systeemistä on käytettävissä etukäteisinformaatiota esim. analyttisestä mallista tai mittauksesta ehjästä rakenteesta. Menetelmillä voi tunnistaa yksittäisestä mittauksesta vaurion läsnäolon, mutta vaurion paikantaminen tarvitsee useampia mittauksia.

Menetelmät perustuvat olettamukseen, että vaurio sijaitsee rakenteessa sellaisella kohdalla, että muutos taajuusvastefunktioon on merkitsevä. Esitettävien menetelmien käytökelpoisuutta lisää teoria, että muuttuvan värähdysmuodon (taajuusvastefunktion ko. taajuudella) ei tarvitse olla rakenteelle ominainen, vaan vertailu toimii myös pakkovärähtelymuodoille, ns. ODS (Operational Deflection Shape) -muodoille.

Ominaisuusmuotojen vertailussa käytetään hyvin samantyyppisiä menetelmiä kuin ominaistajuuksien vertailuissa. Ominaisuusmuotovertailu kuitenkin tarvitsee aina riittävän tiheän mittapisteverkon, kuitenkin ne kykenevät aina myös paikantamaan vauriokohdan.

Käytetyt merkinnät:

- Δ differenssi
- $\alpha(\omega)$ yksittäinen taajuusvastefunktio matriisista $[H(j\omega)]$
- $\alpha'(\omega)$ ensimmäinen derivaatta mittauspisteen paikan suhteen
- $\alpha''(\omega)$ toinen derivaatta mittauspisteen paikan suhteen
- i mittauspisteen sijainti-indeksi
- k herätevoiman sijainti-indeksi

FRF_MS (FRF-based Mode Shape)

$$\Delta\alpha_{ik}(\omega) = \left| \alpha_{ik}^*(\omega) - \alpha_{ik}(\omega) \right|, \quad FRF_MS_i = \sum_{\omega} \sum_k \Delta\alpha_{ik}(\omega) \quad (11)$$

Ensimmäinen yhtälö on tarkoitettu yksittäiselle taajuuskomponentille tai yksittäiselle herätteelle. Jos useampi kuin yksi taajuuskomponentti tai heräte on kyseessä, käytetään jälkimmäistä indeksin laskutapaa. Tämä pätee seuraaviin muihinkin indeksin laskentoihin.

FRF_MSS (FRF-based Mode Shape Slope)

$$\Delta\alpha_{ik}'^2(\omega) = \left| \alpha_{ik}'^{*2}(\omega) - \alpha_{ik}'^2(\omega) \right|, \quad FRF_MSS_i = \sum_{\omega} \sum_k \Delta\alpha_{ik}'^2(\omega) \quad (12)$$

FRF_MSC (FRF-based Mode Shape Curvature) [6]

$$\Delta\alpha_{ik}''(\omega) = \left| \alpha_{ik}''^*(\omega) - \alpha_{ik}''(\omega) \right|, \quad FRF_MSC_i = \sum_{\omega} \sum_k \Delta\alpha_{ik}''(\omega) \quad (13)$$

FRF_MSCS (FRF-based Mode Shape Curvature Square)

$$\Delta\alpha_{ik}''^2(\omega) = \left| \alpha_{ik}''^{*2}(\omega) - \alpha_{ik}''^2(\omega) \right|, \quad FRF_MSCS_i = \sum_{\omega} \sum_k \Delta\alpha_{ik}''^2(\omega) \quad (14)$$

FRF_DI (FRF –based Damage Index)

$$\beta_{ik}(\omega) = \frac{\left(\alpha_{ik}^{n*2}(\omega) + \sum_{i=1}^N \alpha_{ik}^{n*2}(\omega)\right) \sum_{i=1}^N \alpha_{ik}^{n*2}(\omega)}{\left(\alpha_{ik}^{n*2}(\omega) + \sum_{i=1}^N \alpha_{ik}^{n*2}(\omega)\right) \sum_{i=1}^N \alpha_{ik}^{n*2}(\omega)} \quad (15)$$

$$FRF_DI_i = \sum_{\omega} \sum_k \beta_{ik}(\omega)$$

Edellä mainituista indekseistä on saatu kuvaavia tuloksia [5] käyttämällä syötteenä 25–75 % simuloitua jäykkyyden alentumaa jossain elementissä. Paikallistaminen onnistui kaikilla menetelmillä. Kuitenkin, simuloitu vaurio oli suurenlainen verrattuna todellisiin, vaikkapa mikromurtumien, aikaansaamiin jäykkyyden alentumiin.

6. Yhteenveto

Kunnonvalvonnassa käytetyissä antureissa yhdistyvät usein mekaaninen sekä sähköinen dynamiikka. Tässä paperissa antureista huomioidaan erityisesti kunnonvalvonnassa käytetty pietsosähköinen kiihtyvyyssanturi, jonka amplitudi- ja vaihevasteet vääristyvät sähködynamiikan vaikutuksesta alhaisilla taajuuksilla sekä mekaanisten ominaisuuksien välityksellä korkeammalla taajuudella. Noiden taajuusalueiden vasteen tunteminen sekä hallitseminen mahdollistaa virheellisen mittaustuloksen välttämisen tai sen korjaamisen. Virheettömien mittausten lisäksi anturin käyttöalue laajenee, kun sen dynamiikka hallitaan.

Suodattimet ovat keskeinen alue mittaussignaalin keruuta ja käsittelyä. Analogisia suodattimia jäljitellään taajuusvastefunktion avulla, joka kuvaa analogisen prototyypin dynamiikkaa. Suotimen laskennallinen, parametrinen, malli voidaan rakentaa vastaamaan kuviteltua mitä tahansa analogista suodinta muuntamalla mallin parametrejä. Parametrien valinta tehdään käytännössä jollain valmisohjelmalla. Analyyttistä suodinta voidaan soveltaa paitsi taajuuskomponenttien estoon tai päästöön mutta myös virheen korjaukseen tai kohinan poistoon.

Taajuusalueen yli operoivat suotimien lisäksi esimerkiksi vahvistimet, modulaattorit, tai integraattorit. Taajuustasaisen operoinnin ei aina tarvitse olla kuvaus jostain fyysisestä järjestelmästä vaan se voi kuvata jotain aritmeettista toimenpidettä, kuten derivointia tai konvoluutiointegraalia.

Taajuusvastefunktioiden avulla mallinnetaan paitsi järjestelmän dynamiikka myös seurataan dynamiikassa tapahtuvia muutoksia. Herkkyysanalyysissä systeemimatriiseihin annetaan pieniä vaihteluita ja tarkastellaan laskennallisen vasteen muutoksia. Herkkyysanalyysi tuo esiin matriiseissa tapahtuvien muutosten minimi, jotta ne voidaan havaita vasteiden mittauksessa. Rakenteiden valvonnassa, yleensä jäykkyy- tai vaimennusmatriiseissa tapahtuvat muutokset pyritään havaitsemaan vasteiden mittauksissa.

Lähteet

- [1] Fritzen, C.-P., Jennewein, D. & Kiefer, T. 1998. Damage Detection Based on Model Updating Methods. *Mech. Syst. and Sign. Proc.*, 12(1), s. 163–186.
- [2] Gomes, A.J.M.A. & Silva, J.M.M.E. 1990. On the Use of Modal Analysis for Crack Identification. In: *Proceedings of 8th International Modal Analysis Conference, Florida, 2*. S. 1108–1115.
- [3] Ju, F.D. & Mimovich, M. 1986. Modal Frequency Method in Diagnosis of Fracture Damage in Structures. In: *proceedings of 4th International Modal Analysis Conference, Los Angeles, 2*. S. 1168–1174.
- [4] Lahdelma, S. 1999. On the Derivative of Complex Number Order and its Application to Condition Monitoring and Active Control. *Kunnossapito*, No. 1, s. 27–34.
- [5] Maia, N.M.M., Silva, J.M.M. & Almas, E.A.M. 2003. Damage Detection in Structures: From Mode Shape to Frequency Response Function Methods. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 17(3), s. 489–498.
- [6] McConnell, K.G. 1995. *Vibration Testing: Theory and Practice*. John Wiley & Sons, Inc, USA. ISBN 0-471-30435-2.
- [7] Park, N.-G. & Park, Y.-S. 2003. Damage Detection Using Spatially Incomplete Frequency Response Functions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 17(3), s. 519–532.
- [8] Salane, H.J. & Baldwin, J.W. 1990. Identification of Modal Properties of Bridges. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 116, (7), s. 2008–2021.
- [9] Salawu, O.S. 1997. Detection of Structural Damage Through Changes in Frequency: a review. *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 9, s. 718–723.
- [10] Sampaio, R.P.C., Maia, N.M.M. & Silva, J.M.M. 1999. Damage Detection Using the Frequency Response-Function Curvature Method. *Journal of Sound and Vibration*, 226(5), s. 1029–1042.
- [11] Sheinman, I. 1996. Damage Detection and Updating of Stiffness and Mass Matrices Using Mode Data. *Computers & Structures*, Vol. 59, No. 1, s. 149–156.

- [12] Vanlanduit, S., Parloo, E. & Guillaume, P. 2003. Combined Damage Detection Techniques. *Journal of Sound and Vibration*, 266, s. 815–831.
- [13] Wang, Z., Lin, R.M. & Lim, M.K. 1997. Structural Damage Detection Using Measured FRF data. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 147, s. 187–197.

Nosturin kunnonvalvonta

Jaakko Leinonen & Sulo Lahdelma
Oulun yliopisto
Oulu

Tiivistelmä

Nosturin moitteeton toiminta on tehtaan tuottavuuden kannalta tärkeää. Sen vikaantuminen voi aiheuttaa koko tehtaan prosessiin häiriöitä. Lisäksi nosturin toiminnan täytyy olla myös turvallisuuden kannalta luotettavaa, jottei vaaraa aiheudu ympäristössä työskenteleville henkilöille. Tässä tullaan tarkastelemaan erään siltanosturin nykyistä kunnonvalvontaa. Sen lisäksi käsitellään öljyanalyysejä ja värähtelymittausten soveltuvuutta nosturin kunnonvalvontaan.

1. Johdanto

Tämä työ liittyy osana laajaan teollisuuden käynnissäpidon Prognos -tutkimushankkeeseen, jossa Rautaruukki Oyj:n panostusnosturin päänostokoneiston kunnonvalvontaosuus muodostaa erään osaprojektin. Siinä tullaan ensinnäkin laatimaan mittaussuunnitelma nosturin sähkömoottorien, moniportaisten vaihteiden ja köysipyörien vikojen toteamiseksi. Toisekseen halutaan valvoa nosturin köysien ja teräsrakenteiden kuntoa. Lisäksi projektissa tullaan miettimään, miten mittaustiedot voidaan langattomasti siirtää nosturista maahan, mikä on tärkeää sekä mittausten sujuvuuden että työturvallisuuden kannalta.

2. Panostusnosturi

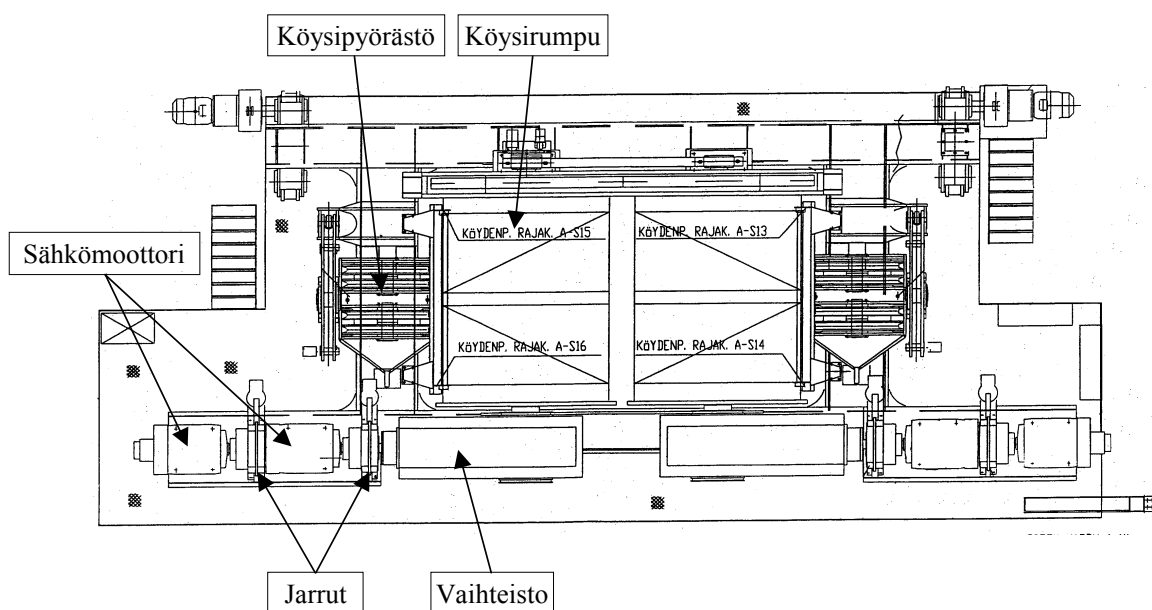
Panostusnosturin tehtävänä on siirtää senkka valukoneen nosto- ja kääntöpöydälle sekä noutaa lopuksi tyhjä senkka uutta täyttöä varten. Jatkuvavalukoneen panostusnosturilta vaaditaan hyvää toimintavarmuutta, koska nosturi muodostaa tärkeän osan jatkuvasta prosessista. Panostusnosturin käyttöhäiriöt aiheuttavat koko valuprosessiin häiriöitä. Lisäksi sen toiminnan täytyy olla myös turvallisuuden kannalta luotettavaa, jottei vaaraa aiheudu ympäristössä työskenteleville henkilöille.

Sula teräs tuodaan panostusnosturilla valusenkassa jatkuvavalukoneelle. Valusenkka nostetaan esikuumennetun välialtaan yläpuolelle nosto- ja kääntöpöydälle, jonka jälkeen terästä aletaan valaa senkasta liukusulkimen kautta välialtaaseen.

Jatkuvavalukoneen panostusnosturi on sillanosturi, jonka jänneväli on 16 m. Nosturi rakentuu kahdesta sillasta ja niiden päällä kulkevista nosto- ja apuvaunusta, vaununsiirto- ja sillansiirtokoneistosta sekä nosturin teräsrakenteista. Nostovaunun ja apunoston nostokorkeudet ovat vastaavasti 20 m ja 24 m. Nostovaunun päänostokoneiston pääasiallisena tehtävänä on senkan nostaminen ja sen siirtäminen jatkuvavalukoneen nosto- ja kääntöpöydälle. Nostovaunu koostuu kahdesta erillisestä päänostokoneistosta, joiden sähkömoottorit ovat sähköisesti synkronoitu toisiinsa tasaisen nosto- ja laskuliikkeen aikaansaamiseksi.

2.1 Päänostokoneisto

Päänostokoneiston toiminnalliset osat ovat kaksi sarjaan kytkettyä sähkömoottoria, neliportainen kulmavaihteisto sekä köysirumpu (kuva 1). Köysirummut ovat kytketty toisiinsa avohammasvälityksen avulla, jonka tehtävänä on varmistaa hallittu senkan lasku toisen nostokoneiston rikkoontuessa sekä synkronoida köysirumpujen välinen pyörimisliike. Sarjaan kytkettyjen sähkömoottoreiden ohjaus tapahtuu taajuusmuuttajan avulla. Lisäksi päänostokoneistoon kuuluvat sähkömoottoreiden jarrut sekä kytkimet. Jarrut toimivat pääasiassa vain seisontajarruina ja normaali käytönaikainen jarrutus tapahtuu ensisijaisesti sähkömoottorilla.



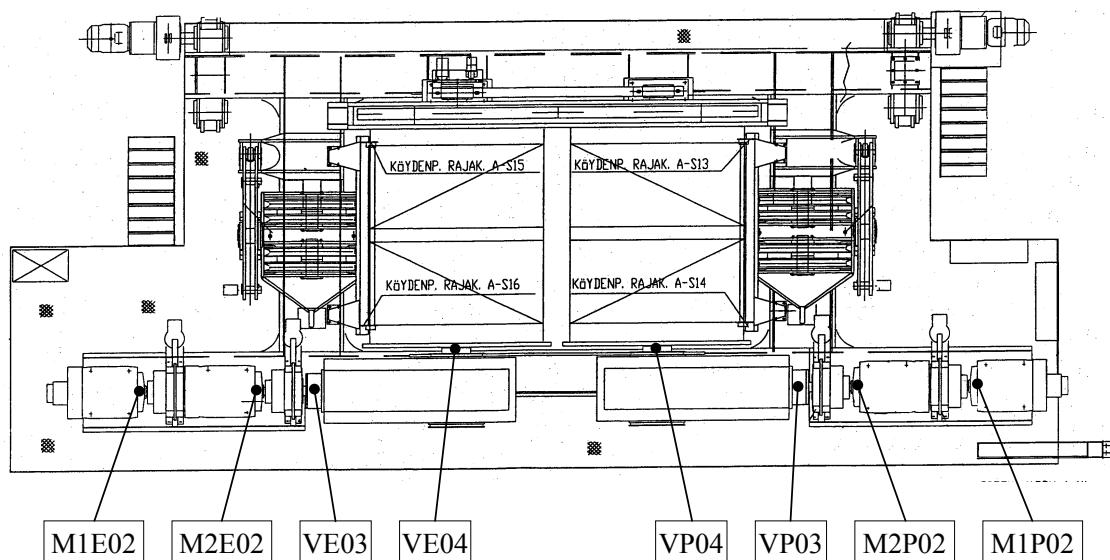
Kuva 1. Päänostokoneisto.

3. Panostusnosturin kunnonvalvonta

Nosturilainsäädäntö määrää, että teollisuusnosturille, jonka suurimman kuorman massa ylittää 500 kg, täytyy tehdä sekä käyttöönottotarkastus että säännölliset määräaikaistarkastukset. Ennen ensimmäistä käyttöönottoa ja ennen merkittävien korjaus- ja muutosten jälkeistä käyttöä täytyy nosturille tehdä asianmukainen käyttöönottotarkastus. Se tehdään vain niille osille ja laitteille, joilla on merkitystä nosturin turvallisuudelle. Käyttöönoton jälkeen nosturille on suoritettava määräaikaistarkastus ja siihen liittyvä koeajo yhden vuoden välein. Lisäksi nosturille on tehtävä standardin SFS 4621 tai valmistajan ohjeiden mukainen koekäyttö joka neljäs vuosi. Kun käyttöönotosta on kulunut kymmenen vuotta, niin nosturin kantaville rakenteille ja nostokoneistolle on tehtävä tarkastus, jonka yhteydessä kantavat rakenteet tarkastetaan ainetta rikkomattomalla menetelmällä. Jotta tarkastus olisi mahdollisimman perusteellinen, pitää nosturi tai nostokoneisto purkaa tarvittaessa osiin [1, 2].

Panostusnosturissa on tällä hetkellä suppea neuroverkkopohjainen kunnonvalvontajärjestelmä, jossa uutuustilan hälytys tapahtuu GSM-modeemilla. Lisäksi nosturissa on sen valmistajan suunnittelema toiminnanseurantajärjestelmä, joka tarkkailee nosto- ja laskuvaiheiden kuormituksia, tehoja ja häiriöitä.

Kunnonvalvontajärjestelmässä on kahdeksan kappaletta kiihtyvyyssantureita, jotka ovat sijoitettu kuvan 2 mukaisesti. Päänostokoneiston kunnonvalvontajärjestelmän kiihtyvyyssanturit mittaavat signaalia molemmista sähkömoottoreista sekä vaihteistosta sen ensiö- ja toisiopuolelta. Kiihtyvyyssignaalista lasketaan kaksi piirrettä eli nopeuden tehollisarvo v_{rms} taajuusalueella 10–1000 Hz sekä verhoikäyrän huippuarvo taajuusalueella 1–10000 Hz. Niitä käytetään neuroverkon syötteenä.



Kuva 2. Neuroverkon mittauspisteet ja paikat.

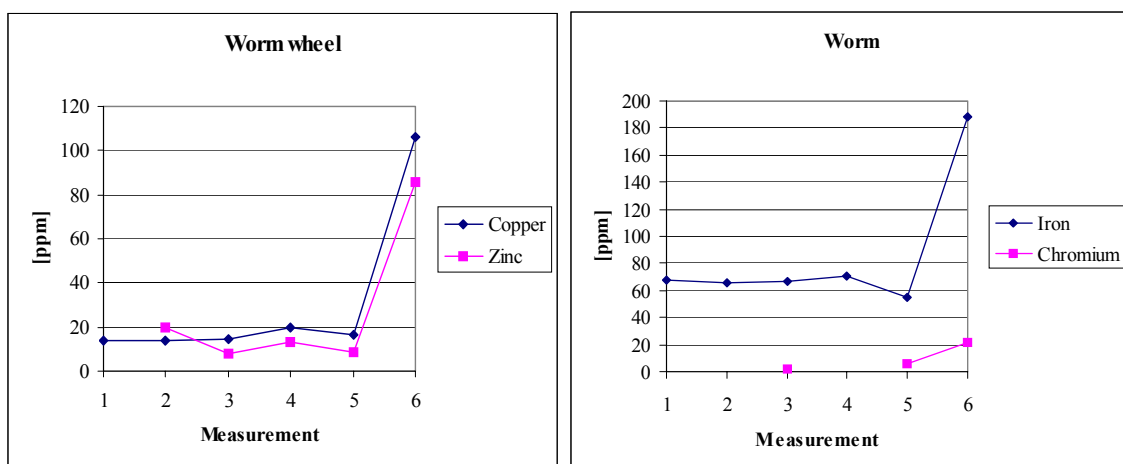
Nykyinen kunnonvalvontajärjestelmä perustuu neuroverkkoperustaiseen päättelyyn. Neuroverkko on oppiva järjestelmä, joka tunnistaa erilaiset toimintatilat, joista mainittakoon tyhjä tai täysi senkka, nosto, lasku, seis, kiihdytys, vakionopeus, hidastus ja jouten. Lisäksi tämänhetkinen järjestelmä tunnistaa myös erilaiset käyntitilat, kuten normaalikäynnin, häiriö- ja vikatilanteen.

Panostusnosturin pää- ja apunostokoneistojen vaihteistot kuuluvat kylpyvoitelun piiriin. Vaihteiston voiteluöljylle tehdään kulumametallianalyysi noin kolmen kuukauden välein. Tällöin öljynäytteestä tutkitaan kolmen eri metallin eli kromin, kuparin ja raudan kokonaispitoisuuksia laboratoriomittauksilla. Tulokset ilmoitetaan miljoonasosina eli ppm:nä (mg/kg). Öljyanalyysien tarkoituksena on todeta öljyn käyttökelpoisuus ja mahdolliset toimenpidetarpeet, kuten öljyn suodatus tai sen vaihto.

3.1 Öljyanalyysit

Öljyssä tapahtuu käytönaikana fysikaalisia ja kemiallisia muutoksia, joita tutkitaan tekemällä analyysijä online-laitteilla ja laboratoriotutkimuksien avulla. Öljyyn voi tulla kulumishiukkasia voideltavista koneenosista ja voitelujärjestelmästä. Lisäksi sen ulkopuolelta kulkeutuu vettä ja muita epäpuhtauksia, kuten hiekkaa, metallipölyä ja tuotantoprosesseista peräisin olevia tuotteita [3].

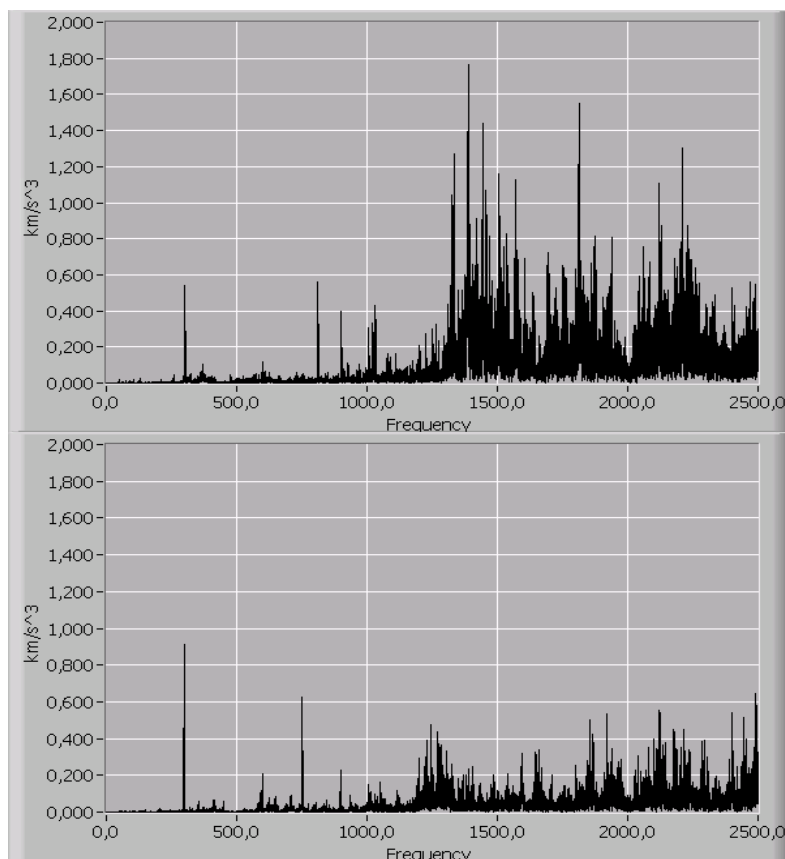
Öljyanalyysit ja värähtelymittaukset ovat kaksi hyvin yleistä tekniikkaa koneiden kunnonvalvonnassa ja vikojen tunnistamisessa. Erikseen käytettyinä näillä tekniikoilla voidaan diagnosoida vain noin 30–40 % kaikista vioista [4]. Näiden mittausten samanaikaisesta käytöstä on lähteessä [5] esimerkki kierukkavaihteesta, jonka öljynäytteestä tutkittiin kulumismetallien pitoisuuksia lähes kahden vuoden ajan.



Kuva 3. Tyypillisten kulumismetallien pitoisuudet kierukkapyörästä (vasemmalla) ja kierukasta (oikealla) [5].

Kuvasta 3 havaitaan, että kulumismetallien pitoisuudet ovat kasvaneet moninkertaisiksi alkuarvoihin verrattuna. Tutkimuksessa kävi ilmi, että kuparin ja sinkin pitoisuuksien muutos käyttäytyy samalla tavalla kuin raudan muutos. Tämä havainto selittyy sillä, että kierukkapyörä on valmistettu pronssista, joka sisältää kuparia sekä sinkkiä ja kierukka on teräksestä. Kahden edellisen metallipitoisuuden kasvu on merkinä siitä, että kierukkapyörä on kulunut. Rautapitoisuuden nousu on puolestaan osoitus kierukan kulumisesta. Tästä seuraa, että mikäli halutaan tietää kierukan ja kierukkapyörän kunto, riittää mitata vain raudan ja kuparin pitoisuudet [5].

Toisena tutkimuksen kohteena oli niin ikään kierukkavaihteisto, jonka kuntoa tutkittiin sekä öljyanalyysien että värähtelymittausten avulla. Tutkimuksessa ilmeni, että kierukkavaihteiston öljynäytteessä oleva suuri kuparipitoisuus osoitti kierukkapyörän kuluneisuuden jo hyvin varhaisessa vaiheessa. Tätä johtopäätöstä tuki vaihteistosta suoritettut värähtelymittaukset erityisesti silloin, kun tunnuslukuna käytettiin kiihtyvyyden ensimmäisen aikaderivaatan tehollisarvoa. Kuvan 4 spektreistä havaitaan, että etenkin taajuusalueella 1350–2250 Hz on tapahtunut suuria muutoksia.



Kuva 4. Ylempi kierukkavaihteiston \ddot{x} -spektreistä on ennen korjausta ja alempi korjauksen jälkeen [5].

Yhdistämällä öljyanalyysien ja värähtelymittausten tuloksia sekä käyttämällä niiden suhteellisia muutoksia vertailupohjana saavutetaan luotettavaa tietoa esimerkiksi vaihteen kunnosta. Tällöin on mahdollista ilmaista vaihteen kunto pelkästään yhdellä dimensiottomalla tunnusluvulla [5].

Fil. maist. Pekka Vähäoja tutkii tekeillä olevassa väitöskirjassaan mm. tarkasteltavan nosturin vaihteistosta otettuja öljynäytteitä. Näytteitä otetaan vuodessa 3–4 kertaa ja näytteenottoa on tarkoitus jatkaa vuoden 2005 syksyyn saakka. Tätä kirjoitettaessa näytteitä on otettu kahtena ajankohtana eli huhtikuussa ja elokuussa. Niistä on analysoitu yleisimpien metallien eli raudan, kromin, nikkelin, kuparin ja sinkin pitoisuudet sekä fosforipitoisuus. Lisäksi näytteistä on määritetty myös kiintoainepitoisuus ja tutkittu suodatettuja hiukkasia mikroskoopilla. Vähäojan tekemissä analyyseissä on ilmennyt, että pohjois- ja eteläpuolen vaihteistojen öljynäytteissä on hieman eroa ja metallipitoisuuksissa on tapahtunut pieniä muutoksia. Näistä tutkimustuloksista on odotettavissa tarkempia tietoja vuonna 2005 ilmestyvässä julkaisussa.

4. Värähtelyjen mittaaminen

Värähtelymittaukset ovat eräs menetelmä, jota käytetään ennakoivassa kunnossapidossa. Niiden käyttökelpoisuus perustuu siihen, että lähes kaikki koneet ja tärisevät eriasteisten vikojen takia. Tulkitsemalla oikein koneen aiheuttamaa tärinää on mahdollista arvioida erilaisten vikojen kehittyminen.

Värähtelymittauksissa käytetään yleisesti pietsosähköistä kiihtyvyyssanturia, jonka toiminta perustuu sähkövarauksen muodostumiseen pietsosähköisen materiaalin pintojen välille, kun materiaali joutuu mekaaniseen kuormituksen. Kiihtyvyyssanturin toiminta pohjautuu Newtonin toiseen lakiin $ma = F$. Sen toimintaperiaate on yksinkertainen, vaikka anturi sisältääkin useita eri komponentteja. Kiihtyvyyssantureiden yleisimpiä tyyppisiä ovat pietsosähköinen, pietsoresistiivinen ja kapasitiivinen kiihtyvyyssanturi.

4.1 Suoritetut mittaukset

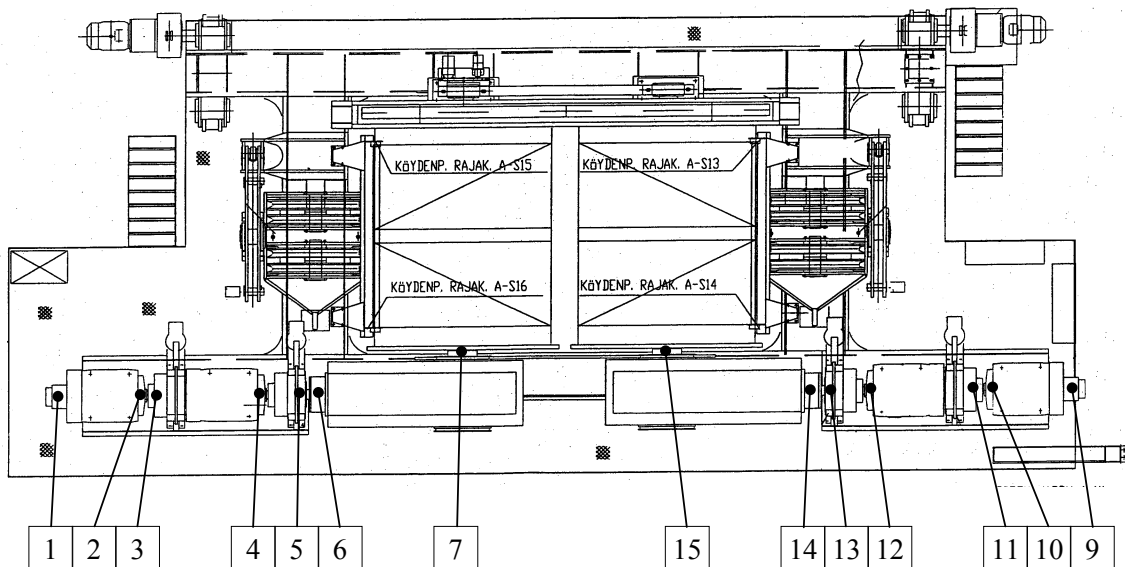
Mittauspisteeksi pyrittiin valitsemaan sellainen kohta, missä värähtelylähde ja anturi olisivat mahdollisimman lähellä toisiaan ja niiden välillä olisi mahdollisimman vähän rajapintoja. Lisäksi anturin vaatima tila oli yhtenä osatekijänä valittaessa parasta mahdollista mittauspistettä. Yleensä pyörivien massojen aiheuttama värähtely siirtyy laakerien kautta runkoon, joten mittauspaikat oli luontevaa valita laakerointikohdista.

Mittauksen aikana nosturi oli normaalissa prosessiajossa, jolloin oli mahdollista tehdä mittaukset nostokoneiston eri ajovaiheista. Mittausten avulla pyrittiin määrittämään nosturin normaalia kuntoa vastaava värähtelykäyttäytyminen.

Eräissä mittauksessa nosturin päänostokoneistoon asennettiin antureita seuraavasti (kuva 5):

- kiihtyvyyssanturit
 - o sähkömoottorin tuulettimen puoleisen laakerin mittaamista varten (1, 3, 9 ja 11)
 - o sähkömoottorin akselin puoleisen laakerin mittaamista varten (2, 4, 10 ja 12)
 - o vaihteiston ensiöakselin laakeroinnin kohdalle sekä pysty- että vaakasuuntaan (6 ja 14)
 - o vaihteiston ulostuloakselin laakeripesän yläpuolelle (7 ja 15)

- takoanturit
 - o pulssi vaihteiston ensiöakselista (5 ja 13).



Kuva 5. Päänostokoneiston anturointi.

Tulosten tarkastelun tarkoituksena oli lähinnä vertailla eri tunnuslukujen soveltuvuutta nosturin toimintatilojen tunnistamiseen. Tunnuslukuina käytettiin yleisesti käytössä olevia tunnuslukuja, kuten nopeuden tehollisarvoa taajuusalueella 10–1000 Hz ja kiihtyvyyden tehollisarvomittauksia eri taajuusalueilla. Lisäksi tutkittiin myös kiihtyvyyden ensimmäisen aikaderivaatan soveltuvuutta.

Taulukossa 1 on esitetty eri tunnuslukujen käyttäytymistä täyden senkan ajotilanteissa. Suhdeluku kertoo kuinka monikertaiseksi kukin tunnusluku on kasvanut täyden senkan laskun ja täyden senkan noston välillä moottorin pyörimisnopeuden ollessa noin 1000 r/min.

Taulukko 1. Eri tunnuslukujen herkkyyksiä, kun vertailupohjana on täyden senkan nosto- ja laskutilanne moottorin kierrosluvun ollessa 1000 r/min.

	v_{rms}	a_{rms}	a_{rms}	a_{huippu}	$jerk_{rms}$	$jerk_{rms}$	$jerk_{huippu}$
mittaus- piste	10-1000 Hz	3-2500 Hz	3-25600 Hz	3-25600 Hz	3-2500 Hz	3-25600 Hz	3-25600 Hz
2	0,93	1,37	1,41	1,23	1,85	1,32	1,23
4	0,93	1,44	1,78	1,49	1,68	1,78	1,52
6	1,03	1,04	1,08	1,14	1,02	1,11	1,11
10	0,99	1,18	1,46	1,25	1,39	1,48	1,3
12	1,12	1,43	1,4	1,32	1,75	1,36	1,27
14	1	1,04	1,05	1,04	1,05	1,06	1,06

Taulukosta 1 huomataan, että nykyä eli jerk eri taajuusalueilla näyttäisi olevan kaikista herkin käytetyistä mittaussuureista tässä tapauksessa. Kiihtyvyyden tehollisarvo taajuudella 3–25 600 Hz vaikuttaisi myös olevan kohtalaisen herkkä tunnusluku.

5. Yhteenveto

Lainsäädäntö määrää teollisuusnostureille suoritettavat käyttöönotto- ja määräaikaistarkastukset. Valmistaja yhdessä asiakkaan kanssa määrittelee nosturin kunnonvalvonnan tarpeet, jotta sen toiminta saataisiin turvalliseksi ja luotettavaksi. Värähtelymittaukset ovat eräs keino valvoa nosturin kuntoa. Kiihtyvyyssignaalista voidaan erottaa tunnuslukuja, jotka toimivat neuroverkon syötteenä koneen toimintatilojen tunnistamiseksi. Vertailemalla eri mittaussuureiden käyttäytymistä kussakin ajotilanteessa löydetään herkimmin reagoiva suure. Yhdistämällä öljyanalyysien ja värähtelymittausten tuloksia saadaan luotettavaa tietoa esimerkiksi vaihteen kunnosta.

Lähteet

- [1] Sosiaali- ja terveysministeriö. Valtioneuvoston päätös työssä käytettävien koneiden ja muiden työvälineiden hankinnasta, turvallisesta käytöstä ja tarkastamisesta. Valtioneuvoston päätös n:o 856/1998.

- [2] SFS-ISO 12482-1. Nosturit. Kunnonvalvonta. Osa 1: Yleistä. Suomen Standardisoimisliitto, 1997. 13 s.
- [3] Antila, K. et al. Teollisuusvoitelu. Rajamäki 2003, KP-Media. 246 s.
- [4] Peng, Z. & Kessissoglou, N. An integrated approach to fault diagnosis of machinery using wear debris and vibration analysis. An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear 255(2003)7–12, s. 1221–1232.
- [5] Vähäoja, P., Lahdelma, S. & Kuokkanen, T. Condition Monitoring of Gearboxes Using Laboratory-Scale Oil Analysis. Proceedings of the 17th International Congress on Condition Monitoring And Diagnostic Engineering Management (COMADEM 2004). Birmingham, UK 2004. S. 104–114.

Lyhyen kantaman radiotekniikat ja niiden soveltaminen teollisuusympäristössä

Ville Särkimäki, Jero Ahola & Risto Tiainen
Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan osasto
Lappeenranta

Tiivistelmä

Tässä artikkelissa esitellään lyhyesti yleisimmät tällä hetkellä käytetyt standardit lyhyen kantaman radiotekniikat ja niiden ominaisuudet. Näiden radiotekniikoiden avulla pystytään toteuttamaan teollisuussovelluksiin antureita, jotka eivät vaadi kaapelointia ja mahdollistavat kohteen vapaan liikkuvuuden. Toisaalta samalla on hyväksyttävä ympäristöstä aiheutuva tiedonsiirron toimivuuteen liittyvä epävarmuus. Artikkelissa esitellään myös sähkökäyttöjen kunnossapitoon ja kunnonvalvontaan liittyviä langattoman tiedonsiirron sovelluksia ja arvioidaan niille soveltuvia toteutustekniikoita.

1. Johdanto

Lyhyen kantaman radiotekniikoilla tarkoitetaan yleisesti ottaen pienitehoisia ($P < 500$ mW) lähetyvastaanottimia, jotka ovat lisenssivapaita. Näiden kantama on rajoittunut tyypillisesti kymmenistä satoihin metreihin riippuen muun muassa sovellusympäristöstä, lähetystehosta ja antenneista sekä käytettyjen radiomoduulien ominaisuuksista. Lisenssivapaille radiolähettimille on varattu taajuuskaistoja, joista käytetyimpiä ovat Euroopassa 433 MHz, 869 MHz ja 2,4 GHz. Näitä taajuuskaistoja hyödyntävistä tekniikoista tunnetuimpia ovat standardit IEEE 802.11 (WLAN) ja Bluetooth. Ne sisältävät fyysisen tason lisäksi myös protokollapinon.

Lyhyen kantaman radiotekniikoiden käyttö on yleistynyt erityisesti mobiili-, ajoneuvo- ja kuluttajasovelluksissa. Esimerkkinä tällaisista ovat tietokoneen langattomat lisälaitteet, puhelinten Bluetooth-moduulit, ajoneuvojen langaton keskuslukituksen ja hälytysjärjestelmän ohjaus sekä erilaiset kotiautomaatiojärjestelmät. Suurten markkinoiden sekä useiden valmistajien ansiosta toteutukseen tarvittavien radiomoduulien integrointiaste on kasvanut ja niistä on tullut hinnaltaan edullisia. Samanaikaisesti on kehitetty pieneen tilaan mahtuvia antennimoduuleja. Syinä tekniikoiden käytön yleistymiseen ovat muun muassa niiden mahdollistama kohteen liikkeen vapaus, yksinkertainen ja edullinen asennettavuus sekä myös osaltaan standardit ja avoimet tiedonsiirtoprotokollat, jotka mahdollistavat kaikkien samaa protokollaa käyttävien laitteiden keskinäisen kommunikoinnin.

Lyhyen kantaman radiotekniikoihin perustuvia sovelluksia on toteutettu myös teollisuuden ja kaupan käyttöön. Tunnetuimpia sovelluskohteita ovat esimerkiksi nosturin ohjaus, siirreltävät mittausjärjestelmät ja erilaiset kannettavat päätelaitteet, joista esimerkkinä on langaton viivakoodin lukulaite kaupan sovelluksiin. Älypuhelimet ja PDA-laitteet ovat viime vuosina kehittyneet näytön, muistin, prosessointikyvyn, käyttöjärjestelmän ja standardien ohjelmistorajapintojen sekä lyhyen kantaman standardiradiotekniikoiden tuen osalta. Tämän ansiosta niistä on tullut varteenotettavia käyttöliittymiä ja tiedonkeruulaitteita useille teollisuustoimilaitteille. On nähtävissä, että jatkossa lyhyen kantaman radiotekniikoiden teollisuussovellusten määrä kasvaa. Yhtenä mahdollisena sovelluskohteena tekniikoille on sähkökoneiden ja -käyttöjen kunnossapidon ja kunnonvalvonnan sovellukset.

2. Lyhyen kantaman radiotekniikat

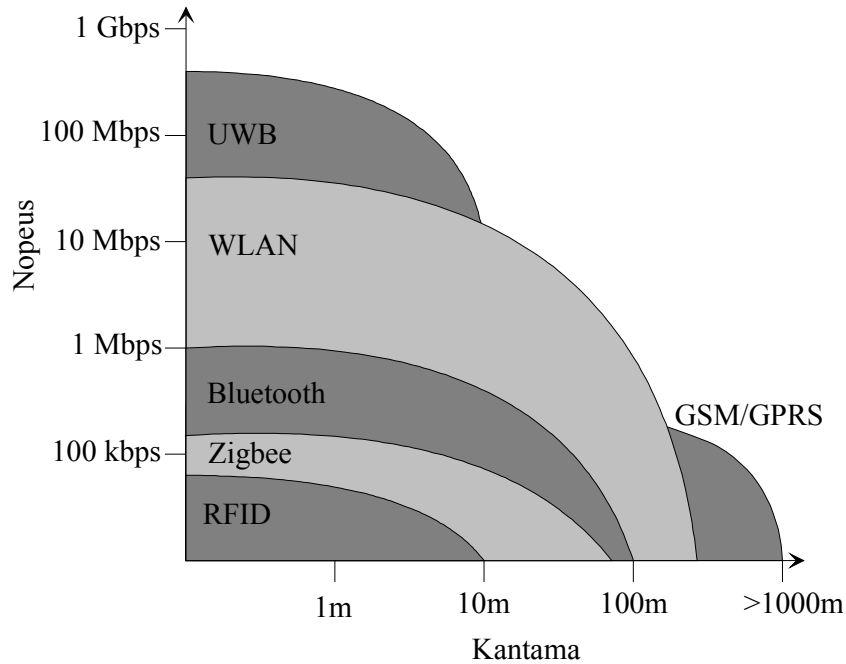
Tässä kappaleessa käsitellään lyhyesti yleisimmät nykyiset ja tulossa olevat standardisoidut lyhyen kantaman radiotekniikat. Tämän lisäksi saatavilla on standardoimattomia radiopiirejä, jotka vaativat sovelluskohtaisen protokollapinon. Lisäksi esitellään lyhyesti GSM/GPRS, joka ei kuulu lyhyen kantaman radiotekniikoiden joukkoon, mutta se soveltuu esimerkiksi yksittäisen kohteen etädiagnostiikan toteuttamiseen. Tämän standardin toteuttavia moduuleja on runsaasti tarjolla. Tällä hetkellä ehdottomasti yleisimmät lyhyen kantaman radiotekniikat ovat Bluetooth ja IEEE 802.11b, jotka molemmat toimivat samalla 2,45 gigahertsin ISM-kaistalla. Näiden lisäksi uutena standarditekniikkana on tulossa markkinoille Zigbee. Sen etuina luvataan Bluetoothiin verrattuna pientä tehonkulutusta ja edullista moduulin hintaa. Taulukkoon 1 on koottu edellä mainittujen teknologioiden ominaisuuksia.

Lyhyen kantaman radiotekniikoihin voidaan lukea myös RFID (Radio Frequency Identification). Se on geneerinen termi, jolla tarkoitetaan esineiden ja ihmisten tunnistamista radiotekniikalla. RFID ei suoranaisesti tarkoita mitään tiettyä tekniikkaa. Sen toiminta perustuu lukulaitteeseen ja aktiiviseen tai passiiviseen tunnistesiruun. Tällä hetkellä RFID-tekniikan pääsovelluskohteena on logistiikkaketjujen hallinta ja se toimii pääasiallisesti viivakoodin korvaajana. On nähtävissä, että jatkossa tekniikan sovelluskohteeksi tulee informaation liittäminen objektiin. Tekniikka mahdollistaa myös kirjoitettavat tunnistet ja erilaiset edulliset, jatkuvaa tehosityöttöä vaatimattomat anturit. Tunnistinsiruja ja lukulaitteita on saatavilla ja kehitteillä taajuuskaistoille 125 KHz, 13,56 MHz, 868–915 MHz, 2,45 GHz ja 5,4 GHz. Toimintaetäisyys ja tiedonsiirtonopeus riippuvat käytetystä taajuuskaistasta ja tekniikasta. Tiedonsiirtonopeus on maksimissaan satoja kilotavuja sekunnissa ja tiedonsiirtoetäisyys senttimetreistä muutamiin kymmeneen metriin. Passiiviset tunnistesirut eivät sisällä teholähdettä, vaan saavat tarvitsemansa toimintaenergian lukijalaitteen tuottamasta sähkömagneettisesta kentästä. Tällöin toimintaetäisyys on maksimissaan muutamia metrejä. Aktiiviset sirut sisältävät pariston ja radiolähtetimen, mikä mahdollistaa pidemmät toimintaetäisyydet, mutta rajoittaa sirun toimintaikää.

Taulukko 1. Standardoituja lyhyen kantaman radiotekniikoita ja niiden ominaisuuksia [1, 2, 3, 4].

Tekniikka	WLAN [IEEE 802.11 (a,b,g)]	Bluetooth	Zigbee	GSM/ GPRS/ EDGE
Käyttötarkoitus	LAN, (kuva, data, ääni)	Kaapelin korvaaminen, laitteiden välinen tiedonsiirto	Anturitason tiedonsiirto ja anturiverkot	Yksittäisen laitteen etädiagnoosiikka, M-to-M-liittymät
Toimintataajuus	2,4 GHz 5,4 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz, 915 MHz ja 868 MHz (Eurooppa)	900 MHz ja 1800 MHz (Eurooppa)
Maksimi Tiedonsiirtonopeus	11 & 54 Mbps (2,4 GHz) (b, g) 54 Mbps (5,4 GHz) (a)	1 Mbps, maksimi datanopeus 723 kbps	250 kbps (2,4 GHz) 40 kbps (915 MHz) 20 kbps (868 MHz)	9,6 kbps (GSM) 115 kbps (GPRS) 384 kbps (EDGE)
Verkon koko (solmupisteitä)	Useita	7	Suuri (65536)	1
Kantama (hyvissä olosuhteissa)	100 m (2,4 GHz) 50 m (5,4 GHz)	100 m (luokka 1) 10 m (luokka 2) 1 m (luokka 3)	100 m	1000 + m
Hyvää	Nopeus, saatavuus, standardi	Integroiminen laitteisiin, saatavuus, standardi	Tehonkulutus, hinta, standardi	Kantomatka, saatavuus, standardi
Huonoa	Tehonkulutus, hinta, integroiminen laitteisiin	Laajempien anturiverkkojen luonti monimutkaista	Saatavuus, nopeus, tekniikka tulossa vasta	Nopeus

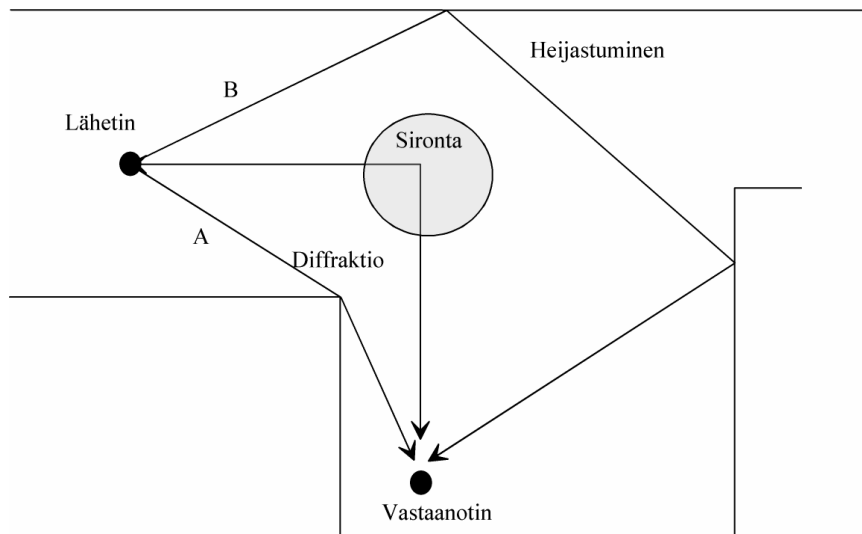
Edellä mainittujen tekniikoiden lisäksi on olemassa myös muita standardoituja ja valmistajakohtaisia tekniikoita, kuten HomeRF ja WirelessUSB. Useat valmistajakohtaiset tekniikat ja protokollat ovat ominaisuuksiltaan verrattavissa Bluetoothiin ja Zigbeeeseen. Kuvassa 1 on havainnollistettu joidenkin tekniikoiden tiedonsiirtonopeuksia ja toimintaetäisyyksiä. Kuva 1 on ainoastaan suuntaa antava, ja on muistettava että etäisyyteen vaikuttavat huomattavasti toimintaympäristön ominaisuudet, käytetyt antennit ja lähetysteho. Myös tiedonsiirtonopeudet ovat suuntaa antavia. Valmistajakohtaisia lyhyen kantaman lähetin-vastaanottimia (SRD, Short Range Devices) on saatavilla useita erilaisia, mutta pääpiirteittäin ne voitaisiin sijoittaa kuvassa 1 kattamaan sama alue kuin Bluetooth.



Kuva 1. Lyhyen kantaman radiotekniikoiden vertailua tiedonsiirtonopeuden ja kantaman suhteen [4].

3. Teollisuusympäristö radiotiedonsiirron kannalta

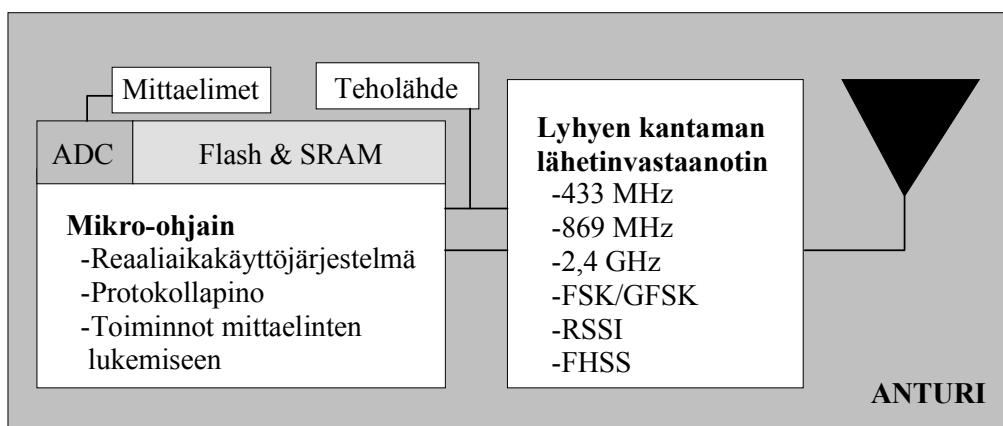
Teollisuusympäristö on hankala radiotiedonsiirrolle. Laitteille luvatut maksimikantamat koskevat vapaata tilaa, mitä olettaa ei voida useimminkaan soveltaa teollisuusympäristöön. Radioaaltojen etenemistä ja lyhyen kantaman tekniikoita teollisuusympäristössä on tutkittu muun muassa artikkeleissa [5, 6, 7]. Tiedonsiirtoyhteyden laatuun vaikuttavat muun muassa kohina, kanavan vaimennus sekä erityisesti teollisuusympäristössä signaalin monitie-eteneminen (kuva 2). Siinä sama lähetetty signaali saapuu vastaanottimelle eripituisia reittejä pitkin. Vastaanottimella signaali summautuu, ja reittien pituuserojen takia summautuminen voi olla destruktiivista tai konstruktivistista. Tämän takia yhteyden toimivuus voi olla erittäin herkkä vastaanottimen sijainnille. Lisäksi tiedonsiirtotien ominaisuudet eivät kestä vakiona esimerkiksi teollisuusympäristössä liikuvien ihmisten takia [8]. Tämän takia langattoman tiedonsiirron soveltaminen esimerkiksi prosessinohjaussovelluksiin voi olla ongelmallista. Ongelmaa voidaan kiertää tekemällä järjestelmästä redundanttinen siten, että tiedonsiirtoon järjestelmien välillä on vaihtoehtoisia reittejä ja protokolla tukee automaattista tiedonsiirtoreitin määrittämistä.



Kuva 2. Radiosignaalin etenemistavat sisätiloissa: heijastuminen, sironta ja diffraktio [4].

4. Langattoman anturin rakenne

Yksinkertainen langaton mitta-anturi koostuu toimintoja ohjaavasta mikro-ohjaimesta ja siihen kytketystä lyhyen kantaman radiomoduulista sekä tarvittavista mitta-elimistä ja tehonsyötöstä. Lohkokaaviokuva tämänkaltaisesta anturista on esitetty kuvassa 3. Mitta-elimet voivat sähkökäyttöjen kunnonvalvonnan tapauksessa olla esimerkiksi kiihtyvyy-, lämpötila- tai kosteusantureita, joilta saatava mittaustieto on joko digitaalinen tai analoginen signaali. Mikro-ohjaimet sisältävät usein integroidun A/D-muuntimen, jonka ominaisuudet riittävät useimpiin sovelluksiin. Mikro-ohjain ohjaa lyhyen kantaman lähetinvastaanotinta ja huolehtii osaltaan tarvittavan tietoliikenneprotokollan sekä anturin mitaussovelluksen ajamisesta. Mikro-ohjain voi ajaa esimerkiksi myös analysointi- ja luokittelualgoritmeja. Anturiin kytketty antenni voi olla sovelluksesta riippuen piirilevyllä syövytetty, ulkopuolinen tai kotelon kanteen liimattu antenni tai vaihtoehtoisesti pieneen tilaan mahtuva keraaminen antennimoduuli.



Kuva 3. Lohkokaavio yksinkertaisen langattoman anturin rakenteesta [4].

Anturin tehonsyötönärkevä järjestäminen on oleellista erityisesti teollisuussovelluksissa. Usein langattomaan tiedonsiirron soveltamisen syy on se, että vältetään uudelta kaapeloinnilta ja toisaalta mahdollistetaan anturin vapaa liikkuminen ja nopea asennus. Langatonta tekniikkaa hyödyntävien antureiden pitäisi olla myös huoltovapaita. Tämä asettaa vaatimuksensa tehonsyötön toteuttamiselle ja ainakin kiinteissä asennuksissa käytännössä estää paristokäyttöisyyden. Teollisuustoimilaitteiden diagnostiikassa anturin tarvitsema teho pystytään usein kuitenkin ottamaan suoraan toimilaitteilta. Esimerkiksi sähkökoneiden tapauksessa yhtenä vaihtoehtona on tehon ottaminen induktiivisesti moottorin syöttökaapelista.

5. Sovelluskohteita sähkökäyttöjen kunnonvalvonnassa ja etädiagnostiikassa

Sähkökäyttöjen kunnonvalvontaa ja siihen liittyvää tiedonsiirtoa sekä konsepteja on käsitelty muun muassa lähteissä [9, 10, 11, 12, 13]. Yhteenveto langattoman tiedonsiirron sovelluskohteista ja käytöstä sähkökoneiden ja käyttöjen kunnonvalvonnassa ja kunnossapitotoiminnassa on koottu taulukkoon 2. Sovellusten tarvitsema tiedonsiirtoetäisyys ja tiedonsiirtonopeus on estimoitu, ja tämän perusteella on arvioitu kuhunkin sovellukseen sopivia tekniikoita. Lyhenne SRD (Short Range Device) tarkoittaa nyt yleistä valmistajakohtaista radiopiiriä tai järjestelmää. Kunnonvalvonnan sovelluksissa tiedonsiirtonopeus riippuu muun muassa siitä, miten paljon signaalin käsittelyä ja analysointia toteutetaan anturitasolla.

Taulukko 2. Kunnonvalvonnan ja kunnossapidon sovelluksia ja niiden toteuttamiseen soveltuvia langattomia tiedonsiirtotekniikoita [4].

Sovellus	Etäisyys	Kapasiteetti	Tekniikka	Muuta
Yleisen kunnonvalvontaan toimilaitetasolla tarvittavan anturiverkon muodostaminen	1–20 m	1–50 kbps	1. SRD 2. Zigbee 3. Bluetooth	- Pieni tehonkulutus vaatimuksena - Teho toimilaitteelta
Tiedonsiirto anturiverkon ja ylemmän tason tietojärjestelmän välillä	10–100 m	>10 kbps	1. WLAN 2. Bluetooth	
Pyörivässä laitteessa oleva anturi, esimerkiksi sähkökoneen roottorilla sijaitseva mittalaite	< 1 m	1–10 kbps	1. SRD 2. Zigbee	- Tiedonsiirto roottorilta staattorille - Teho toimilaitteelta
Taajuudenmuuttajan parametrisointi ja tiedonkeruu PDA-laitteella tai älypuhelimella	<10 m	1–50 kbps	1. Bluetooth 2. Wlan	- Vaatii sovelluksen päätelaitteelle
Toimilaitteen identifiointi PDA-laitteella tai älypuhelimella	< 1 m	<10 kbps	RFID	- Käytetystä RFID-tekniikasta riippuen etäisyys jopa +10 m
Yksittäisen toimilaitteen tai laiteryhmän etädiagnostiikan toteuttaminen	> 1 km	<50 kbps	GSM/GPRS	
Videovalvonta	max. 100 m	>100 kbps	WLAN	
Toimilaitteiden ohjaus kentällä, esimerkiksi nosturi	10–100 m		1. SRD	- Vaatimuksena varma ja viipeetön tiedonsiirto - Tiedonsiirtokapasiteetti ei ratkaiseva
Yhteys tehtaan tietojärjestelmään tai Internetiin PDA-laitteella tai älypuhelimella	>10 m	>10 kbps	1. GPRS 2. WLAN 3. Bluetooth	
Siirrettävä langaton mittausjärjestelmä, yhteys antureilta mittausietokoneeseen tai tehtaan tietoverkkoon	1–100 m	10–50 kbps	1. Bluetooth 2. WLAN 3. SRD	- Nopeasti asennettavissa toimilaitteeseen - Paristokäyttöiset anturit
Siirrettävä langaton anturointi, yhteys kannettavaan päätelaitteeseen tai dataloggeriin	<10 m	10–50 kbps	1. Bluetooth 2. WLAN 3. SRD	- Nopeasti asennettavissa toimilaitteeseen - Paristokäyttöiset anturit

6. Yhteenveto

Tässä artikkelissa muodostettiin katsaus käytössä oleviin lyhyen kantaman radiotekniikoihin ja niiden ominaisuuksiin. Yleisesti ottaen ne voidaan jakaa standardoituihin ja standardittomiin. Standardoidut tekniikat ovat standardoituja sekä fyysisen kerroksen, että tiedonsiirtoprotokollan osalta. Tällaisista tekniikoista esimerkkinä on Bluetooth. Standardoimattomat radiomoduulit (SRD) määrittävät usein ainoastaan fyysisen kerroksen, eli yksinkertaisimmillaan sen, miten informaatio moduloidaan kanta-aaltoon ja mikä on käytetty kanta-aaltotaajuus. Tarvittava tiedonsiirtoprotokolla on näiden laitteiden tapauksessa suunniteltava sovelluskohtaisesti. Sähkökäyttöjen kunnonvalvonnan ja kunnossapidon sovelluksissa voidaan soveltaa näitä molempia tekniikoita. Toimilaitetasolla ja edullisten antureiden tapauksessa voi olla järkevää käyttää pelkkiä standardoimattomia tekniikoita suljetun anturiverkon muodostamiseen. Toimilaitteiden tarjoamissa liittymissä ulkomaailmaan on puolestaan todennäköisesti järkevää soveltaa standardeja tekniikoita. Tällöin mahdollistetaan päätelaitteiden, kuten esimerkiksi älypuhelimien ja PDA:n soveltaminen käyttöliittyminä ja tiedonkeruu- tai analysointiyksiköinä. Lisäksi tämä mahdollistaa järjestelmän liittämisen muihin tietojärjestelmiin. Teollisuuskäyttöä ajatellen älypuhelin ja PDA tarjoavat standardit ohjelmointirajapinnat sovelluskehitystä varten. Tällä mahdollistetaan laitteistoriippumaton sovelluskehitys ja sovelluskoodin kierrätettävyys.

Lähteet

- [1] Sairam, K.V.S.S.S.S., Gunasekaran, N. & Redd, S.R. Bluetooth in Wireless Communication, IEEE Communications Magazine, June 2002.
- [2] ZigBee Alliance (viitattu 22.11.2004). <http://www.zigbee.org>
- [3] GSM World (viitattu 22.11.2004). <http://www.gsmworld.com/technology/index.shtml>
- [4] Särkimäki, V. Lyhyen kantaman radiolähetimien soveltuvuus sähkökäyttöjen kunnonvalvonnan ja etädiagnostiikan tiedonsiirtotarpeisiin. Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2004.
- [5] Hashemi, H. The indoor radio propagation channel. Proceedings of the IEEE, Vol. 81, Issue 7, July 1993, s. 943–968.

- [6] Kjesbu, S. & Brunsvik, T. Radiowave propagation in industrial environments, Industrial Electronics Society, 2000. IECON 2000. 26th Annual Conference of the IEEE, Vol. 4, 22–28 Oct. 2000. S. 2425–2430.
- [7] Bilstrup, U. & Wiberg, P.-A. Bluetooth in industrial environment, Factory Communication Systems, 2000. Proceedings. 2000 IEEE International Workshop on 6–8 Sept. 2000. S. 239–246.
- [8] Andersen, J.B., Rappaport, T.S. & Yoshida, S. Propagation measurements and models for wireless communications channels. Communications Magazine, IEEE, Vol. 33, Issue 1, Jan. 1995, s. 42–49.
- [9] Ahola, J. Applicability of Power-line Communications to Data Transfer of On-line Condition Monitoring of Electrical Drives. Dissertation, Lappeenranta University of Technology, Finland, 2003. ISBN 951-764-783-2
- [10] Lindh, T., Ahola, J., Kamarainen, J.-K., Kyrki, V. & Partanen, J. Bearing Damage Detection Based on Statistical Discrimination of Stator Current. In: Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (Atlanta, Georgia, USA, 2003).
- [11] Rautianen, A.-L., Tiainen, R., Ahola, J. & Lindh, T. A Low-Cost, Measurement and Data Collection System for Electric Motor Condition Monitoring. Norpie 2004, 12–14 June 2004, Trondheim, Norway.
- [12] Spatenka, P., Lindh, T., Ahola, J. & Partanen, J. Requirements for Embedded Analysis Concept of Bearing Condition Monitoring. Norpie 2004, 12–14 June 2004, Trondheim, Norway.
- [13] Lindh, T., Ahola, J., Spatenka, P. & Rautiainen, A.-L. Automatic bearing fault classification combining statistical classification and fuzzy logic. Norpie 2004, 12–14 June 2004, Trondheim, Norway.

Monilähteisten mittaustietojen yhdistäminen prognooseiksi ja päätöksenteon tueksi

Jarmo Keski-Säntti
VTT Elektroniikka
Oulu

Tiivistelmä

Teollisuudessa tuotetaan yhä enemmän mittaustietoja yhä useammassa kohteessa. Yksi keskeisistä ongelmista on niistä saatavien suurten tietomassojen hallinta ja hyödyntäminen. Tuotannon laitteista ja valmistettavista tuotteista saatava reaaliaikainen informaatio mahdollistaa nykyistä kokonaisvaltaisemman tuotantolinjan tarkkailun ja ohjauksen. Kokonaisvaltaiseen tarkkailuun ja ohjaukseen pääsemiseksi tarvitaan kuitenkin tietotulvan hallintaa. Muutoin uhkana on sekä olennaisen tiedon katoaminen laajeneviin järjestelmiin että kokonaisuuden hahmottamisen ongelmallisuus.

1. Johdanto

Erilaisen mittausinformaation tuottaminen lisääntyy jatkuvasti kaikkialla, kuten myös teollisuudessa, jolloin mahdollisuudet sen tehokkaaseen käyttöön kasvavat. Tämä ei ole kuitenkaan mikään yksiselitteinen tehtävä, sillä usein tarvittava mittaustieto on hajallaan tai sen käytännöllinen yhdistäminen on hankalaa johtuen esimerkiksi erilaisista tiedostomuodoista tai siitä ettei tietoja osata yhdistää toisiinsa oikealla tavalla. Voidaan puhua monilähteisestä mittaustiedosta, kun tarkasteltavissa järjestelmissä on useita mittaustiedon tuottajia, kuten prosessimittaukset, kone- ja laitekohtaiset mittaukset, analysaattoritiedot, laboratoriomääritykset, historiatiedot, laitetoimittajien referenssitiedot, ympäristön mittaukset, käyttäjätiedot, lähteitä joiden tallennustilanne- ja muoto voivat olla erilaisia.

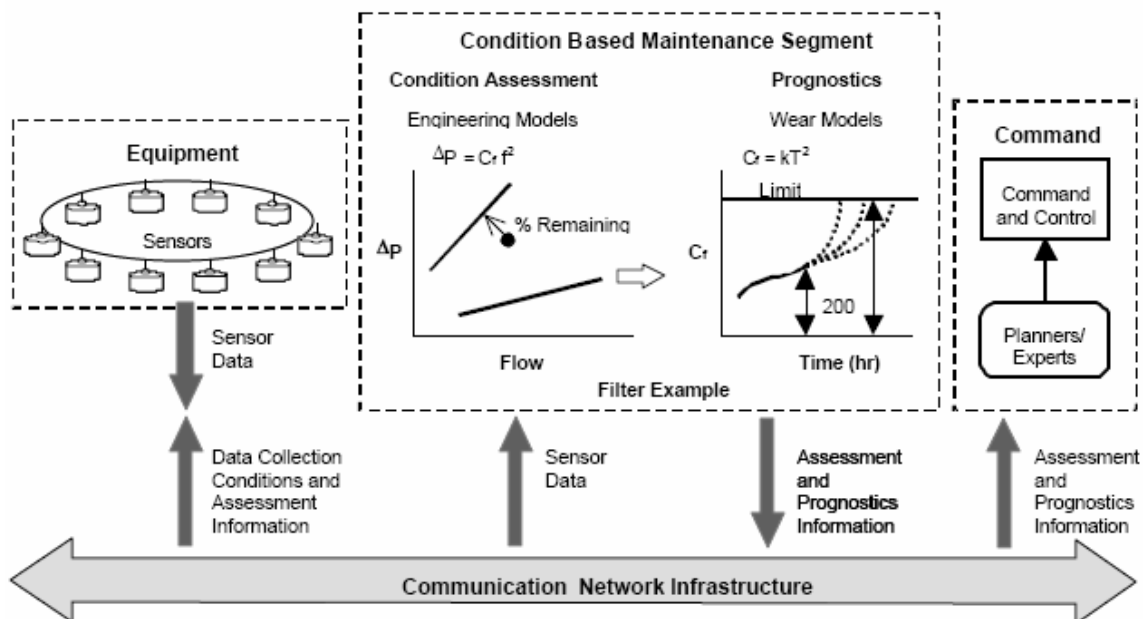
Myös mittausfrekvenssit ja mittaustarkkuudet vaihtelevat huomattavasti kohteesta riippuen. Vaikka teollisuuslaitoksissa pitää pystyä hyödyntämään laitekohtainen informaatio mahdollisimman hyvin, entistä tärkeämmäksi muodostuu kokonaisuuden hallinta sekä olennaisen tiedon löytäminen jo ennen kuin ongelmatilanteita pääsee muodostumaan.

Prognoosien tuottaminen on ollut erikoisesti lääketieteessä yleinen menetelmä, jossa ennakoidaan taudin kehittymistä sen nykyisen tilanteen, aiemman kehityksen sekä vertaistapausten perusteella. Samankaltaista tekniikkaa voidaan hyödyntää myös teollisuuden koneissa, laitteissa ja prosesseissa ennakoimaan niiden vikaantumista ja tulevaa

käyttäytymistä. Pohjana prognoosien tuottamiselle on mittaustiedot, historiatiedot, mallit ja tavoitteet, joihin perustuen suoritetaan analyyseja joiden tuloksia voidaan käyttää hyödyksi päätöksenteossa. Yksinkertaistettuna tietojen yhdistämisessä tuotannon yksittäisiltä laitteilta tulevasta ”raakadatasta” pitää poimia, yhdistää ja abstrahoida koko tuotannon ohjaamisen kannalta olennainen informaatio päätöksenteon tueksi.

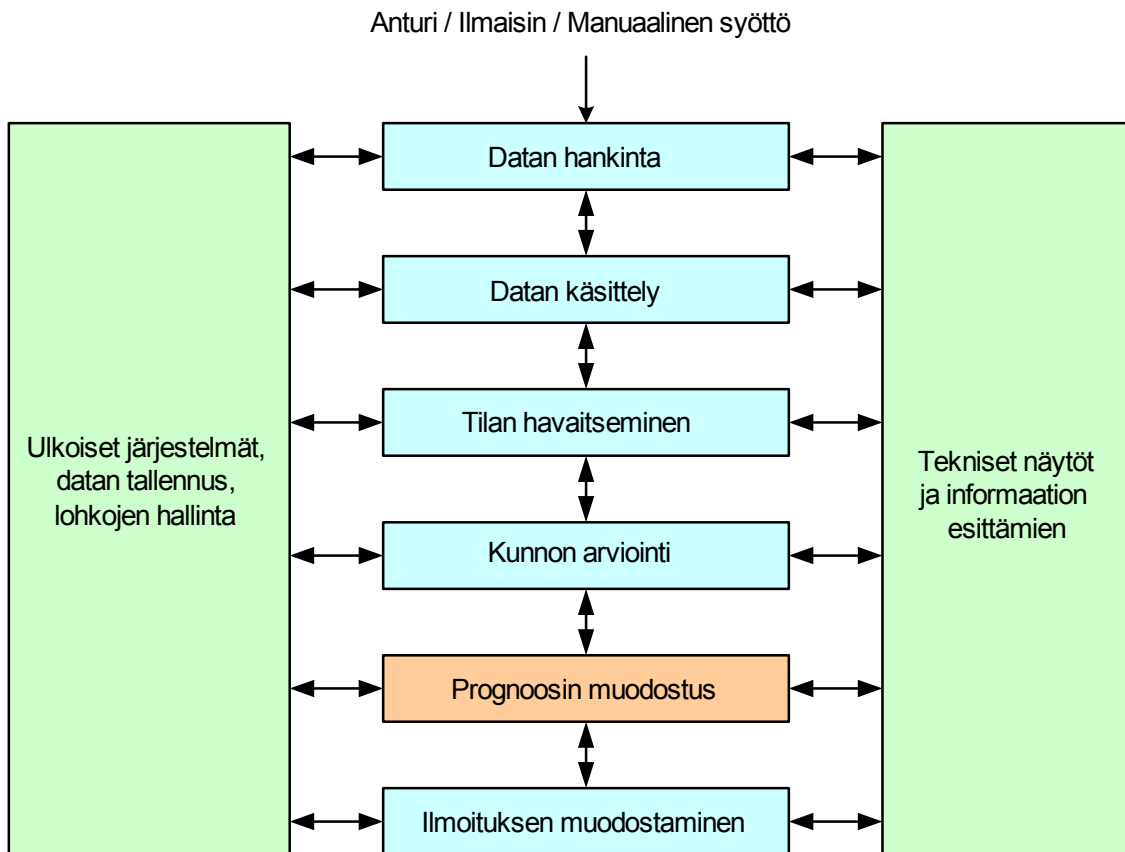
2. Prognoosien rooli teollisuuden järjestelmissä

Prognoosien käyttö erilaisten koneiden ja laitteiden kunnonvalvonnassa on koko ajan lisääntymässä. On havaittu että laitteiden yllättäviä vikaantumisia esiintyy edelleen, vaikka eri osille ja toiminnoille on olemassa tiettyjä tilastollisia käyttöaikoja, jotka eivät ole ennen vikaantumista kuluneet. Toisaalta toiset juuri samanlaiset laitteet saattavat kestää huomattavasti kauemmin ilman merkittäviä vikaantumisia. Syitä huomattaviin osien kestoajojen vaihteluun voi olla useita kuten ympäristö, käyttötavat, valmistuksen virheet ja jopa itse kunnossapito.



Kuva 1. CBM:n eli kuntoon perustuvan kunnossapidon tiedonkulku laivan tiedonhallintaverkostossa [Nguyen 2001].

Prognoosit ovat olennaisena osana kunnonvalvonnan järjestelmissä ja standardeissa, kuten CBM kuvassa 1 [Nguyen 2001] ja ISO:n standardissa ”Koneiden kunnon monitorointi ja diagnostiikka” kuvassa 2 [ISO]. Muita ovat esim. IEEE:n ja MIMOSAn standardit sekä OSACBM (Open System Architecture for Condition-Based Maintenance), joka sisältää omalta osaltaan prognostiikkalohkot [Thurston 2001].

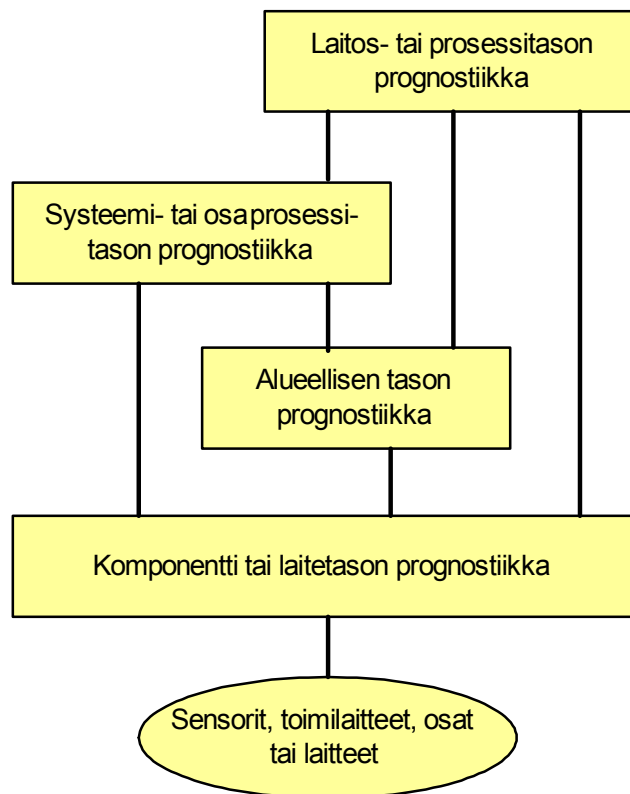


Kuva 2. ISO 13374-1 -standardin mukainen datan prosessointi ja informaation kulun lohkokkaavio [ISO].

Hyvien prognoosien tuottaminen edellyttää tietoa kaikista niistä tekijöistä jotka vaikuttavat jonkin koneen, laitteen tai prosessin toimintaan. Tämä sisältää tietenkin toiminnalliset osat ja niiden kulumisen sekä vanhenemisen, mutta myös ympäristötekijät, käyttötavat ja kunnossapito vaikuttavat. Prognoosi ei ole sama kuin toteutuma ja siihen voidaan vaikuttaa. Laitteen prognoosi voi muuttua jos muutetaan jotain olennaista tekijää riittävästi. Esimerkiksi ympäristön vaikutusta vaikkapa pölyä suodattavalla ilmastoinnilla, jolloin sekä kosteus ja lämpötila ovat stabiilimpia ja vähemmän pölyä sisältäviä. Tästä seuraa että tilassa käytettävän sähkömoottorin toimintaikä voi kasvaa huomattavasti. Yleensä laskenta täytyy suorittaa uudestaan kun prognoosiin vaikuttavia tekijöitä muutetaan.

Luotettavien prognoosien tuottaminen edellyttää seuraavien osa-alueiden täyttymistä. Mittaustietoa on oltava riittävästi ja sen luotettavuus pitää olla tiedossa. Mittausten raakadata pitää pystyä jalostamaan sellaiseen muotoon, että sitä kyetään siirtämään mittauspisteestä analysointiin. Diagnostiikalla määritetään jonkin osan tai laitteen sen hetkinen kunto ja kyky suorittaa toimintoaan. Prognostiikka sen sijaan on ennakoivaa diagnostiikkaa jossa määritetään osan tai laitteen jäljellä olevaa toiminta-aikaa tai sitä aikaväliä jolla se vielä pystyy suorittamaan tehtävänsä. Tästä johtuen ennusteille täytyy olla pohjana diagnostiikkaa tarkempia mittauksia, dataa pitää olla tallennettu riittävän tarkasti

kehityksen muodostamiseksi ja lisäksi pitää olla olemassa myös vertailukelpoista historiadataa, referenssitietoa sekä malleja, jotka kuvaavat niitä ilmiöitä jotka vaikuttavat kohteeseen. Prognoosin tuottaminen on helpompaa, mikäli pystytään muodostamaan ennusteita suppealla määrällä luotettavia mittausmenetelmiä. Mitä enemmän muuttujia täytyy huomioida, sitä hankalammaksi muodostuu virheiden huomiointi samoin kuin laskentamenetelmät.



Kuva 3. Monitasoinen prognostiikka kunnossapidossa [Nguyen 2001].

Prognostiikka voi olla myös monitasoista riippuen kohteesta kuvan 3 mukaisesti. Laitos- tai prosessitason prognostiikkaa tarvitaan kun prognostiikan parametrit tulevat useasta eri systeemistä tai osaprosessista ja vioittuvan osan tai laitteen uskoonpano vaatii toimenpiteitä useissa systeemeissä tai osaprosesseissa. Systeemi- tai osaprosessitason prognostiikkaa käytetään, kun prognostiikan parametreilla huomioidaan koko systeemin tai osaprosessin toimintakyky ja vioittuvan osan tai laitteen uskoonpano vaatii toimenpiteitä koko systeemeissä tai osaprosesseissa. Alueellisen tason prognostiikkaa vaaditaan, kun systeemi tai osaprosessi vaatii alueellista eristämistä tiettyjen toimintatapojen tai kehittämisen johdosta, jolloin taataan muun systeemin toimintakyky eristämisen aikana. Alimman taso prognostiikkaa käytetään, kun laitteen tai osan toimintakyky halutaan varmistaa niin, ettei systeemin toimintakyky häiriinny. Tällöin ennakoitaan mahdollisia korjaustoimenpiteitä niin, että varaudutaan käyttämään korvaavaa laitetta jo ennen, kuin vika on tapahtunut, tai mahdollisesti vikaantuva osa korjataan sopivassa tilanteessa ennen kuin sitä tapahtuu.

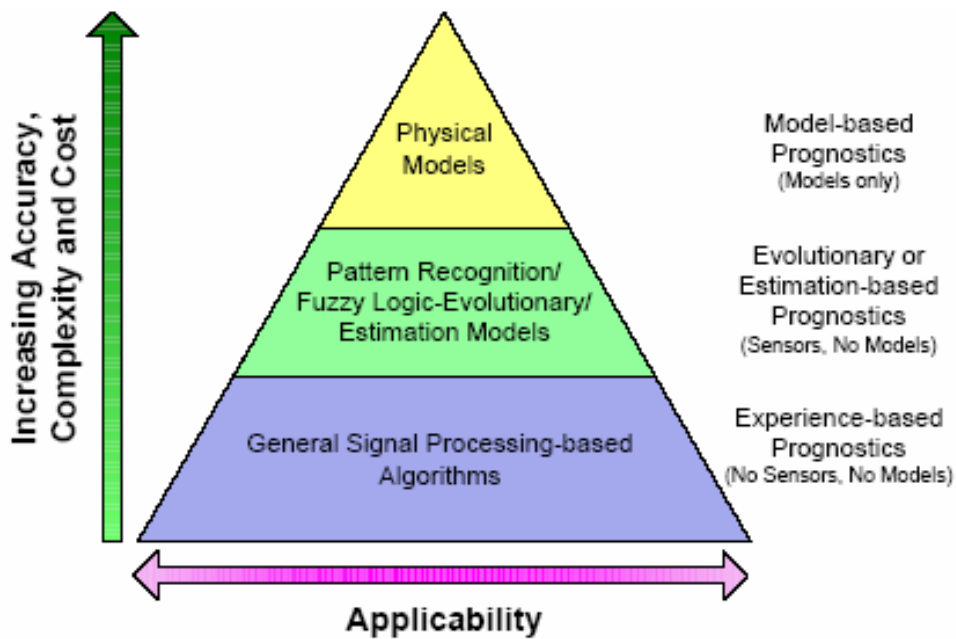
3. Monilähteisten mittaustietojen yhdistäminen prognooseiksi

Kun saadaan tietoa useasta lähteestä, jotka voivat sisältää joko yhdessä tai erikseen tärkeää tietoa laitteen tai prosessin käyttäytymisestä tulevaisuudessa, täytyy olla keinoja kaivaa olennainen tieto esiin ja myös yhdistää niitä. Useasta lähteestä tulevaa tietoa tarkasteltaessa huomio pitää kohdistaa tiedon tarkkuuteen, luotettavuuteen, merkittävyyteen, mahdollisiin ristiriitaisuuksiin ja lopulta siihen, mitä ne yhdessä ja erikseen todella tarkoittavat. Mittaustietojen hankkiminen kannattaa keskittää niihin mittauksiin, jotka kertovat niistä kohteista jotka on todettu kustannus- ja turvallisuusvaikutuksiltaan tärkeimmiksi.

3.1 Mittaustietojen yhdistämisen menetelmiä

Erilaisista analyysimenetelmistä on kerrottu tarkemmin PROGNOS-hankkeen teknologiakartoituksessa, näistä mainittakoon tässä yhteydessä esimerkiksi pääkomponenttiansalyysi (PCA), lineaarinen ja epälineaarinen regressioanalyysi, PLS-regressio, klusteriansalyysi, neuroverkot, esimerkkipohjainen päättely (CBR) sekä bayesilainen mallinnus. Yhdistämällä eri tekniikoita voidaan saada aikaiseksi suunnaton määrä erilaisia laskentamenetelmiä. Näiden tehokkuus on hyvin kohderiippuvaista ja ei välttämättä poikkea paljonkaan yksinkertaisimmilla tekniikoilla saavutetuista tuloksista. Yksinkertaisimmillaan analyysi voi sisältää tilastollisten tunnuslukujen laskentaa ja manuaalista vertailua vikahistorian kesken, mutta mikäli ympäristön häiriöt peittävät vian oireet, niin monimutkaisemmat menetelmät ovat tarpeen.

Puhtaasti mallipohjaisissa prognooseissa ongelmana ovat mm. se, että tietojen yhdistämisessä voidaan käyttää vain niitä arvoja, joita malli sisältää, mallit vaativat suurta panostusta tai ne voivat olla monimutkaisia. Asiantuntijajärjestelmissä hyödynnetään asiantuntijoiden tietämystä muodostamaan mittauksista analyyseja ja toimenpideehdotuksia. Ongelmana ovat menetelmien ja järjestelmien rakentamisen ja ylläpidon työläys, tietämysten ristiriitaisuus, rämettyminen ja pitäytyminen vain tunnettuihin tahtumiin. Kuvassa 4 on ryhmitelty eri lähestymistapoja prognoosien tuottamiseksi suhteessa soveltuvuuteen ja kompleksisuuteen [Thurston 2001].



Kuva 4. Prognosimallien soveltuvuus [Thurston 2001].

Seuraava tapaa on esitetty geneeriseksi prognostiikan moduuliksi [Thurston 2001]. Käytetään tiettyjä standardoituja vaatimuksia prognostiikkamoduulin sisäänmenoiksi ja ulostuloksi. Sisäänmeno käsittää historia datan prognooseista, kunnosta, vioista, tehtävistä ja kunnossapitotoimista sekä malli-informaation ja säästetyn kapasiteetin. Ulostulo sisältää mm. informaation nykykunnosta, jäljellä olevan toiminta-ajan sekä luotettavuustasot eri ennusteille. Prognostiikka algoritmi voi olla geneerinen ja siinä voidaan vertailla historiallisia vikatilasto malleja fyysisiin malleihin.

Yhtenä olennaisena osana prognoosien muodostamisessa on kunnan monitorointi- ja diagnostiikkamoduuli, jossa voidaan käyttää esimerkipohjaista päättelyä eli CBR-tekniikkaa. CBR (Case Based Reasoning) on tekniikka, jossa ”vanhojen” tapausten hyödyntämistä käytetään uusien ongelmien ymmärtämisessä ja ratkaisussa. Voidaan sanoa että menetelmä on älykkäiden järjestelmien, lähinnä asiantuntijajärjestelmien, yleisarkkitehtuuri, joka perustuu älykkyyden mallintamiseen sääntöjoukkojen sijasta konkreettisista tapauksista. Kyseistä tekniikka on tutkittu ja käytetty esim. teollisuusrobottien vikojen havainnassa ja diagnostiikassa [Bengtsson 2004], lentokoneiden kunnossapidossa [MXI 2004], liikkuvien koneiden kuntoon perustuvassa kunnossapidossa [Vachtsevanos 2003] ja asiantuntija tietämyksen kuvaamista tuotannon monitoroinnissa ja diagnostiikassa [Göös 1999].

Monilähteisten tietojen yhdistämistä tarvitaan PROGROS-projektissa esim. Lastauskone-casessa ja Prosessiteollisuuden moottorinohjauksjärjestelmät-casessa. Lastauskone-casessa pyritään parantamaan käytettävyyttä, luotettavuutta ja turvallisuutta kunnossapitotoimenpiteiden oikea-aikaisella kohdistamisella. Tämä edellyttää lastauskoneiden vi-

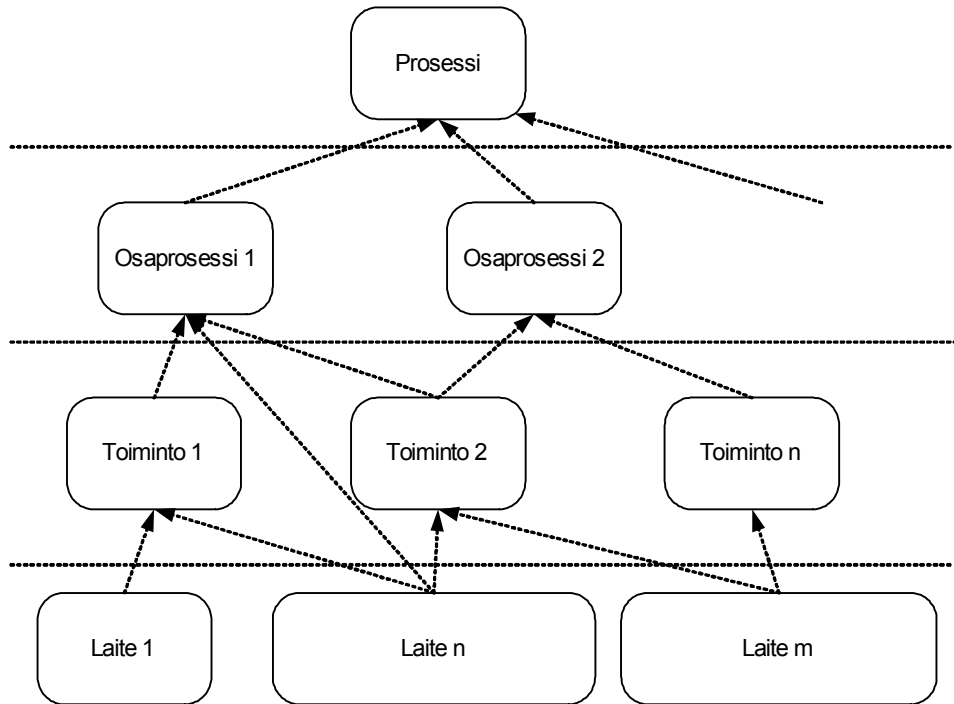
kaantumistapahtumat, peruskorjausajankohdat sekä pääkomponenttien korjausajankohdat ja eliniät ennustamista. Tiedon lähteitä ovat mittaustiedot, käyttäjien kokemusperäinen tieto, huoltotiedot, vikahistoriatiedot, ehkä laiteoimittajan referenssitieto sekä mahdollisesti raaka-aineen ja ympäristöolosuhdetieto.

Prosessiteollisuuden moottorinohjausjärjestelmät-casessa selvitetään sitä, miten moottorinohjausjärjestelmän tuottamia mittauksia voidaan epäsuorasti hyödyntää prosessin ilmiöiden analysointiin tai päinvastoin. Verrataan prosessimittauksia moottorin mittauksissa mahdollisesti tapahtuviin äkillisiin muutoksiin, häiriöihin tai pitempiaikaiseen kehitykseen. Näin voidaan saada tietoa siitä, miten prosessin ilmiöitä voidaan havainnoida moottorinohjausjärjestelmiltä saataviin tietoihin. Kunnossapidolle saadaan esim. tietyn luokituksen mukaiset prognoosit ja toimenpidekehotukset joko laitteelle tai prosessille.

3.2 Käyttäjakeskeisyys mittaustietojen yhdistämisessä

Kun mittaustietoja yhdistetään, lopullisena tavoitteena tulee olla se, että järjestelmää käyttävä henkilö saa tarvittavan tiedon oikeaan aikaan ja sellaisessa muodossa, että se myös auttaa tilanteen ratkaisemisessa. Visuaalinen yhdistäminen on yksi tapa esittää useasta lähteestä tuleva tieto eli samaan kuvaan koostetaan useita tietoja esimerkiksi käyrinä tai pylväänä. Ongelmana on, että jo nykyisinkin esitetään liikaa tietoa näytössä kerrallaan, ja esitys jää epäselkeäksi.

Hierarkkista tietojen yhdistämistä (kuva 5), jota on käytetty esimerkiksi prosessin toimintakyvyn arvioinnissa, voidaan käyttää hyvin erilaisten mittaustietojen saamiseksi jopa yhdeksi luvuksi, mikä sinällään ei ole itse tarkoitus eikä todellisuudessa ole kovin kannattavaa. Kyseisessä järjestelmässä on prosessin osien ja laitteiden tilat skaalattu niin että voidaan arvioida niiden toiminnan astetta. Järjestelmässä myös seurataan historiatietoja ja näin pystytään arvioimaan nykytilaa verrattuna menneeseen [Kivikunnas et al. 2002]. Tässä järjestelmässä on tosin seurattu prosessien toimintaa verrattuna niiden normaaliin toimintaan ja tavoitetasoihin. Mikäli halutaan soveltaa menetelmää tietojen yhdistämisessä, tarvitaan tietenkin tietämystä ja määrittelyä siitä, millaista tietoa ollaan työstämässä. Esimerkiksi kun halutaan indikoida vikaantumista, tasot voidaan määrittää sen mukaan, mitkä asiat ovat haitallisia ajatellen laitteiden vikaantumista. Sopivia prognoosien muodostusmenetelmiä käyttäen järjestelmää voidaan käyttää myös ennakointiin.



Kuva 5. Kaavio prosessin hierarkkisesta jaosta ja tiedon yhdistämisestä.

Käyttäjäperustainen lähestyminen ja tilannetiedon hallinta voivat olla tehostamassa historiatiedon hyväksikäyttöä. Koska historiatietoa voidaan käyttää kuvaamaan laitteiden ja prosessien toiminta-astetta ja toimintakykyä verrattuna aikaisempaan samankaltaiseen tilanteeseen, niiden perusteella voidaan visuaalista monitorointia sekä diagnostiikkaa tuoda lähemmäs käyttäjää. Vertailulla ja informaation piirteiden tarkastelulla voidaan muodostaa ennusteita päätöksenteon tueksi. Aiheeseen on paneuduttu tulevien käyttöliittymien hahmottelussa:

- Käyttöliittymästä voidaan tehdä mukautuva, niin että kukin käyttäjä liittyessään järjestelmään saa oman näkymänsä ja pystyy seuraamaan prosesseista ja laitteista niitä asioita joita tarvitsee.
- Käyttöliittymä on kontekstietoinen, eli käyttöliittymä muuttuu ja sopeutuu tilannetietojen perusteella.
- Käyttöliittymä on puoliautomaattinen eli ikkunoiden koot, ikonit, prosessikuvat ja tiedotukset sopeutuvat toisiinsa ja myös käyttäjään.
- Käyttöliittymän avulla voidaan suorittaa operaattorin seuranta prosessin eri tilanteissa. Tilanteen kehittymisen perusteella suoritetaan arvio siitä, kuinka hyvä toimintatapa on ollut, ja tallennetaan tämä tiettyjen kriteerien mukaisesti.

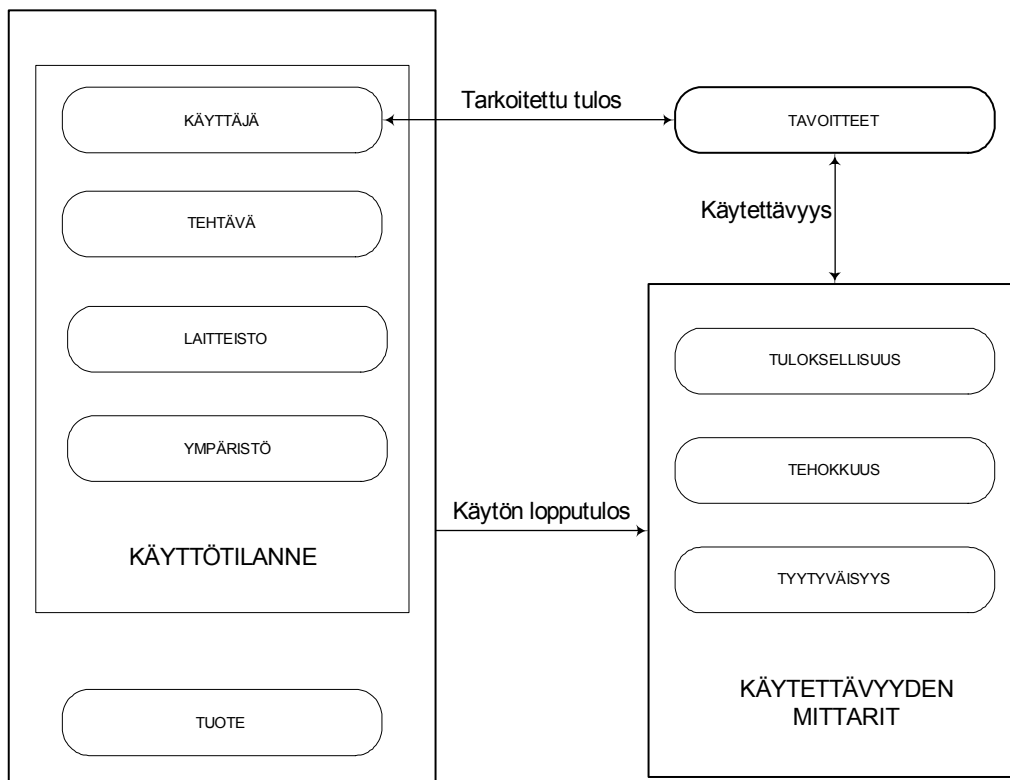
- Käyttöliittymä voi tulevaisuudessa opastaa käyttäjänsä eli se tietää, miten aiemmin on toimittu vastaavassa tilanteessa tai sen avulla saadaan kyseessä olevaan tapaukseen historiallista perspektiiviä, jotta käyttäjä voi miettiä toimintojen järkevyyttä.

Järjestelmien käytettävyyden parantaminen ja erityisesti käytettävyystekijöiden huomioiminen jo järjestelmien suunnitteluvaiheessa on noussut teollisuudessakin tärkeäksi kilpailutekijäksi järjestelmätoimituksissa sekä työtehon ja -viihtyvyyden lisääjäksi käyttökohteissa. Monesti tässä yhteydessä puhutaan kuitenkin vain teknisesti käyttöliittymän ominaisuuksista, vaikka selvästi tiedostetaankin taustalla oleva käytettävyy maailma. Käytettävyyden tekijät ja niiden väliset suhteet on esitetty kuvassa 6. Käytettävyyden määrittämisessä tai mittaamisessa tunnistetaan tavoitteet ja jaetaan tuloksellisuus, tehokkuus ja tyytyväisyys sekä käyttötilanteen tekijät osatekijöihin, jotka voidaan mitata ja joiden piirteet voidaan todentaa (SFS-EN ISO 9241-11).

Käyttäjakeskeinen suunnittelun standardin ISO 13407 mukaan käyttäjakeskeinen suunnitteluprosessi koostuu neljän tyyppisistä aktiviteeteista, jotka toistuvat suunnitteluprosessin kullakin iterointikierröksellä:

- käyttötilanteen ymmärtäminen ja määrittäminen,
- käyttäjävaatimusten ja organisaation vaatimusten määrittely,
- suunnitteluratkaisujen tuottaminen,
- suunnitteluratkaisujen arviointi vaatimusten suhteen.

Käyttäjakeskeisen suunnittelun menetelmät voidaan jakaa käytettävyyden suunnitteluun ja käytettävyyden arviointiin. Menetelmät painottavat käyttäjien, suunnittelijoiden ja käytettävyyssiantuntijoiden yhteistyötä.



Kuva 6. Käytettävyiden käsite rakenne (SFS-EN ISO 9241-11).

4. Yhteenveto

Raportissa on esitetty prognoosien sijoittumista kunnonvalvontajärjestelmiin, useista lähteistä peräisin olevien mittaustietojen yhdistämisen problematiikkaa sekä käyttäjäkeskeistä lähestymistapaa tulosten esittelyssä. Tulevaisuudessa pitää huomioida se, että päätöksenteon tavoitteet ja kriteerit vaihtuvat tarkastelijan mukaan, kuten prosessin tai laitteen käyttäjä, laitetoimittaja, taloudellinen (tuotantopäällikkö) ja teknologinen tarkastelija (tutkimus-kehitys), jolloin käyttäjäkeskeisyys korostuu.

Lähteet

Bengtsson, M., Olsson, E., Funk, P. & Jackson, M. 2004. Technical Design of Condition Based Maintenance System – A Case Study using Sound Analysis and Case-Based Reasoning. Maintenance and Reliability Conference – Proceedings of the 8th Congress, May 2nd – 5th, 2004, University of Tennessee – Maintenance and Reliability Center, Knoxville, USA.

Göös J., Ala-Siuru, P. & Korpipää, P. 1999, Fuzzy monitoring and case-based diagnosis tool for electronics manufacturing process. 4th UK Case-Based Reasoning Workshop. Manchester, GB, 15 Sept. 1999. AI-CBR; University of Salford. Manchester, UK. S. 81–90.

ISO 13374-1, 2003. Condition monitoring and diagnostic of machines – Data processing, communication and presentation – General guidelines. ISO. 16 s.

Kivikunnas, S., Koskinen, J., Lähdemäki, R. & Oksanen, P. 2002. Hierarchical navigation and visualisation system for paper machine performance monitoring. European Symposium on Intelligent Technologies, Hybrid Systems and Their Implementation on Smart Adaptive Systems (eunite 2002). Albufeira, Portugal, 19–21 September 2002. Aachen: Verlag Mainz. 80 s. + CD-ROM. ISBN 3-89653-919-1

Thurston, M. & Lebold, M. 2001. Open Standards for Condition-Based Maintenance and Prognostic Systems, 5th Maintenance And Reliability Conference (MARCON 2001), Gatlinburg, Tennessee, USA 8–9 May 2001. <http://www.osacbm.org/reports.html>

Nguyen, T.V. & Nelson, H.W. 2001. A System Approach to Machinery Condition Monitoring and Diagnostic. NDIA, 4th Annual Systems Engineering Conference, 22–25 October 2001. <http://www.dtic.mil/ndia/2001systems/2001systems.html>

MXI Technologies, verkkosivusto tarkastettu 28.10.2004.

http://www.mxi.com/template.php?SECTION_ID=maintenix&CONTENT=2&ID=2

Vachtsevanos, G. 2003. Cost & Complexity Trade-offs in Prognostics. NDIA Conference on Intelligent Vehicles, Traverse City, Michigan, June 9–10, 2003.

Laitoksen tai koneen kolmiulotteinen malli käyttöliittymänä

Veli-Matti Hagberg, Raimo Launonen, Jussi Markkanen, Antti Pärnänen,
Jukka Rönkkö, Pekka Siltanen & Markus Ylikerälä
VTT Tietotekniikka
Espoo

Tiivistelmä

Teolliseen toiminnan prosessit ovat entistä enemmän menossa puhtaasti sähköisiä dokumentteja ja sähköistä dataa hyödyntävään muotoon. Toistaiseksi eri sovellukset toimivat melko irrallaan kokonaisuudesta perinteisten käyttöliittymien kautta. Toisaalta laitoksiin liittyvän dokumentaation ja erilaisen käytönaikaisen datan määrä kasvaa jatkuvasti. Tällaisen datamassan hallintaan käyttäjä tarvitsee uudentyyppisiä työkaluja. Kolmiulotteinen (3D) laitosmalli voi toimia lähtökohtana uudentyyppiselle, eri lähteistä saadut tulokset visualisoivalle virtuaaliympäristökäyttöliittymälle. Tällaisessa käyttöliittymässä 3D-malli toimii navigoinnin apuna etsittäessä eri kohteisiin liittyvää tietoa. 3D-käyttöliittymäteknologia voi toimia integroivana käyttöliittymänä erilaisiin datalähteisiin. Tämä kuitenkin edellyttää standardeihin perustuvaa toimintatavan kehittämistä, jotta tieto on eri sovelluksista määriteltujen rapapintojen kautta käytettävissä.

1. Johdanto

Laitosten ja yksittäisten koneiden 3D-mallit ovat osa tämän päivän suunnittelua ja ylläpitoa. 3D-malli käyttöliittymänä laitokseen tai laitteeseen liittyvään tietoon on kehityksessä seuraava askel. Tällaisessa tilanteessa esimerkiksi kokonaiseen tehtaaseen liittyvä dokumentaatio ja vallitseva tila on havainnollisesti esitettävissä tehtaan 3D-mallin kautta. Malli toimii integraattorina useiden erityyppisten dokumenttien ja tarpeiden välillä. On luontevaa ajatella, että 3D-malli yhdessä hyvin toteutetun virtuaaliympäristökäyttöliittymän kanssa voi tarjota intuitiivisen oppimisympäristön, simulaattorin uusille käyttäjille liittyen tuotantolinjojen toiminnan tai niiden huollon opetteluun. Kuitenkin tällainen käyttöliittymä voi olla myös visuaalinen ja havainnollinen liityntä muuhunkin tehtaan, laitteen tai tuotantolinjaan dokumentaatioon ja nykytilaan. Tällainen lähestymistapa tukee kohteiden elinkaareen liittyvien suunnittelu-, huolto- ja käyttöprosessien siirtymistä entistä enemmän elektronista dokumentaatiota ja tietokantoja hyödyntävään muotoon. Tulevaisuudessa 3D-malli toimii linkkinä elektronisiin tietokantoihin, se muuttuu ja kehittyy kohteen muuttuessa elinkaarensa eri vaiheissa. 3D-mallilla voi olla eri il-

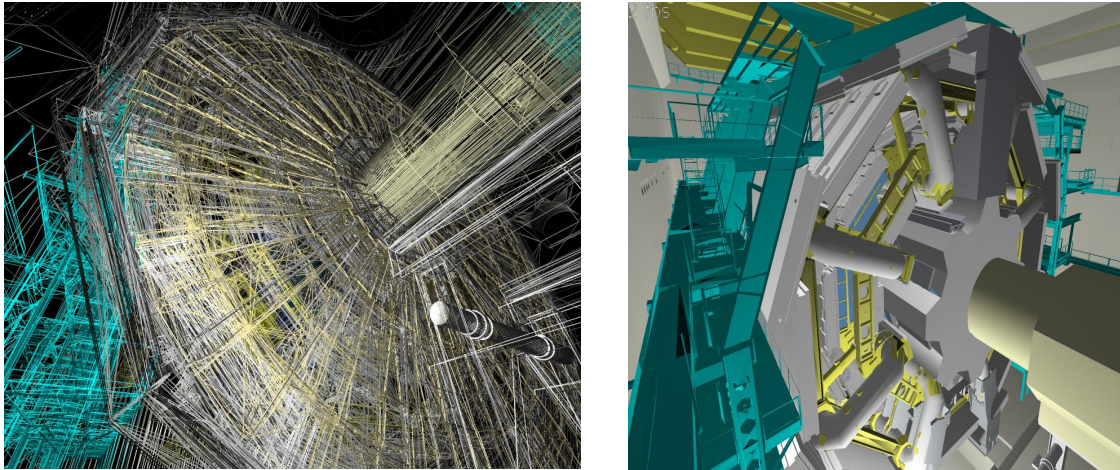
ilmiasu visualisoinnissa käyttötärpeen mukaisesti ja sitä voidaan tarkastella ja manipuloida monen käyttäjän virtuaaliympäristökäyttöliittymissä. Tällaisissa sovelluksissa käyttäjät voivat osallistua esim. virtuaalisiin suunnittelukokouksiin eri paikoista käsin, mutta silti tarkastella samaa mallia ja tehdä valittuihin osiin liittyviä muutoksia tietokantoihin.

Prognostiikka-hankkeen yhtenä tutkimusaiheena on huoltoon ja laitteiden vallitsevaan tilaan liittyvän tiedon esittäminen virtuaaliympäristökäyttöliittymässä ja tiedon kytkeminen laitteiden 3D-malleihin. Virtuaaliympäristökäyttöliittymän ja visualisoinnin haasteina on tukea käyttäjän kykyä löytää halutut kohteet vaivattomasti ja kykyä päästä käsiin suoraviivaisesti haluamaansa informaatioon, esim. laitteiden vikaantumisenusteluihin. Informaation tulee olla visualisoitu tavalla, joka on mahdollisimman havainnollinen käyttäjän kannalta. Lisäksi haasteena on löytää mahdollisimman standardeja tapoja kytkeä visualisointiohjelmistot prognostiikkadataa tuottaviin kohteisiin.

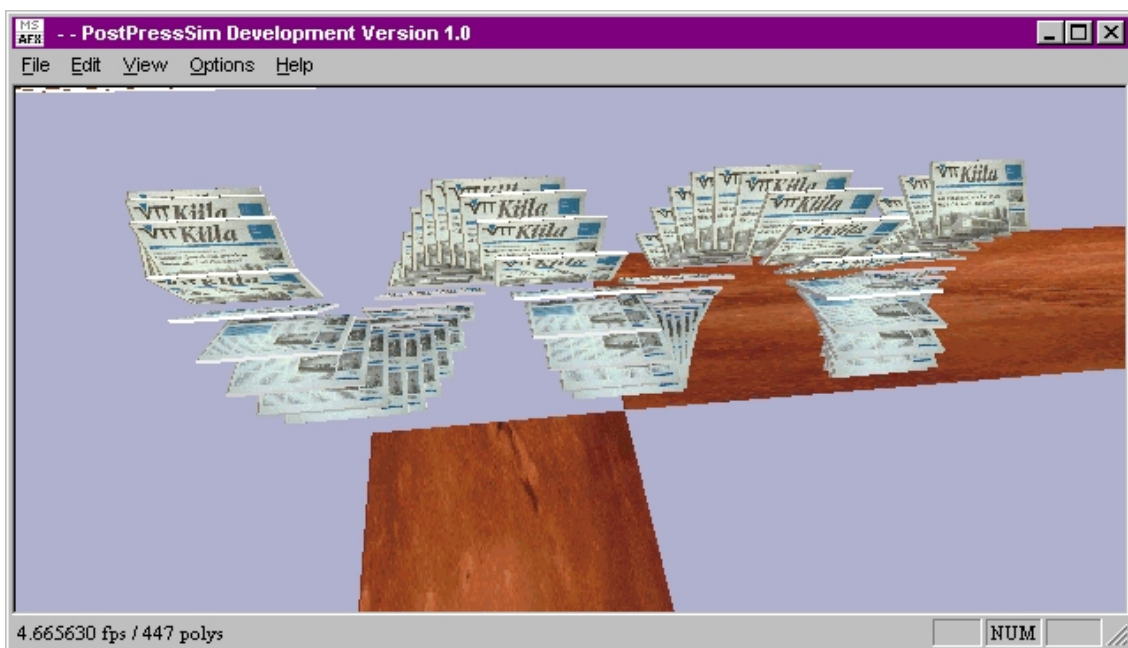
2. Interaktiivinen 3D-malli

Interaktiivinen 3D-malli jostakin teollisesta kohteesta on vain yksi esitysmuoto kohteesta, mutta se voi toimia kokoavana käyttöliittymänä muuhun sähköiseen, kohteeseen liittyvään aineistoon. Se tarjoaa potentiaalisesti intuitiivisen vuorovaikutustavan yhä lisääntyvän tietomäärän hallintaan, poikkeamien havainnointiin ja yhteyksien hahmottamiseen. 3D-mallien ja tuotetiedon hyötykäyttö siirtyy uudentyyppisten virtuaaliympäristökäyttöliittymien kautta CAD suunnitteluvaiheesta myös käyttöönnottoon, hallintaan, huoltoon, valvontaan ja käytön opetukseen.

3D-mallin ilmiäsu visualisoinnissa voi vaihdella käyttötärpeen mukaan. Esiitetty malli voi sisältää kohteen todellisuudenmukaisen geometrian ja visuaalisten materiaaliominaisuuksien lisäksi erilaisia datan esitysmuotoja, kuten tekstiä ja numeroita, vektoreita, käyriä ja pintoja, joilla kuvataan esimerkiksi lämpötilajakaumaa simulaation yhteydessä laitteen eri osissa. Osia geometriasta voidaan esittää viivagrafiikkana tai puoliläpinäkyvinä piilo-osien paikantamisen helpottamiseksi tai kohteesta voidaan piilottaa kaikki muut osat kuin esimerkiksi putkistot (ks. kuvat 1 ja 2).



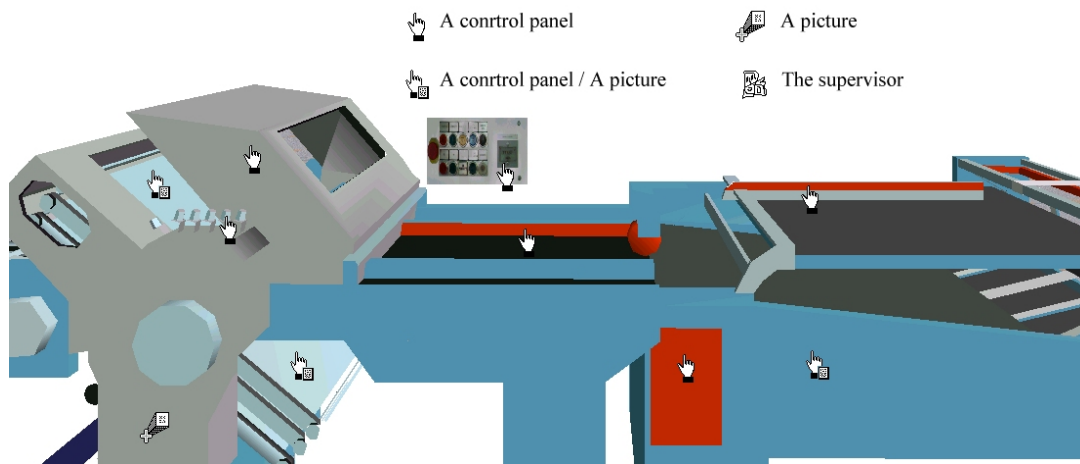
Kuva 1. CERNin hiukkaskiihdyttimen ATLAS-koeaseman visualisointi. Kuva on VTT Tietotekniikassa kehitetystä ATLAS-kokoonpanon suunnittelun tukiohjelmasta [2].



Kuva 2. Käyttäjän kannalta oleelliset osa-alueet voidaan korostaa tuomalla ne yksin esille ja häivyttämällä kohteen ympärillä olevat asiat. Kuvassa on lehden kulkurata lehden liitteistyskoneen sisällä. Kuva on VTT Tietotekniikassa kehitetystä PostPressSIM-koulutussimulaattorista [1].

Kohteen visuaalinen esitys kytkeytyy interaktiivisuuteen, jolla mallia voidaan käsitellä ja sen esitysmuotoja vaihtaa tarpeen mukaan. Virtuaaliympäristökäyttöliittymissä (ks. kuva 3) toiminnot ovat palautettavissa ns. perustoimintoihin, joista monimutkaisemmat toimintosekvenssit koostuvat. Eri käyttötarpeissa nämä perustoiminnot voidaan toteuttaa

hyvinkin eri tavoin ja ne voivat hyödyntää erityyppisiä vuorovaikutuslaitteita tavantomaisesta hiirestä datahanskoihin ja paikannuslaitteisiin sekä puheentunnistukseen.



Kuva 3. Kolmiulotteiseen käyttöliittymään voidaan lisätä opastavia ja selittäviä elementtejä, kuten opastava kursori, joka muuttaa ulkoasuun sijaintinsa mukaan viestittäen samalla käyttäjälle, minkä tyyppisen kohteen päällä kursori sillä hetkellä on. 2D käyttöliittymien tapaan toiminnot on palautettavissa perustoimintoihin. Kuva on PostPress-SIM-ohjelmasta [1].

2.1 Informaation visualisointi

Informaation visualisoinnissa käytetään hyväksi ihmisen kykyä prosessoida hyvin tehokkaasti visuaalista dataa ja hahmottaa syy-seuraussuhteita tai poikkeamia visuaalisen informaation avulla. Informaation visualisointi käsittää fyysistä alkuperää olevan datan visualisoinnin sekä täysin abstraktin datan visualisoinnin. Esimerkkinä ensimmäisestä voi olla simuloitujen pyörrevirtausten visualisointi lentokoneen siiven pinnalla ja jälkimmäisestä ison yrityksen työntekijöiden aseman kuvaaminen linjaorganisaatiossa puurakenne-esityksellä. Datan esitys voi perustua erityyppisiin lähteisiin, se voi olla tulosta simulaatiosta, reaaliaikadataa antureista tai erilaisten analyysiohjelmistojen tuottamaa numeerista dataa. Joissakin sovelluksissa, esimerkiksi kokoonpanon opettelussa (ks. kuva 4) huomattava rooli voi olla laitteiden geometrioilla ja reaalimaailmaa jäljittelevällä ilmiasulla ja laitteiden tilojen todellisuudenkaltaisilla muutoksilla, abstraktin tiedon esittämisessä tällaista suoraa vastaavuutta ei ole, vaan tehokkainta esitysmuotoa voidaan etsiä käytettävyysskoekoiden avulla. Abstraktin tiedon esittämiseen on käytetty esimerkiksi erilaisia puurakenteita, jos tieto on luonteeltaan hierarkkista ja yhteenliittyvää. Tällaisia esitysmuotoja tehdasmallien yhteydessä voidaan hyödyntää rakenteisen tiedon esittämisessä ja löytämistä helpottavana työkaluna.



Kuva 4. Astronauttien kokoonpanon koulutussimulaatio nollapainovoimassa. Kuva on VTT Tietotekniikassa kehitetystä astronauttien koulutussimulaattorin prototyypistä [3]. Valikoiden ja esineiden käsittely suoritetaan datahanskoja käyttämällä.

Aiemmin simulaatioiden tuloksena syntynyt, luonteeltaan fysikaalinen data, esim. virtaus, lämpötilajakauma, kuormituskoedata on visualisoitu erillisissä ohjelmistoissa. Tulevaisuuden tavoitteena on pyrkiä kohti prosessia, jossa samat CAD-mallit voidaan hyödyntää eri tarkoituksiin yhtenäisemmän virtuaaliympäristökäyttöliittymän kautta ja jossa voidaan esittää eri lähteistä tulevat visualisointitulokset, vektorikentät, tasa-arvopinnat jne. yhtenäisen käyttöliittymän avulla.

2.2 Interaktiivisuus

Interaktiivisuuden perustoimintoja ovat virtuaaliympäristökäyttöliittymissä tekstitiedon syöttäminen, katselupisteen muuttaminen, objektin valinta, objektin siirtäminen, objektin pyörittäminen uuteen asentoon ja objektin valinnan vapauttaminen. Navigaation käsite virtuaaliympäristöissä sisältää katselupisteen muuttamisen, ts. liikkumisen virtuaalitalassa, sekä tien löytämisen. Tien löytämistä voidaan avustaa erilaisilla työkaluilla, kuten 3D-kartalla tai virtuaalisilla maamerkeillä, jotka jäävät käyttäjän mieleen ja auttavat

muodostamaan kognitiivisen mallin tilasta. Navigaation toteutus tien löytämisen kannalta on kriittinen käytettävyyden kannalta, jos visualisoidut rakenteet ovat monimutkaisia.

Mallin manipulointi, esim. objektien valinta, siirtäminen ja vapauttaminen, voidaan toteuttaa erityyppisillä tekniikoilla, jotka voivat matkia ihmisten toimintatapaa todellisuudessa, esim. paikannuslaitteilla varustetulla datahanskalla voidaan tarttua virtuaaliesineisiin (valinta) ja kättä liikuttamalla käsi nyrkissä siirtää virtuaaliesinettä. Kun käsi avataan, vapautetaan samalla liikuteltava esine. Todellisuuden matkiminen soveltuu vuorovaikutuksessa hyvin esimerkiksi laitteiden käytön opetteluun virtuaalimallin avulla. Aina tämä ei kuitenkaan ole tarkoituksenmukaista. Jos esimerkiksi kentällä liikkuva huoltomies haluaa etsiä mallin avulla huoltotietoja, hänet voidaan varustaa silmikkönäytöllä ja mikrofonilla. Mikrofonin avulla käytetään puhekäyttöliittymää siten, että kädet jäävät vapaiksi muuta toimintaa varten (ks. kuva 5).



Kuva 5. Huoltomies tarkastelee virtuaaliympäristöä silmikkönäytön kautta ja ohjaa puheella käyttöliittymää. Hän pystyy samalla operoimaan käsillään ja tarkastelemaan todellisen maailman kohteita.

3. 3D-käyttöliittymän liittyminen tietojärjestelmiin

Virtuaaliympäristökäyttöliittymiä on rakennettu erilaisiin sovelluksiin esim. tehdasuunnittelun ja simuloinnin aloille. Kuitenkin nämä sovellukset ovat usein suunnattu hyvin spesifeihin sovelluksiin. Tulevaisuuden haasteena on kehittää virtuaaliympäristökäyttöliittymistä moniin sovelluksiin liittyvä toimintamalleiltaan helposti opittava ja yhtenäinen käyttäjärajapinta.

3.1 Tiedonsiirron ongelmia

Prognostiikka-hankkeessa 3D-käyttöliittymän pääasiallisena tehtävänä on havainnollistaa prognostiikkaohjelmiston tai -ohjelmistojen tuloksia. Käyttöliittymässä on myös mahdollista havainnollistaa ja esittää suoraan antureiden tuottamaa mittaustietoa. Tiedonsiirrollisia ongelmia syntyy näin kahdessa erilaisessa rajapinnassa.

Prognostiikkaohjelmistojen tuottamien tulosten esittäminen 3D-käyttöliittymässä on ongelmallista, koska tarkoitukseen ei ole kehitetty standardeja rajapintoja. Prognostiikkaohjelmistot ovat käyttökohteen mukaan räätälöityjä tai varta vasten käyttökohteeseen tehtyjä ja niiden liityntämahdollisuuksista ulkopuolisiin ohjelmistoihin on tarjolla varsin vähän tietoa. Täysin soveltuvaa standardia esitysmuotoa ei ole myöskään suoraan antureilta tulevan mittaustiedon välittämiseen 3D-käyttöliittymään.

Tiedonsiirrolliseksi ongelmaksi muodostuu myös reaaliaikaisuuden vaatimus liitettäessä suoraan antureilta tulevaa mittaustietoa 3D-käyttöliittymään. Antureilta tuleva tieto tulisi esittää mahdollisimman reaaliaikaisena käyttöliittymässä. Luonnollisestikaan reaaliaikaisuuden vaatimus ei mittaustiedon visualisoinnin tapauksessa ole kovin ankara. Huolimatta reaaliaikaisuuden matalasta vaatimuksesta esitettävä tieto on kuitenkin dynaamista ja antureiden näytteenottotaajuus on mahdollisesti liian korkea, jotta sitä pystyttäisiin suoraan visualisoimaan.

Pelkkä antureiden tuottama mittaustieto ja prognostiikkaohjelmistojen tuottama tulos ei riitä visualisointiin 3D-käyttöliittymässä, vaan lisäksi jokainen mittaustieto ja prognostiikkaohjelmistojen tuottama tulos on pystyttävä identifioimaan. Mittaustiedon lisäksi tarvitaan anturin paikkatieto tai jokin muu tunniste, jolla tieto pystytään liittämään oikeaan objektiin käyttöliittymässä.

3.2 Esitys standardeihin tukeutuvasta tiedonsiirrosta

Yleensä kaikissa tietojärjestelmissä on rajapinnat, joiden kautta järjestelmän tietoja voidaan siirtää toiseen ohjelmistoon. Kuitenkin useita tietojärjestelmiä liitettäessä joudutaan helposti tilanteeseen, jossa tietojärjestelmät integroidaan joukolla kahdenvälisiä rajapintoja, joiden määrä kasvaa helposti vaikeasti hallittavaksi. Tämän vuoksi on yritetty määrittellä standardirajapintoja, joiden avulla tarvittavien integraatioiden määrää.

XML

XML (Extensible Markup Language) on yksinkertainen SGML:stä johdettu tekstiperusteinen formaatti. Se sisältää joukon muotoilusääntöjä ja ohjeita tekstiperusteisten merkkuskielten määrittelyyn.

XML soveltuu rakenteisen tiedon kuvaukseen ja siirtämiseen. XML on metakieli, joka ei määrittele kiinteää avainsanojen eli tagien joukkoa vaan on suunniteltu laajennettavaksi ja joustavaksi. XML-dokumenttien ymmärrettävyyttä on pidetty tärkeänä ja niitä voidaan lukea sellaisenaan. Lisäksi XML-dokumentteja käsitteleviä ohjelmia on helppo tehdä.

Koska samaa tietoa varten voi tehdä useita erialaisia XML-dokumentteja, ei XML itsessään riitä, vaan tarvitsee määritellä käytettävä XML-dokumentin rakenne. XML mahdollistaa tiedon rakenteen esittämisen, mutta ei määrittele tiedon esitystä (kuten HTML). Tiedon esitys voidaan tehdä tapauskohtaisesti mm. käytettävän ohjelmiston ja laitteiston ominaisuuksien mukaan. XML on muodostunut tiedonsiirrossa de facto-standardiksi.

OPC XML DA

Korkean automaatiotason teollisuuslaitoksissa on tyypillistä, että laitteiden välinen tiedonsiirto on varsin kirjavaa. Lähes jokaisella valmistajalla on oma tiedonsiirtoprotokolla omille laitteilleen. Tämä johtaa kalliiseen ja vaikeasti ylläpidettävään järjestelmäkokoaisuuteen. Ongelma voidaan yrittää ratkaista pyrkimällä standardoimaan kaikkien automaatiolaitteiden rajapinnat. Huolimatta jo 1980-luvulta alkaneista standardointiponnisteluista tällainen lähestymistapa rajapintojen kirjavuuden aiheuttamiin ongelmiin ei ole tuottanut tulosta.

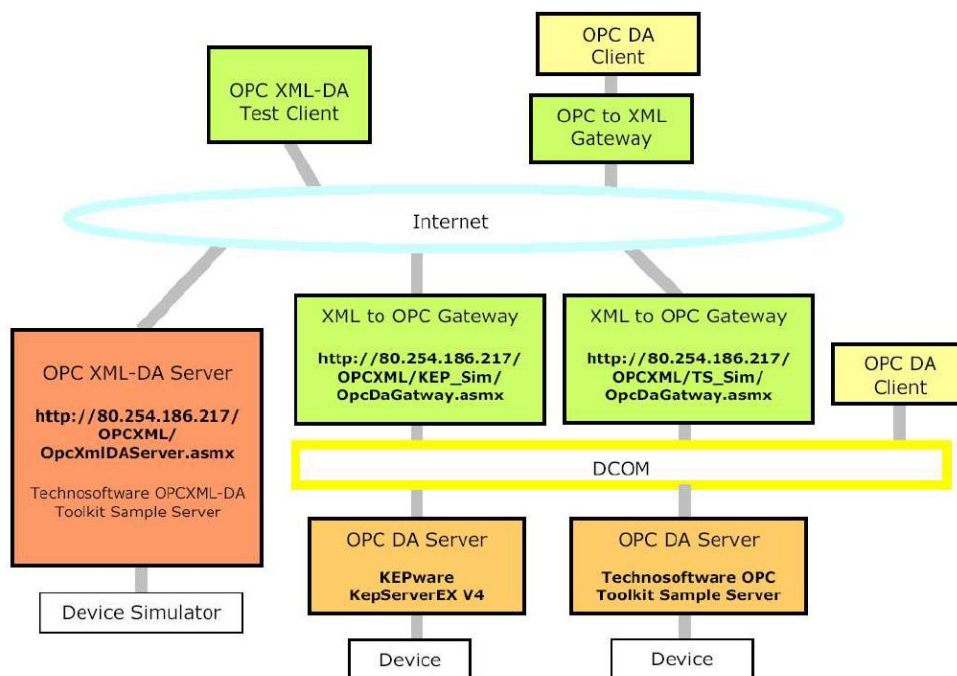
Toinen tapa yrittää ratkaista ongelma on pyrkiä tekemään yhteinen rajapinta automaatiolaitteiden laiteajureihin. Ratkaisutapa muistuttaa Windowsin ratkaisua tulostimien ja ohjelmien väliseen kommunikointiongelmaan. Aikoinaan ennen Windowsia kaikissa tekstinkäsittelyohjelmissa oli jokaiselle erilaiselle kirjoittimelle oma ajurinsa. Uuden kirjoittimen tullessa markkinoille kaikkiin tekstinkäsittelyohjelmiin oli kunkin ohjelmistotalon tehtävä omat ajurit. Nykyään uuden kirjoittimen tullessa markkinoille kirjoittimelle tehdään yksi Windows-ajuri. Samanlaiseen ratkaisumalliin automaatiolaitteiden kommunikointiongelmaan perustuu OPC.

Teollisuuslaitoksessa eri laitteiden väliseen kommunikointiin on kehitetty OPC on akronyymi sanoista ”OLE for process control” ja OLE on puolestaan akronyymi sanoista ”object linking and embedding”. DA tarkoittaa yksinkertaisesti ”data access”. OPC XML DA on tarkoitettu samaan käyttöön kuin OPC DA, mutta OPC XML DA:n myötä myös Internet soveltuu kommunikointiväyläksi.

OPC XML

OPC XML perustuu HTTP-protokollan yli lähetettävien SOAP-viestien (Simple Object Access Protocol) käyttöön datan välityksessä. Tavallisen Internet-yhteyden ja SOAP-sanomien käyttö puolustaa paikkaansa erityisesti silloin, kun on tarvetta tiedon välittämislle yritysten tietoverkkojen palomuurien läpi. XML:n ja muiden avoimien standardien käyttö ei rajaa toteutusympäristöä mihinkään käyttöjärjestelmään tai muuhun alustaan.

SOAP-sanomat ovat HTTP:n yli lähetettäviä XML-muotoisia sanomia, jotka voivat olla pyyntöjä tai vastauksia. OPC XML:n tapauksessa tiedonsiirto toimii ”polled-pull”-tyyppisesti, eli pyyntömuotoisella SOAP-sanomalla OPC XML -asiakassovellus pyytää esimerkiksi anturin arvon tai arvoja ja OPC XML -palvelin lähettää vastausmuotoisella SOAP-sanomalla pyydetty arvot.



Kuva 6. OPC XML DA (OPC XML DA Introduction, Kurt T. Haus).

SVG vs. FLASH

Mittaustiedon ja prognostiikkaohjelmistoilta saatavien tulosten visualisointi edellyttää, että datan visualisointi on myös määritelty kaikille tuleville tiedoille samanlaiseksi tai vaihtoehtoisesti tapauskohtaisesti riippuen mittaustiedon tai tulostiedon lähteestä. Käytettäessä XML:ää tiedonsiirtoformaattina olisi SVG (Scalable Vector Graphics) luonnollisin vaihtoehto datan visualisointiin. SVG on XML-muotoista, ja siten mittaustiedosta ja prognostiikkaohjelmistojen tuloksista on melko suoraviivaista muodostaa SVG-

formaatissa olevia graafisia esityksiä käyttäen apuna XSLT-muunnoksia (Extensible Stylesheet Language Transformations). SVG:n käyttö edellyttää käyttöliittymältä kykyä esittää SVG-grafiikkaa. Internet-selaimiin on ladattavissa ilmainen SVG:n katselun mahdollistava selaimen laajennusohjelma muun muassa Adobelta.

Macromedian Flash-animaatiot ovat SVG:n lisäksi toinen mahdollisuus mittaustiedon ja prognostiikkaohjelmistojen tuloksien visualisointiin käytettäessä XML:ää tiedonsiirtoformaattina. Soveltuvien Flash-animaatioiden tekemiseen XML-muotoisesta mittaustiedosta on olemassa valmiita kaupallisia ohjelmia, mutta yksinkertaisten mittareiden visualisointi on melko suoraviivaista Macromedian tarjoamalla Flash MX-työkalulla. Flash-animaatioiden etuna SVG-muotoiseen esitykseen verrattuna on se, että Macromedian Flash Player löytyy valmiiksi useimmista selaimista kuin SVG:n katseluun vaadittava laajennusohjelma.

Yhteenveto

Aidot 3D-käyttöliittymät tulevat olemaan yksi tapa tehostaa ihmisen vuorovaikutusta yhä lisääntyvän informaatiotulvan hallitsemiseksi. Samaan aikaan kokonaisten tehtaiden elinkaariin liittyvä dokumentaatio ja prosessit muuttuvat osaltaan sähköiseen muotoon. Virtuaaliympäristökäyttöliittymät tulevat tarjoamaan potentiaalisesti yhdenmukaisen ja intuitiivisen tavan liittyä tähän tietomassaan ja käsitellä sitä. Haasteina on kehittää käyttöliittymäratkaisuita ja standardeja toimintatapoja uudentyyppisiin käyttöliittymiin sekä kehittää teknologiaa, jonka avulla eri datanlähteitä esim. prognostiikan alueella voidaan integroida virtuaaliympäristöteknologioihin.

Lähteet

- [1] Kuukkanen, H. & Hagberg, V.-M. Ajasta ja paikasta riippumaton työharjoittelu. *Painomaailma*, 2002, 7, s. 44–45.
- [2] Kähkönen, K., Leinonen, J., Rönkkö, J. & Harviainen, T. Approaches and processes for applying virtual reality visualisation in construction. *The 10th ISPE International Conference on Concurrent Engineering: Research and Applications, Madeira, 26–30 July 2003. Proceedings: Advanced Design, Production and Management Systems, 2003. ISPE, 2003. S. 887–891.*
- [3] Rönkkö, J., Launonen, R., Laukkanen, S. & Gaia, E. Multimodal interaction techniques for astronaut training in virtual environments. *2nd International Conference on Universal Access in Human – Computer Interaction. Crete, Greece, 22–27 June 2003. Human – Computer Interaction Theory and Practice (Part I). Lawrence Erlbaum Associates, 2003. S. 1238–1242.*

Kunnossapidon kehityskohteiden tunnistaminen

Susanna Kunttu, Markku Reunanen & Pasi Valkokari
VTT Tuotteet ja tuotanto
Tampere

Tiivistelmä

Kunnossapidon kohdentaminen ja oikea mitoittaminen ovat ensimmäisiä edellytyksiä taloudellisesti kannattavan kunnossapidon suunnittelussa. Tämän vuoksi Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka -hankkeessa on neljässä case-kohteessa lähdetty liikkeelle riskianalyysillä ja siihen lisätyllä kriittisyysanalyysillä. Näin on tunnistettu järjestelmien ensisijaiset kunnossapitokohteet ja muodostettu arvio tehokkaalla kunnossapidolla saavutettavissa olevista säästöistä.

1. Johdanto

Kunnossapitalveluasiakkaiden keskeisin odotus hankkimaltaan palvelulta on kunnossapidettävän kohteen korkean käytettävyyden varmistaminen kustannustehokkaasti. Jo käyttäjien odottama toiminnan varmistaminen vaaditulla suorituskyvyllä on haasteellinen tehtävä kunnossapidolle. Haasteiden vaatimustaso lisääntyy huomattavasti kun käyttäjien odotukset on täytettävä aikaisempaa alhaisemmin kustannuksin. Siksi kunnossapitoa ei voida kylvää kohteelle sattumanvaraisesti, vaan kunnossapitomenetelmä on valittava kohteelle sen toimintojen kriittisyyden perusteella.

Miten mitoittaa järjestelmällisesti kunnossapitotoimenpiteet kohteen toiminnoille? Yksi vaihtoehto on soveltaa RCM (Reliability Centered Maintenance, luotettavuuskeskeinen kunnossapito) ajattelutapaa. Siinä tunnistetaan ensiksi kunnossapidettävän kohteen kriittiset toiminnot ja toisessa vaiheessa mitoitetaan RCM-päätöskaavion avulla kunnossapitomenetelmät toimintojen kriittisyyden mukaisesti. Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka -hankkeessa tavoitteena on kehittää menetelmiä teollisuuden koneiden ja tuotantolinjojen käynnissäpidon hallitsemiseksi. Menetelmäkehityksen suuntaamiseksi teollisuuden tarpeita vastaamaan on neljälle hankkeessa olevalle case-kohteelle tehty ensisijaisten kunnossapidon kehityskohteiden tunnistaminen. Tässä artikkelissa esitellään tunnistamisessa käytettyä RCM-menetelmän sovellusta. Analyyseissä käytettiin toimintojen kriittisyyden mittarina kunnossapidettävän kohteen vikakustannuksia.

2. Kriittisten kohteiden tunnistaminen

Ennen varsinaista kriittisten kohteiden tunnistamista käydään tarkasteltava järjestelmä järjestelmällisesti läpi ja kirjataan ylös sen mahdolliset vikamuodot. Hyvä väline vikojen järjestelmälliseen tunnistamiseen on esimerkiksi vika- ja vaikutusanalyysi (VVA, engl. Failure Mode and Effect Analysis, FMEA). Tämä antaa hyvän pohjan kunnossapitoimien suunnitteluun.

Vika- ja vaikutusanalyysin jälkeen on suppeastakin kohteesta tyypillisesti tunnistettu kymmeniä vikoja ja vielä suurempi joukko näiden syitä. VVA:ssa esille nousee tärkeideltään monentasoisia vikamuotoja. Tyypillisesti käytettävissä olevat resurssit ovat niukkoja, jolloin kaikkiin analysoituihin vikoihin ei ole mahdollista puuttua.

VTT:llä kehitetyssä kriittisyysanalyysissä jokaisen vikamuodon vaikutukset muutetaan keskimääräisiksi vuosikustannuksiksi, jolloin viat on helppo laittaa tärkeysjärjestykseen. Analyysi soveltuu parhaiten tilanteeseen, jossa vikojen kriittisyyttä arvioidaan tuotannollisten menetysten ja kunnossapitokustannusten kautta.

Ympäristö- ja erityisesti henkilöriskien seurausten kustannusvaikutusten määrittäminen on huomattavasti vaikeampaa. Haluttaessa henkilö- ja ympäristöturvallisuusriskit voidaan kuitenkin sisällyttää kriittisyysanalyysiin. Yksinkertaisimmin tämä tapahtuu kirjaamalla jokaisen vikamuodon kohdalla, ilman erityistä riskin suuruuden arviointia, voiko siitä seurauksena olla vaaraa ihmisille tai ympäristölle. Henkilö- ja ympäristöturvallisuusriskien jatkokäsittely sovi- taan tämän karkean riskien tunnistamisen jälkeen tapauskohtaisesti.

Vikojen kriittisyys määritetään sen esiintymistäajuuden ja seurausten kustannusten suuruuden avulla. Esiintymistäajuus on tässä tapauksessa keskimääräinen vikojen lukumäärä vuodessa. Seurausten suuruuteen vaikuttavia kustannustekijöitä ovat tuotantomennykset, materiaalienmenetykset ja korjauskustannukset.

Seurausten suuruuden määrittämisessä huomioidaan järjestelmän luotettavuustekninen rakenne, joka voidaan kuvata esimerkiksi luotettavuuslohkokaaviolla. Tuotantomennyksen suuruutta arvioitaessa huomioidaan mahdolliset rinnakkaiset järjestelmät, jotka voivat korvata kokonaan tai osittain vikaantuneen laitteen tai osajärjestelmän toiminnan. Kriittisyysarvioinnissa tämä näkyy siten, että tuotantomennyksen suuruus voi vaihdella vikamuodoittain 0–100 %:n välillä. Materiaalienmenetyksiin arvioidaan viasta aiheutuvat kustannukset, jotka johtuvat siitä, että ennen vikaantumista käyttökelpoinen materiaali ei enää ole kunnollista ja se joudutaan heittämään pois. Materiaalilla tässä tarkoitetaan käsiteltävää tai valmistettavaa tuotetta. Korjauskustannuksiin sisältyvät sekä varaosakustannukset että korjauksesta aiheutuvat työ- ja materiaalkustannukset. Laskettaessa nämä kolme kustannustekijää yhteen saadaan yhden vioittumisen hinta.

Yksittäisen vian keskimääräiset vuosikustannukset saadaan kertomalla vuosittainen vikataajuus yhden vioittumisen hinnalla. Näin yksittäisten vikojen kustannukset saadaan keskenään vertailukelpoisiksi ja niiden perusteella voidaan valita eniten vuosittain kustannuksia aiheuttavat vikamuodot ensisijaisiksi kunnossapidon kehityskohteiksi.

Taulukossa 1 on esimerkki kriittisyysarviossa käytettävästä lomakkeesta. Järjestelmän osien mahdolliset vikamuodot on kerätty vika- ja vaikutusanalyyseissä, jonka jälkeen on muodostettu arviot keskeytys- ja korjausajasta sekä tuotantomenetyksen suuruudesta, varaosakustannuksista ja vikataajuudesta. Näiden tietojen pohjalta on esimerkkitaulukoon laskettu vuosikustannukset vikamuodoittain. Lisäksi kustannukset on laskettu yhteen osajärjestelmätasolle. Vastaavalla laskennalla saadaan myös vuosittaiset korjauskustannukset ja keskeytysajat jokaiselle vikamuodolle sekä osajärjestelmittäin ja koko järjestelmälle. Keskeytysaikojen perusteella voidaan laskea arvio käytettävyydestä. Tässä on huomattava, että arvioon tulevat mukaan vain vioista aiheutuvat keskeytykset, joiden lisäksi käytettävyyteen vaikuttavat suunnitellusta kunnossapidosta johtuvat seisokit.

Taulukko 1. Esimerkki kriittisyysarviolomakkeesta.

Järjestelmän osa ja sen vikamuoto	Kesk. aika [h] á 3000 €	Tuotantomenetyks [%]	Taajuus [krt/vuosi]	Korjausaika		Varaosakustannus	Vuosi-kustannus
				[hlö]	[h] á 40 €		
Osajärjestelmä 1. Putkisto ja paisuntasäiliö							66 280 €
Vika 1.1. Paisuntasäiliön kalvon rikkoutuminen	5	50 %	1/2	1	3	500 €	4 060 €
Vika 1.2. Putkiston rikkoutuminen	8	100 %	1	2	8	500 €	25 140 €
Vika 1.3. Putkiston ilmanpoistiventtiin vioittuminen	2	100 %	6	1	2	100 €	37 080 €
Osajärjestelmä 2. Moottori							54 914 €
Vika 2.1. Laakerin vioittuminen	50	100 %	1/5	4	32	10 000 €	33 024 €
Vika 2.2. Roottorista tai staattorista johtuvat viat	50	100 %	1/8	4	32	20 000 €	21 890 €

2.1. Kriittisyysanalyysin tiedonkeruu

Esitetyn kriittisyysanalyysikuvauksen perusteella on helposti pääteltävissä, että lopputulokseen pääsemiseksi on kerättävä varsin paljon yksityiskohtaista tietoa järjestelmän vioista ja niiden seurauksista. Mistä tämä tieto on saatavissa? Perustietolähteinä voidaan pitää laitoksella kerättyjä vikatilastoja sekä käyttö- ja kunnossapito henkilöstön kokemustietoa.

Tapahtuneista vikaantumisista saatavaa tilastoitua tietoa on kohteesta riippuen saatavissa varsin vaihtelevasti. Tyypillisesti vikaantumistietoa on dokumentoitu

- kunnossapidon tietojärjestelmiin
- päiväkirjoihin sekä
- tuotannonseurantaan.

Eri laitoksilla käytössä voivat olla nämä kaikki dokumentoitavat tai vain yksi tai kaksi. Kunnossapidon tietojärjestelmät ovat jo yleisesti käytössä, mutta niihin kerätyn tiedon hyödyntämiseksi kriittisyysanalyysissä pitää vikatiedot olla tarkasti ja kattavasti talletettu. Esimerkiksi korjaus- ja seisokkiajan puuttuminen johtaa siihen, ettei keskeytys- ja kunnossapitokustannuksia tunneta, eikä kriittisyysarviota voida tehdä suoraan tietojärjestelmän tietojen perusteella.

Tietojärjestelmien ohella esiintyneiden vikojen ja häiriöiden kirjaamiseen saattaa olla käytössä päiväkirjatyypisiä välineitä, joiden ensisijainen tarkoitus on siirtää tietoa esimerkiksi vuorolta toiselle. Nämä tiedot täydentävät kunnossapidon tietojärjestelmään tehtyjä kirjauksia, koska lyhyitä häiriöitä ei tietojärjestelmään tyypillisesti kirjata. Kriittisyys-tarkastelussa lyhyiden häiriöiden vaikutukset on hyvä huomioida, koska vähäiseltäkin tuntuvat häiriöt ovat usein toistuessaan kokonaisuuden kannalta merkittäviä.

Tuotantolaitoksissa seurataan yleensä tuotantoseisokkeja ja näiden syitä. Kolmas mahdollinen dokumentoitu tietolähde onkin tuotannonseuranta tai seisokkitilastot. Näissä tilastoissa on yleensä parhaiten kirjattuna aiheutuneen tuotantokatkoksen pituus.

Käytännössä tilastoidut vika- ja häiriötiedot riittävät harvoin kriittisyysanalyysin tekemiseksi, vaikka laitoksessa olisi käytössä kaikki kolme edellä mainituista tiedonkeruutavoista. Esimerkiksi vian syitä ja seurauksia ei kirjata tätä tarkoitusta varten riittävän tarkasti. Laitoksen tiedonkeruuta suunniteltaessa tulisikin selvittää miten kerättäviä tietoja halutaan hyödyntää ja sen perusteella päättää mitä tietoja kerätään. Hyvällä suunnittelulla voidaan joissakin tapauksissa myös vähentää kerättävän tiedon määrää ja näin pienentää kirjaajan työmäärää. Jos tiedonkeruu tehdään ilman tarkempaa suunnittelua, lopputuloksena on yleensä paljon tietorivejä sisältävä aineisto, jonka hyödynnettävyys on huono esimerkiksi olennaisten muuttujien puutteen tai liian yleisten vikakuvausten takia.

Kattavasti dokumentoidut vikatiedotkaan eivät yksin riitä kriittisyysanalyysin tekemiseen. Tietojärjestelmissä on tietoa vain tapahtuneista vioista, ei kaikista mahdollisista. Harvinaiset vikamuodot on myös syytä ottaa kunnossapidon suunnittelussa huomioon, koska niiden vaikutukset toteutuessaan saattavat olla huomattavan suuret. Siksi niihin varautuminen on tärkeää.

Tilastoitu aineisto voi tarjota hyvän lähtökohdan vikamuotojen tunnistamisessa ja erityisesti vikataajuuksien ja kustannusvaikutusten arvioinnissa. Kokemustemme mukaan käyttö- ja kunnossapitohenkilöstöllä oleva kirjaamaton, hiljainen tieto, on kuitenkin ensiarvoisen tärkeää tämäntyyppisten analyysien teossa. He tuntevat järjestelmän mahdolliset vikamuodot ja pystyvät antamaan riittävän luotettavia arvioita kriittisyysanalyysin lähtötiedoiksi (Valkokari & Schabel 2002). Kriittisyysanalyysissä riittää, että vikataajuudet ja kustannukset arvioidaan suuruusluokaltaan oikein ja oikein suhteessa muihin vikoihin. Näin saadaan vioille oikea kriittisyysjärjestys ja kustannusten suuruusluokka.

3. Kunnossapidon keinojen tunnistaminen

Kriittisyysanalyysin tulosten perusteella valitaan ensisijaiset kohteet kunnossapidon kehittämiseksi. Vika- ja vaikutusanalyysin yhteydessä tulee tyypillisesti esille jo joitakin järjestelmään ja kunnossapitoon liittyviä kehityskohteita, jotka kannattaa pitää esillä myös tässä vaiheessa. Soveltuvien kunnossapitomenetelmien valintaan voidaan käyttää esimerkiksi Moubrayn (1997) esittelemää RCM-päätöksentekologiikkaa (RCM=Reliability Centered Maintenance, luotettavuuskeskeinen kunnossapito).

Moubray on esittänyt seitsemän erilaista kunnossapitomenetelmää, joihin päätöslogiikan perusteella voidaan päätyä. Prognostiikka-hankkeessa tehdyissä RCM-analyysissä on käytetty yksinkertaistettua neliluokkaista jaottelua:

1. Kuntoon perustuva kunnossapito
2. Käyttöön (esim. käyttötunnit) perustuva kunnossapito
3. Vikoihin reagoiva kunnossapito
4. Uudelleen suunnittelu tai muutostoimenpide.

Kullekin käsiteltävälle vikamuodolle voi ehdottaa menetelmiä useasta toimenpide-luokasta. RCM:ssä kunnossapitomenetelmää valittaessa olennaisia kriteereitä ovat menetelmän tekninen toteutettavuus ja kannattavuus. Menetelmän kannattavuuden arviointiin antaa hyvän lähtökohdan kriittisyysanalyysistä saatavat yksittäisten vikojen keskimääräiset vuosikustannukset. Kun lisäksi arvioidaan kunnossapitomenetelmän käyttöönotosta ja käytöstä aiheutuvat kustannukset ja menetelmällä estettävien vikojen osuus, voidaan laskea esim. vuosittainen säästö halutulle aikajaksolle. Tämän perusteella on mahdollista esimerkiksi vertailla eri menetelmien kannattavuutta keskenään.

Edellä esitetystä luokituksesta on nähtävissä, että RCM:n tuloksena saadaan ehdotus kunnossapitomenetelmästä yleisellä tasolla. Esimerkiksi kuntoon perustuvia kunnossapitomenetelmiä on olemassa monia, joista on valittava kohteeseen soveltuvin. Mikäli työryhmällä on asiasta riittävästi tietoa, voidaan konkreettiset kunnossapitomenetelmät määrittää saman tien tai näistä päättäminen voidaan tehdä myöhemmin.

Laite- tai järjestelmäkohtainen kunnossapito-ohjelma voidaan tehdä yhdistämällä RCM:stä saadut yksittäisten vikamuotojen kunnossapitomenetelmät. Tehdyn kunnossapito-ohjelman toimivuutta on seurattava säännöllisesti. Seuranta helpottaa jos etukäteen on määritetty mittarit tätä varten. Yksinkertaisia mittareita ovat esim. järjestelmän käytettävyys tai ennakoivan ja korjaavan kunnossapidon suhde. Seurannan perusteella voidaan päätellä onko kunnossapito-ohjelman teossa onnistuttu vai onko tarpeen tehdä muutoksia. Muutoksia ei kuitenkaan kannata tehdä liian nopeasti ennen kuin edellisten muutosten vaikutuksia on pystytty arvioimaan.

4. Menetelmän soveltaminen prognostiikka-hankkeessa

Edellä kuvattua kriittisyysarviointimenetelmää on prognostiikka-hankkeessa sovellettu neljään erityyppiseen caseen. Käsiteltävät järjestelmät vaihtelivat laajuudeltaan ja iältään toisistaan. Kaikissa kohteissa tavoitteena oli tunnistaa tarkasteltavan järjestelmän kriittisimmät laitteet ensisijaisesti käyttövarmuuden näkökulmasta.

Analyysien tuloksena saatiin tunnistettujen vikamuotojen kriittisyysjärjestys ja kriittisimmille vikamuodoille ehdotuksia mahdollisista kunnossapitomenetelmistä. Kunnossapitomenetelmät painottuivat ennakoivaan kunnossapitoon. Kriittisille kohteille tämä onkin odotettavissa oleva tulos. Kuntoon perustuvista kunnossapitomenetelmistä tuli esille niin mittavaan kunnossapidon menetelmiä kuin aistihavaintoihin perustuva kunnonvalvontaa. Aistihavaintoihin pohjautuva kunnonvalvonta voi tapahtua järjestelmän normaalin käytön aikana tai sitä voidaan tehdä erillisissä tarkastuksissa. Vaikka käyttäjät ja kunnossapitajat seuraavatkin järjestelmän kuntoa päivittäisen työnsä yhteydessä tulee aistihavaintoihin perustuva kunnonvalvonta myös ohjeistaa, jotta he osaavat aktiivisesti kiinnittää huomiota oikeisiin asioihin. Henkilökunnan tekemä kunnonvalvonta tulee saattaa osaksi normaalia työprosessia. Tämän helpottamiseksi voidaan tehdä työtapa-analyysiä ja sen perusteella lisätä työtehtäviä tai kunnonvalvonta yhdistetään sopiviin työtehtäviin.

Erityisesti uusimmilla järjestelmillä tuli esille, että ennen kattavan ennakkohuolto-ohjelman tekemistä on tarpeen tehdä muutoksia järjestelmään, jotta ns. lastentaudeista päästään eroon.

Tehtyjen analyysien perusteella voidaan näiden case-kohteiden seuraavissa vaiheissa keskittyä kunnossapidon menetelmien ja välineiden kehittämiseen kriittisimmässä osajärjestelmissä. Kriittisyysanalyysistä saatavia vikojen keskimääräisiä vuosikustannuksia pidettiin yleisesti helposti tulkittavina. Niiden perusteella oli helppo löytää vikojen keskinäinen tärkeysjärjestys ja samalla muodostui arvio siitä, paljonko vikojen ennakoimiseen on kannattavaa panostaa.

5. Yhteenveto

Toimivalla kunnossapito-ohjelmalla voidaan parantaa tuotantojärjestelmän käytettävyyttä. Yhtenä toimivan kunnossapito-ohjelman lähtökohtana on, että kunnossapitoa tehdään oikeissa paikoissa ja hyödynnetään sopivimpia kunnossapidon menetelmiä. Tässä artikkelissa esitellyllä kriittisyysanalyysillä voidaan löytää eniten kustannuksia aiheuttavat vikamuodot. Kriittisyysanalyysin jälkeen sovellettuna RCM-päätöslogiikalla voidaan hakea näiden vikamuotojen aiheuttamia haittoja parhaiten poistava kunnossapitomenetelmä.

Lähteet

Moubray, J. (1997). RCM II, Reliability-centred Maintenance, 2nd edition.

Valkokari, P. & Schabel, J. (2002). Using Operational Experience to Improve Production Efficiency. Kunnossapito, No. 5, s. 59–64.

Rasva- ja öljyvoideltujen kohteiden valvonta

Risto Parikka
VTT Tuotteet ja tuotanto
Espoo

Tiivistelmä

Keskeisimpien voideltujen komponenttien vauriot havaitaan tänä päivänä useimmiten kunnonvalvontamittauksilla, joista tärkein on värähtelyn mittaaminen esimerkiksi laakereista ja hammasvaihteista. Niiden ohessa käytetään enenevässä määrin voiteluaineiden kuntomäärittämiä. Kuntomäärittämisessä voidaan mitata epäpuhtausanalyysien ohella esimerkiksi voiteluöljyn hapettumisastetta, lisäainepitoisuutta tai vesipitoisuutta, joilla kaikilla on tärkeä merkitys voideltujen kohteiden kestoille. Analyysivalikoiman avulla on mahdollista saada voiteluaineen tilan lisäksi runsaasti tietoa myös voidellun kohteen kunnosta. Tämän esityksen tarkoituksena on esittää *Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka* -hankkeessa tehtävän kehitystyön pohjaksi voiteluaineiden kunnonvalvonnan perusteita yleisesti sekä rasvavoideltujen kohteiden valvonnan erityispiirteitä.

1. Johdanto

Öljyn kunnonvalvontatavat voidaan jakaa kolmeen luokkaan, jotka ovat off-line-, on-line- ja in-line-valvonta. Off-line-valvonnassa osa öljystä otetaan manuaalisesti pois koneesta ja testataan laboratoriossa. On-line-valvonnassa osa öljystä johdetaan pois koneesta ja analysoidaan saman tien sekä tämän jälkeen johdetaan takaisin koneeseen tai toiseen säiliöön. In-line-valvonnassa koko öljymäärää testataan jatkuvasti [1]. Nimitysten käytössä on erilaisia käytäntöjä, eivätkä edellä mainitut määritelmät ole täysin vakiintuneita. Usein puhutaan on-line- ja off-line-menetelmistä riippuen siitä, suoritetaanko analyysi automaattisesti koneen käytön aikana vai laboratoriossa järjestelmästä aiemmin otetulle näytteelle.

Käynninaikaiset mittaukset ovat tulossa laboratorioanalyysien tueksi erityisesti prosessiteollisuuteen, ja suurivolyyminen autoteollisuus on pystynyt laskemaan tiettyjen valvontantureiden hintoja niin, että öljyn laatua valvovia antureita on sijoitettu autojen valvontajärjestelmiin huoltovälien määrityksen tueksi [2]. Off-line-valvonta laboratoriossa suoritettavien analyysien avulla on kuitenkin tänä päivänä yleisin voiteluaineiden kunnonvalvontatapa ja voitelurasvojen kuntomäärittäminen suoritetaan vielä lähes poikkeuksetta

laboratoriossa. Uusinta tekniikkaa rasvojen analysoinnissa edustavat pikamääritykset, jotka voidaan tarvittaessa suorittaa kohteen lähellä ja joilla saadaan tulos reaaliajassa pienellä kustannuksella, joskin usein rajoitetulla tarkkuudella [3].

2. Tavanomaisimmat voiteluaineiden laboratorioanalyysit

Hiukkaslaskenta paljastaa suodatuksen puutteita, toimintahäiriöitä, epänormaalia kulumista, vaurioita ja ulkoisten tekijöiden vaikutusta. Automaattisessa hiukkaslaskennassa nestemäinen näyte virtaa valodetektorin lävitse ja näytteen sisältämät hiukkaset rekisteröidään niiden aiheuttamien varjostumien perusteella. Analyysin päätyttyä analysaattori tulostaa näytteen hiukkaskokojakauman. Hiukkaslaskenta soveltuu kaikille tavanomaisille mineraaliöljyille, synteettisille voiteluöljyille ja mineraaliöljypohjaisille voitelurasvoille [4, 5].

Ferrografiassa huolellisesti sekoitetun näyteöljyn ja liuottimen seosta tai rasvaliuosta syötetään voimakkaassa magneettikentässä olevan lasilevyn päälle, jolloin ferromagneettiset hiukkaset jäävät levylle. Mielenkiintoisimmat, eli suurimmat ja ferromagneettisimmat hiukkaset kerääntyvät normaalisti liuoksen syöttökohdan lähetyville. Pienemmät ja vähemmän ferromagneettiset hiukkaset erottuvat näytteestä myöhemmin magneettikentän voimakkuuden kasvaessa näytelevyn loppupäähän mentäessä. Ei-ferromagneettiset hiukkaset asettuvat levylle mielivaltaiseen järjestykseen ja kohtaan. Näytelevyltä hiukkasia voidaan tarkastella valomikroskoopilla [4, 5]. Hiukkasten muodosta, pintarakenteesta, koosta ja väristä voidaan kulumismekanismi (vrt. kuva 1) ja sen merkitys arvioida.

<p>1 Hiontakulumishiukkaset</p>  <p>hiutalemainen sileä pinta 0,5 - 5 μm</p>	<p>2 Leikkauskulumishiukkaset</p>  <p>spiraalimaisia mukana hiekkaa ym. 25 - 100 μm</p>
<p>3 Pallomaiset kulumishiukkaset</p>  <p>pallomaisia laakerin väsyminen 1 - 5 μm</p>	<p>4 Levymäiset kulumishiukkaset</p>  <p>karkea pinta ja reuna hammaspyörien väsyminen yli 20 μm</p>
<p>5 Voimakkaan kulumisen hiukk.</p>  <p>terävät kulmat uurtaisia yli 20 μm</p>	<p>6 Muut hiukkaset</p>  <p>hiekkä polymeerit ruoste</p>

Kuva 1. Eri kulumismekanismien tuottamia hiukkasia [6].

Teollisuusöljyjen vesipitoisuus määritetään kulometriseen tai stoikiometriseen menetelmään perustuvalla Karl-Fisher-titrauksella. Mikäli esimerkiksi voimakkaasta öljyn lisäaineistuksesta johtuen ei Karl-Fisher-titrausta voida käyttää, määritetään vesipitoisuus tislaukseen perustuvalla menetelmällä, jossa näytettä keitetään liuottimen kanssa, kunnes kaikki vesi on tislautunut mitta-asteikolla varustettuun vastaanottoputkeen [4, 5].

Kokonaishappoluku TAN kuvaa sitä määrää emästä, joka tarvitaan neutraloimaan öljyssä olevat happamat yhdisteet. Happamia yhdisteitä öljyissä ovat eräät lisäaineet, kuten kulumisenestoaine ja paineenkestoaineet sekä öljyn hapettumisessa syntyvät tuotteet. TAN-arvo määritetään potentiometrisellä titrauksella, missä seurataan pH-arvon muutosta lisätyn standardiemäksen funktiona. Esimerkiksi korkea lämpötila voi aiheuttaa öljyn hapettumisen, jolloin TAN-arvo kohoaa. Koska uusien öljyjen TAN-arvoissa voi olla suurta vaihtelua, on tulosta tulkitessa tiedettävä, mikä öljy on kyseessä [4, 5].

Kinemaattinen viskositeetti on nesteen virtaamisvastus painovoiman vaikutuksesta ja se ilmaisee öljyn jäykkyyden. Teollisuusöljyjen viskositeetti määritetään tavallisesti 40 °C:ssa. Viskositeettiä mitattaessa näyte virtaa kalibroidussa putkessa määrättyssä lämpötilassa määrätyn matkan. Kulunut aika mitataan, ja kertomalla se putkelle määritetyllä kalibrointikertoimella saadaan viskositeetti. Muutokset viskositeetissa ilmaisevat yleensä vieraan tuotteen joutumisen käytettävään öljyyn, esim. väärä öljy, polttoneste tai muu viskositeetiltaan poikkeava tuote. Muutokset alkuperäiseen arvoon saattavat johtua myös öljyn hapettumisesta, krakkautumisesta tai lisäaineen leikkautumisesta [4, 5].

Kulumametalli- ja lisäainealkuaineanalyysit eli näytteiden Fe-, Cr-, Ti-, Ni-, W-, Ag-, Al-, Cu-, Mg-, Si-, Mn-, Mo-, Pb-, Sn-, V-, Ba-, Ca-, P- ja Zn-pitoisuudet määritetään yleensä plasma-atomiemissiospektrometrisesti (ICP-AES). Metallimäärityksillä voidaan seurata sekä öljyyn käytön aikana kertyviä kulumismetalleja ja epäpuhtauksia että lisä- ja kulumisenestoaineiden tyypillisiä metalleja [4, 5].

Infrapuna(IR)-analyysit perustuvat molekyylien sidosten värähtelyyn IR-valon vaikutuksesta. Värähdellessään sidokset absorboivat valon energiaa. Mitä enemmän sidosten kemiallinen rakenne poikkeaa toisistaan, sitä selvemmin ero on havaittavissa spektrissä, joka saadaan, kun absorboitunut energia piirretään valon aallonpituuden funktiona. Menetelmää käytetään esimerkiksi öljyn epäpuhtauksien analysointiin, öljyn hapettuessa syntyvien muutosten tarkasteluun ja öljyn lisäaineiden analysointiin. Öljyjen IR-analyyseissä pyritään usein vertaamaan ongelmallista öljyä samaan mutta tuoreeseen öljyyn [4, 5].

Kaasukromatografia perustuu aineen jakautumiselle kahden faasin välille ja sillä arvioidaan tyypillisesti voiteluöljyn sisältämien hiilivetyjen kiehumaa- aluetta sekä hiilivetyketjujen katoamista tai pilkkoutumista. Rasvojen ja öljyjen GC-profiilissa esiintyy tavalli-

sesti leveä vyöhyke, koska ne sisältävät monen tyyppisiä hiilivetyjä, jolloin niiden erotumista toisistaan ei tapahdu. Vyöhykkeen kiehumaa-alue voidaan määrittää vertaamalla näytteen GC-profilia hiilivetystandardisarjan GC-profiiliin. GC-profiilin muoto kertoo lisäksi hiilivetyseoksen laadusta [4, 5].

Röntgenfluoresenssianalyysillä (XRF) voidaan analysoida näytteiden alkuainekoostumusta kvalitatiivisesti ja puolikvantitatiivisesti sekä näytekohtaisen kalibroinnin jälkeen kvantitatiivisesti. Menetelmä soveltuu alkuaineiden analysoimiseen atomipainon mukaan fluorista uraaniin. Puolikvantitatiivisessa analyysissä voidaan samalla kertaa analysoida 79 alkuaineen pitoisuudet [4, 5].

Öljytuotteiden väri määritetään tintometrillä ASTM D6045 -menetelmän [7] mukaisesti. Tutkittava näyte kaadetaan lasikyvettiin, joka asetetaan tintometrinhalogeenilampun valonsäteeseen. Laite mittaa näytteestä kolme eri transmittanssia ja muuntaa arvot automaattisesti ASTM D1500 -väriarvoksi [8]. ASTM D1500 -väriasteikolla 0–8 ilmoitetaan asteikon lukema 0,5 yksikön tarkkuudella. Asteikon lukema nolla tarkoittaa kirkasta ja väritöntä läpinäkyvää tuotetta ja kahdeksan lähes mustaa öljyä [4, 5].

3. Käynninaikainen öljyn kunnan valvonta

Käytännössä pienehköjen voitelu- ja hydraulikkajärjestelmien käytönaikaista valvontaa voidaan tänä päivänä suorittaa optisen hiukkaslaskennan ja öljyn vesipitoisuusmittauksen muodossa, sekä kapasitiivisella dielektrisyysvakion mittauksella, jolla voidaan valmistajien mukaan havaita erilaisia öljyssä tapahtuvia muutoksia [9]. Vesipitoisuuksia voidaan mitata joko absoluuttisina pitoisuuksina (ppm, parts per million) tai suhteellisenä kosteutena eli veden aktiivisuutena öljyssä.

Kullakin materiaalilla on sille ominainen dielektrisyysvakio, joka kuvaa väliaineen kykyä eristää vastakkaisia varauksia toisistaan. Ilmassa dielektrisyysvakio on noin yksi, mutta huoneenlämpöisellä vedellä se on noin 80 [10]. Öljyn kunnanvalvonnassa dielektrisyysvakiota mittaavan anturin (kuva 2) käyttö perustuu vakion muutokseen öljyssä tapahtuvien kemiallisten muutosten tai öljyyn sekoittuneiden vieraiden aineiden takia. Samaa anturia voidaan usein käyttää pinnan korkeuden mittaamiseen eri aineiden rajapinnasta [9]. Parhaiten mittaus sopii öljyn hapettumisen valvontaan, mutta sillä voidaan saada indikaatio myös veden tai jonkin muun vieraan aineen pääsystä voitelujärjestelmään esimerkiksi vuototapauksissa. Mittauksella saatu tulos on kuitenkin lähinnä suuntaa antava ja voi antaa impulssin öljynäytteen ottoon ja sitä kautta tarkempiin öljyanalyysiin.



Kuva 2. Dielektrisyysvakioantureita. Vasemmalla Kavlicon dielektrisyysanturi, keskellä TEMIC-dielektrisyysanturi ja oikealla Delphi Automotiven valmistama dielektrisyysanturi [9].

Koneenosien kulumisen ennustaminen öljyn kunnonvalvonnan avulla on haasteellista, koska voitelujärjestelmässä olevat epäpuhtaudet voivat olla peräisin monista lähteistä; esimerkkeinä voiteluaineesta kemiallisten reaktioiden tuloksena syntyvät epäpuhtaudet, maalatuista pinnoista ja tiivisteistä peräisin olevat epäpuhtaudet ja valmistusperäiset epäpuhtaudet sekä toisaalta kokonaan voitelujärjestelmän ulkopuolelta tulevat epäpuhtaudet. Markkinoilla olevista hiukkaslaskimista suurin osa on optisia valonpeittoon tai -sirontaan perustuvia laitteita. Toinen öljyanalysaattoreissa käytetty mittaustekniikka perustuu laitteen suodattimissa aiheutuvan paine-eron mittaukseen. On-line-hiukkaslaskimella pystytään havaitsemaan laakerin vaurioituminen, mutta mittauspisteen valinta vaikuttaa ratkaisevasti menetelmän herkkyyteen [9]. Mittausjärjestelmässä hiukkaslaskin joudutaan usein asentamaan öljysäiliön ja pumpun jälkeen painelinjaan, jolloin menetelmän herkkyys on huomattavasti värähtely- ja äänimittausta sekä akustisen emission mittausta heikompi. Mikäli hiukkaslaskin voitaisiin asentaa laakerilta lähtevään poistoputkeen, laakerivauriosta saataisiin todennäköisesti nopeampi indikaatio. Tällöin ongelmaksi muodostuu öljyssä oleva ilma. Hiukkaslaskin soveltuu kylläkin yleiseen voitelu- tai hydraulikkajärjestelmän puhtauden valvontaan [4, 9].

Kulumistilanteen arviointiin ferrografia- ja kulumametallianalyysit ovat näitä mittauksia toimivampia ja monipuolisempia, mutta menetelmistä ei ole pystytty kehittämään edullisia mittausteistoja käynninaikaiseen mittaukseen. Röntgenfluoresenssiin perustuva mittausteisto on tosin kaupallisesti saatavissa mutta sopii hintansa puolesta lähinnä laajoihin prosessijärjestelmiin. Magneettikenttään perustuvien ja magneettisia hiukkasia keräävien ilmaisimien käyttökelpoisuus riippuu mm. järjestelmän laajuudesta ja mittausteiston sijoituksesta [4].

Vesipitoisuuden mittaukseen yleisimmät on-line-mittausjärjestelmät ovat kapasitiivisia, optisia tai paineeseen perustuvia [4]. Optiset menetelmät selvittävät vain vesimäärän, mutta eivät anna kattavaa kuvaa öljyn vesitilanteesta eli siitä, esiintyykö vesi liuenneena, emulsiona vai vapaana vetenä. Infrapunaspektroskopiaan perustuvat laitteet ovat kalliita,

ja ne vaativat kalibroinnit eri öljytyyppejä varten tai referenssikyvettien käyttämistä. Öljyssä oleva vesi muuttaa myös sen dielektrisyysvakiota, mutta muutos on varsin pieni ja herkkyys on verraten huono. Toinen tapa saada kapasitiivinen signaali on käyttää kapasitiivisia ohutkalvoantureita vahvistimina. Ne ovat käytännöllisiä sovelluksissa, joissa vesimäärä ei saa ylittää liukoisuusrajaa. Ne antavat tarkan suhteellisen vesipitoisuusarvon (veden aktiivisuus a_w eli suhteellinen kosteus) ilman öljykohtaista kalibrointia tai referenssiä. Myös veden haihduttamiseen perustuvia menetelmiä käytetään vesimäärien valvontaan. Ne voivat mitata paineen kasvua tai kondensoituvan veden määrää. Haittapuolina ovat mekaanisesti monimutkaiset ja kalliit rakenteet [4, 9].

TAN-luvun mittaaminen on hapettumisen mittaauksessa perusmenetelmä. TAN-luvun suoraan määrittämiseen ei ole saatavissa hinnaltaan edullisia on-line-mittauslaitteita. Hapettumista voivat indikoida esimerkiksi dielektrisyysvakion muutos, värimuutos, IR-spektrissä tapahtuvat muutokset, lisäaineiden katoaminen tai viskositeetin muutos [4, 9].

4. Rasvavoitelun erityispiirteet

Voitelurasvojen kuntomäärittämiseen voidaan pääpiirteissään käyttää samoja menetelmiä kuin voiteluöljyjen analysointiin. Erona on kuitenkin se, että monet menetelmät ovat sovellettavissa rasvoille vasta, kun rasva on liuotettu nestemäiseen muotoon. Rasvojen analysoinnissa menetelmät voidaan jakaa suoriin menetelmiin ja liuotinmenetelmiin [3]. Monissa tapauksissa suorien analyysimenetelmien tarkkuus on liuotinmenetelmien tarkkuutta heikompi. Rasvojen kuntomääritykset suoritetaan lähes poikkeuksetta kohteesta otetuille näytteille laboratorio-olosuhteissa.

Suorissa menetelmissä voitelurasvan hiukkassisältö tai muu ominaisuus määritetään näytteestä siinä tilassa missä se on ollut näytettä otettaessa. Koska näyte ei muutu analyysin aikana, sille voidaan suorittaa tämän jälkeen muita analyysejä. Suoria menetelmiä ovat esimerkiksi röntgenfluoresenssi ja suodatuskoe sekä sähkömagneettiset menetelmät. Yksinkertaisimpiin menetelmiin kuuluu lisäksi suora mikroskopia. Federal test method FED-STD-791/3005.4 -standardin mukaisessa menetelmässä [11] näytettä tarkastellaan sen jälkeen, kun sitä on puristettu kahden lasilevyn väliin ohueksi kerrokseksi. Tätä muistuttava menetelmä on naarmuttamiskoe, ASTM D 1404 [12], jossa voitelurasvanäyte asetetaan kahden akryylilevyn väliin. Näitä levyjä kierretään toisiinsa nähden, minkä jälkeen levyjä tarkastellaan mikroskoopilla. Näin voitelurasvanäytteen sisältämistä hiukkasista saadaan käsitys konkreettisella tavalla [13].

Liuotinmenetelmissä voitelurasvanäyte liuotetaan ennen analyysin suorittamista. Tavanomaisia voitelurasvoja varten on helposti löydettävissä käyttökelpoisia liuotinyhdistelmiä, mutta esimerkiksi silikonirasvat ja polyurearasvat ovat varsin heikosti liukenevia.

Liutinmenetelmiä ovat esimerkiksi hiukkaslaskenta, ferrografia ja mikrosuodatus. Voitelurasvojen hiukkaslaskentaa haittaavat jossain määrin voitelurasvan paksunninrakenteen liukenemattomat jäänteet, joita detektori ei erota varsinaisista hiukkasista. Menetelmällä ei voida ottaa kantaa hiukkasten laatuun [14]. Ferrografiamenetelmän soveltamisen vaikeutena on rasvarakenteen luottaminen niin pienijakoiseksi, että näytelevyn valomikroskooppitarkastelu onnistuu luotettavasti.

Rasvanäytteiden analysointiin voidaan käyttää myös kemiantekniikkaan perustuvia menetelmiä. Tällaisia ovat esimerkiksi atomiemissiospektroskopia (ICP-AES) ja atomiabsorptiospektroskopia (AAS) alkuainepitoisuuksien määrittämiseen [15, 16]. Liutetun rasvanäytteen kohdalla vaikeutena näissä menetelmissä on hiukkasten ja voiteluaineen sisältämien alkuainepitoisuuksien erottaminen toisistaan. Mikäli epäpuhtaushiukkasia voidaan eristää voitelurasvasta riittävän suuri tilavuus, hiukkasten faasikokoonpano on mahdollista määrittää röntgendiffraktiolla. Vastaavissa tapauksissa voidaan käyttää energiadispersiivistä spektroskopiaa (EDS) ja jo aiemmin mainittua röntgenfluoresenssia hiukkasten alkuainekoostumuksen ja siten mahdollisen alkuperän määrittämiseen [13].

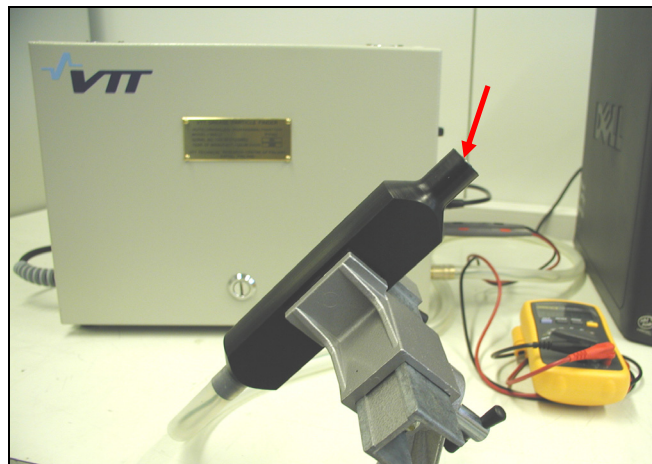
Hapettumisen arviointiin käytetään öljyjen analysoinnissa yleisesti kokonaishappoluvun TAN [17] määrittämistä, mutta sen soveltuminen voitelurasva-analyysiin on epävarmempaa. Rasvoilla FTIR-analyysi soveltuu hapettumisasteen arviointiin TAN-määrittämistä paremmin. Voitelurasvan hapettuminen ilmenee usein voitelurasvan tummenemisenä, mikä on havaittavissa silmämääräisesti. Toiminnallisesti lisäaineiden toimivuutta voidaan testata esimerkiksi nelikuulakokeella [18] tai muulla tribologisella kokeella. Muita koejärjestelyjen avulla testattavia muutoksia ovat esimerkiksi voitelurasvan jäykkyyden muutos, joka on todettavissa tunkeumakokeella [19], sekä perusöljyn ja paksuntimen välisen suhteen muuttuminen, joka voidaan määrittää standardin ASTM D 4425 [20] mukaisella öljynerotuskokeella [13, 21].

5. Esimerkki rasvavoideltujen vierintälaakerien kuntomäärittämisestä

Voitelurasvassa olevien epäpuhtauksien havaitseminen on tärkeää, sillä vierintälaakerien kestoiän kannalta voiteluaineiden kontaminaatiot ovat vahingollisia, pahimmillaan jopa tuhoisia. Epäpuhtauksien aiheuttamien ongelmien hallitsemiseksi VTT on kehittänyt pyörrevirtatekniikkaan perustuvan voitelurasva-analyysiaattorin (P'FIND). Analyysiaattori kehitettiin vuosina 1998–1999 osana projektia Condition Monitoring of Grease Lubricated Rolling Bearings [22].

Metallihiukkaspitoisuuden määrittämisessä P'FIND-menetelmällä pyörrevirtoja indusoidaan metallihiukkasiin vaihtosähköllä ohjatun sähkömagneettisen mittausanturin avulla.

Ennen määrittämisen alkua pieni määrä tutkittavaa rasvanäytettä levitetään anturin päähän. Kaikkiin anturin läheisyydessä oleviin metallihiukkasiin indusoituneiden pyörrevirtojen yhteisvaikutus muuttaa mittausanturin todellisen impedanssin näennäiseksi impedanssiksi, ja impedanssimuutos on mitattavissa vertailuvahvistimen ulostulosignaalista. Tietokone vastaanottaa jännitesignaalin ja mittausohjelma laskee tästä metallihiukkaspitoisuuden painoprosentteina. Koska elektroninen mittauslaitteisto antaa tuloksena metallihiukkaspitoisuuteen nähden suhteellisen jännitearvon, laitteisto on kalibroitava kalibroitamisnäytteen avulla [3].



Kuva 3. P'FIND-analysointilaitteen ulkonäkö [3]. Mittausanturin paikka on merkitty kuvan nuolella.

P'FIND-analysointilaitteen vahvuuksia ovat analysointinopeus, helppokäyttöisyys, taloudellisuus ja kiinteiden metallihiukkasten havaitsemiskyky. Menetelmä antaa reaaliajassa mittaus tuloksen noin $\pm 0,1$ painoprosenttiyksikön tarkkuudella ilman rasvanäytteen esikäsittelyä, ja näytettä voidaan myöhemmin käyttää esimerkiksi muihin analyysihin. Analysointimenetelmä soveltuu erityisesti vierintälaakereille, joiden rutiinimaisissa tarkastuksissa riittää usein voitelurasvan metallihiukkaspitoisuuden määrittäminen riittävällä tarkkuudella [3]. Voitelun toimivuudesta voidaan tehdä päätelmiä mittaamalla metallihiukkaspitoisuutta esimerkiksi laakeripesän eri osista otetuista voitelurasvanäytteistä, jolloin voidaan arvioida jälkivoitelun riittävyyttä ja voitelurasvan laakeripintoja huuhtelevan vaikutuksen toimivuutta asianomaisessa laakerointiratkaisussa.

6. Teollisuuden ongelmakohdat

Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka -hankkeen voitelu-osiossa paneudutaan rasvavoitelujen vierintälaakerointien problematiikkaan. Tavoitteena on tällöin oppia tunnistamaan virheellisiä voitelutilanteita ja voitelujärjestelmien toimintoja, jolloin kyetään paremmin ennakoimaan kehityksessä olevat vauriot.

Teollisuusyrityksissä suoritettun kartoituksen perusteella voidaan arvioida rasvavoideltujen laakereiden kokonaismerkitystä. Esimerkiksi paperi- tai terästehtaassa voitelupisteitä voi olla kymmeniä tuhansia, ja voiteluun käytettävä vuosittainen työaika on miestyövuosien luokkaa. Tyypillisiä rasvavoidelluilla laakereilla varustettuja kohteita ovat telat, pumput, puhaltimet, sekoittimet, kuljettimet ja sähkömoottorit. Rasvakeskusvoitelujärjestelmiä kokonaisella tehtaalla on tyypillisesti kymmeniä ja yhteen järjestelmään voi olla kytkettynä satoja laakereita. Voitelukeskuksen ja kauimpana olevan voideltavan kohteen välillä on usein kymmenien, jopa satojen metrien matka ja kymmenien metrien korkeusero. Samassa järjestelmässä olevien laakerien käyntilämpötilat, värähtelyt ja pyörimisnopeudet poikkeavat toisistaan, mikä asettaa voitelurasvalle ja voitelun toteutukselle suuria vaatimuksia.

Ongelmakohtien tunnistamisessa on keskeistä voiteluketjun ymmärtäminen kokonaisuutena. Rasvavoidelluissa laakereissa on monia tekijöitä, jotka vaikuttavat toisiinsa voitelutapahtumassa. Näitä ovat mm. rasvan laatu, annostelun määrä, jälkivoiteluväli, laakeripesän rakenne, kierrosluku, kuormitus, lämpötila, tiivistys ja rasvan poisto. Lisäksi eräissä tapauksissa automaattivoitelulaitteistoissa rasvan viipymä putkistossa on pitkä ja olosuhteet, kuten lämpötilat, värähtelyt ja painenvaihtelut vaikuttavat epäedullisesti rasvaan. Kartoituksen perusteella sekä öljy- että rasvavoideltujen vierintälaakerien vauriot havaitaan teollisuuslaitoksissa yleisimmin värähtelymittauksilla ja joissakin tapauksissa kuulohavaintojen perusteella. Rasvavoitelun kompleksisuudesta johtuen rasvalla voideltujen vierintälaakerien elinikä ei ole yhtä helposti hallittavissa kuin öljyvoideltujen laakerien. Löytämällä voiteluketjusta ongelmakohtat, panostamalla niiden kehittämiseen ja valvontaan sekä yhdistämällä eri menetelmiä on mahdollista parantaa rasvavoideltujen vierintälaakerien luotettavuutta ja ennakoida kehittymässä olevat vauriot varhemmin kuin tähän asti on ollut mahdollista.

7. Yhteenveto

Tässä esityksessä esiteltiin *Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka* -hankkeessa suoritettavan kehitystyön pohjaksi voiteluaineiden kunnonvalvonnan perusteita sekä rasvavoideltujen kohteiden valvonnan erityispiirteitä ja ongelmakohtia. Hankkeen voiteluosiossa tullaan paneutumaan rasvavoideltujen vierintälaakerointien problematiikkaan. Tavoitteena on tällöin oppia tunnistamaan virheellisiä voitelutilanteita ja voitelujärjestelmien toimintoja, jolloin kyetään paremmin ennakoimaan kehittymässä olevat vauriot.

Lähteet

- [1] Hunt, T. Condition Monitoring of a Mechanical and Hydraulic Plant. Iso-Britannia: Chapman & Hall, 1996. 270 s.
- [2] Vidqvist, V., Tervo, J. & Parikka, R. Öljyjen analysointiin tarjolla olevat kaupalliset menetelmät ja palvelut. Espoo, VTT Industrial Systems, 2002. 15 s. + liitt. 3 s. BTUO43-021024.
- [3] Andersson, P. Uusi menetelmä voitelurasvan metallisten epäpuhtaushiukkasten määrittämiseen. Tribologia – Finnish Journal of Tribology, 21(2002)1, s. 28–34. ISSN 0780-2285.
- [4] Parikka, R., Tervo, J., Vaajoensuu, E., Vidqvist, V., Hiukka, R. & Kiviranta, A. Koneiden voitelu- ja hydraulikkajärjestelmien on line -kunnonvalvonnan ja diagnostiikan tehostaminen. Kunnossapito 2004, Vol. 18, No. 4. Erikoisliite "Kunnossapitokoulu".
- [5] Parikka, R. Öljyn kunnonvalvonnan perusmittaukset. Kunnossapito, Vol. 18 (2004) 5, s. 24–26.
- [6] Korpi, A., Manninen, A., Rinkinen, J. & Suontama, K. Öljyjen kunnonvalvonta. Kunnossapito 2003. Erikoisliite 1/2003.
- [7] American standard ASTM D 6045. Standard Test Method for Color of Petroleum Products by the Automatic Tristimulus Method.
- [8] American standard ASTM D 1500. Standard Test Method for ASTM Color of Petroleum Products (ASTM Color Scale).
- [9] Parikka, R. & Vidqvist, V. Kaupalliset anturit ja mittauslaitteet öljyjen kunnonvalvontaan. FLUID Finland, Vol. 3 (2004) 3, s. liite Fluid klinikka no 9.
- [10] Carey, A.A. & Hayzen, A.J. The Dielectric Constant and Oil Analysis. <http://www.practicingoilanalysis.com> [haettu 20.5.2003].
- [11] Federal test method FED-STD-791/3005.4, Dirt content of grease, 30 Sept. 1986
- [12] American standard ASTM D 1404. Standard test method for estimation of deleterious particles in lubricating grease.

- [13] Andersson, P. Grease condition monitoring methods – Condition monitoring of grease lubricated rolling bearings. Espoo, Finland, VTT Manufacturing Technology, 2000. Report VAL B-396. 34 s.
- [14] Andersson, P. & Sainio, H. Automatic particle counting on grease samples. Espoo, Finland, VTT Manufacturing Technology, 1999. Report VAL B-398. 17 s.
- [15] German standard DIN 51815. Testing of lubricants; determination of the content of lithium, sodium and calcium of greases; determination by atomic absorption spectroscopy.
- [16] German standard DIN 51831. Testing of lubricants; determination of fraction of solids, graphite and/or molybdenum sulphides in lubricating greases.
- [17] American standard ASTM D 664. Acid number by potentiometric titration.
- [18] German standard DIN 51350. Testing of lubricants; testing in the Shell four-ball tester.
- [19] German standard DIN ISO 2137. Petroleum products; lubricating grease: determination of cone penetration.
- [20] American standard ASTM D 4425. Standard test method for oil separation from lubricating grease by centrifuging.
- [21] Parikka, R. & Sainio, H. Vierintälaakerien rasvavoitelun perusteet. Espoo, VTT Tuotteet ja tuotanto, 2004. Tutkimusraportti BTU043-041258. 31 s. + liitt. 4 s.
- [22] Miettinen, J., Andersson, P. & Sainio, H. Condition monitoring of grease lubricated rolling bearings – rasvavoideltujen vierintälaakerien kunnonvalvonnan tutkimusprojekti. Kunnossapito, Vol. 13 (1999) 3, s. 28–31.

Tekijä(t) Helle, Aino (toim.)			
Nimeke Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka Espoo, 1.12.2004			
Tiivistelmä Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka -hankkeen tavoitteena on luoda menetelmiä teollisuuden koneiden ja tuotantolinjojen käynnissäpidon hallitsemiseksi kehittämällä tekniikkaa niiden toimintakunnon, vikaantumistodennäköisyyden ja jäljellä olevan käyttöiän ennustamiseen. Käynnissäpidolla ja kunnossapidolla on merkittävä vaikutus pääoman kiertonopeuteen ja tuottoasteeseen. Käyttövarmuusmalli kokoaa yhteen laitoksen käytettävyyteen vaikuttavat tekijät ja tarjoaa siten hyvän lähtökohdan muutosten ja vaihtoehtojen arvioimiseen. Hankkeessa tehtävä tutkimus pohjautuu kymmeneen teollisuuden strategisten tarpeiden pohjalta valittuun caseen. Joulukuussa 2004 pidetyssä seminaarissa esiteltiin ensimmäisen vuoden aikana saatuja tuloksia ja tehtyjä selvityksiä. Tutkimuksissa on selvitetty taajuusvastefunktioiden hyödyntämistä kunnonvalvonnassa. Nosturin kunnonvalvonnan kehittämiseen liittyen on tutkittu öljyanalyysien ja värähtelymittausten soveltuvuutta. Langattomia tiedonsiirtosovelluksia on tutkittu erityisesti liittyen sähkökäyttöjen kunnossapitoon ja etävalvontaan. Useista lähteistä peräisin olevien mittaustietojen yhdistämisen problematiikkaa ja prognoosien sijoittumista kunnonvalvontajärjestelmiin on selvitetty. Kohteen kolmiulotteisen mallin käyttäminen käyttöliittymänä mahdollistaa datan visuaalisen esittämisen käyttäjälle. Kunnossapidon kehityskohteiden tunnistamiseksi neljässä hankkeen case-kohteessa on lähdetty liikkeelle kriittisyysanalyysillä. Voiteluaineiden kuntomääriä käytetään yhä enenevässä määrin voideltujen kohteiden valvonnassa. Voiteluaineiden kunnonvalvonnan perusteita on esitelty hankkeessa tehtävän kehitystyön pohjaksi ja rasvavoideltujen kohteiden erityispiirteitä ja ongelmakohtia on selvitetty.			
Avainsanat prognostics, condition monitoring, diagnostics, maintenance, reliability			
Toimintayksikkö VTT Tuotteet ja tuotanto, Metallimiehenkuja 6, PL 1702, 02044 VTT			
ISBN 951-38-6297-6 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)			Projektin numero
Julkaisu-aika Maaliskuu 2005	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivu- 117 s.	Hinta -
Projektin nimi		Toimeksiantaja(t)	
Avainnimeke ja ISSN VTT Symposium 1455-0873 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Julkaisija VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puhelin. 020 722 4404 Fax 020 722 4374	

Published by



Series title, number and report
code of publication

VTT Symposium 236
VTT-SYMP-236

Author(s) Helle, Aino (ed.)			
Title Prognostics for Industrial Machinery Availability Espoo, 1.12.2004			
Abstract The objective of the research project ‘Prognostics for Industrial Machinery Availability’ is to generate methods for improving and maintaining the availability of industrial machinery by developing techniques to enable prognosis of the operational condition, failure probability and remaining operating life of the machinery and production lines. The R&D work carried out in the project is based on ten industrial cases selected on the basis of the strategic needs of the industrial partners. The seminar held in December 2004 gave an overview of the project and presented results and studies made during the first project year. These include for example the use of frequency response function in condition monitoring, oil analysis and vibration measurements in crane condition monitoring, wireless data transfer in remote monitoring and maintenance of electric drives, combining multi source measurement data for prognosis, visualization of data by using three dimensional models as a user interface, risk analyses, as well as the special features of grease lubricated components.			
Keywords prognostics, condition monitoring, diagnostics, maintenance, reliability			
Activity unit VTT Industrial Systems, Metallimiehenkuja 6, P.O.Box 1702, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-6297-6 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Project number	
Date March 2005	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 117 p.	Price -
Name of project		Commissioned by	
Series title and ISSN VTT Symposium 1455-0873 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Publisher VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4404 Fax +358 20 722 4374	

Teollisuuden tuotantolaitteiden ja -menetelmien sekä niihin liittyvien tietojärjestelmien kehittyminen ja monimutkaistuminen asettaa niiden käytövarmuuden hallinnalle entistä suurempia haasteita. Samalla taloudellisten riskien, ympäristövaikutusten ja turvallisuuden hallintaan kohdistuu yhä suurempia vaatimuksia. Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka-hankkeen tavoitteena on luoda menetelmiä teollisuuden koneiden ja tuotantolinjojen käynnissäpidon hallitsemiseksi kehittämällä tekniikkaa niiden toimintakunnon, vikaantumistodennäköisyyden ja jäljellä olevan käyttöiän ennustamiseen. Hankkeessa tehtävä tutkimus pohjautuu kymmeneen teollisuuden strategisten tarpeiden pohjalta valittuun caseen. Joulukuussa 2004 pidetyssä seminaarissa esiteltiin ensimmäisen vuoden aikana saatuja tuloksia ja tehtyjä selvityksiä.

VTT TIETOPALVELU
PL 2000
02044 VTT
Puh. 020 722 4404
Faksi 020 722 4374

VTT INFORMATIONSTJÄNST
PB 2000
02044 VTT
Tel. 020 722 4404
Fax 020 722 4374

VTT INFORMATION SERVICE
P.O.Box 2000
FIN-02044 VTT, Finland
Phone internat. + 358 20 722 4404
Fax + 358 20 722 4374
