

Kunnossapito ja prognostiikka



Vuosiseminaari 2005

VTT SYMPOSIUM 239

Avainsanat:

prognostics, maintenance, reliability, condition monitoring, diagnostics, service life, operational reliability, modelling, fuzzy cognitive maps, robots

Kunnossapito ja prognostiikka

Prognos-vuosiseminaari 2005

Tampere, 3.11.2005

Toimittaja

Aino Helle

VTT Tuotteet ja tuotanto

Järjestäjä

VTT Tuotteet ja tuotanto



ISBN 951-38-6301-8 (nid.)

ISSN 0357-9387 (nid.)

ISBN 951-38-6302-6 (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, FI-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, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7077

Toimitus Anni Kääriäinen

Otamedia Oy, Espoo 2005

Esipuhe

Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka (Prognos) -tutkimushanke käynnistyi syksyllä 2003. Tekesin, yritysten ja VTT:n rahoittamassa kolmivuotisessa tavoitetutkimushankkeessa pyritään kehittämään sekä sovelluskohtaisia että geneerisiä ratkaisuja teollisuuden käynnissäpidon hallinnan parantamiseksi. Prognostiikan haasteena on kyetä mitausten, 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 suunnittelemattomien seisokkien välttämiseksi.

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

Hankkeen ensimmäinen seminaari pidettiin syksyllä 2004 Otaniemessä Espoossa, ja siellä esitetyt hanketta ja sen ensimmäisen vuoden tutkimustuloksia ja selvityksiä käsittelevät artikkelit on julkaistu seminaarijulkaisuna. Hankkeen tuloksia on lisäksi julkaistu useissa kansainvälisissä ja kotimaisissa konferensseissa, alan lehtijulkaisuissa ja raporteissa. Tähän toiseen seminaarijulkaisuun on koottu hankkeessa mukana olevien tutkimustahojen artikkelit Tampereella marraskuussa 2005 järjestetyssä vuosiseminaarissa pidetyistä esitelmistä, jotka edustavat toisen projektivuoden tutkimus- ja kehitystyön tuloksia.

Kirjoittajat kiittävät kaikkia niitä tahoja, jotka ovat olleet mukana hankkeessa ja myötävaikuttaneet tutkimustyön toteuttamiseen ja tukemiseen niin teknisessä kuin taloudellisessakin mielessä. Lisäksi toimittaja haluaa hankkeen koordinaattorina kiittää Esko Aholaa, Rautaruukki Oyj, teollisuuden puheenvuorosta seminaarissa.

Sisällys

Esipuhe	3
Eri tietolähteiden käyttö kunnossapidon tukena <i>Toni Ahonen</i>	5
Sumeiden kognitiivisten karttojen (FCM) hyödyntäminen päätöksenteossa <i>Jarmo Keski-Säntti</i>	17
Vaativien säätösovellusten käyttövarmuus automaation elinkaarimallin näkökulmasta <i>Merja Mäkelä</i>	25
Piirreanalyysi koneen toimintatilan määrittämiseksi <i>Ville Järvinen & Juha Miettinen</i>	37
Panostusnosturin kunnonvalvonta vaihteistoöljyjen analysoinnin avulla <i>Pekka Vähäoja</i>	47
Robotin kunnonvalvonta <i>Jari Halme</i>	57
Prognostiikkatulosten 3D-visualisointijärjestelmä <i>Jukka Rönkkö, Veli-Matti Hagberg, Paula Järvinen, Jussi Markkanen & Markus Ylikerälä</i>	73

LIITE 1

Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka -hankkeessa ilmestyneet julkaisut

Eri tietolähteiden käyttö kunnossapidon tukena

Toni Ahonen
VTT Tuotteet ja tuotanto
Tampere

Tiivistelmä

Riskianalyysiä ja siihen liitettyä kriittisyysanalyysiä on käytetty Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka -hankkeessa neljän case-kohteen ensisijaisten kunnossapitokohdeiden tunnistamiseksi. Tämä järjestelmien nykytilan kartoitus luo tietopohjan kunnossapidon jatkuvalla kehittämiselle. Kunnossapidon tulee vastata jatkuvasti järjestelmässä tapahtuviin muutoksiin. Eri lähteistä kerättävän käyttövarmuustiedon hyödyntämiselle tarvitaan malli, jonka tuloksena kunnossapito-ohjelman painotuksia voidaan tarvittaessa muuttaa. Bayeslaiset menetelmät vikahistorian eri lähteiden yhdistämiseen, valmistajan ennusteisiin sekä noudatettavaan kunnossapito-ohjelmaan ja käyttäjien kokemuksiin liitettynä muodostavat kehittyvän kunnossapidon suunnittelumenetelmän rungon.

1. Johdanto

Järjestelmästä kerätyn vikatilastoinnin analysoinnilla on mahdollista osoittaa tiettyjen vikatyyppeiden esiintymistäajuus. Usein on kuitenkin niin, että läheskään kaikkia mahdollisia vikatyyppejä koskevia havaintoja ei ole aineistossa tai aineistossa on hyvin vähän havaintoja. Järjestelmän vikatyyppeiden kriittisyyden arvioinnin tuleekin perustua sekä vikatilastoinnin että asiantuntija-arvioiden yhteiskäyttöön. Kunnossapito-lehden artikkelissa ("Kunnossapidon kehityskohteiden tunnistaminen") kuvattua kriittisyysarviointimenetelmää [1] on käytetty Prognos-hankkeen eri case-kohteissa. Kehittyvän kunnossapidon suunnittelumenetelmää ollaan tällä hetkellä kehittämässä ja soveltamassa case-kohteen kunnossapito-ohjelman päivittämisen myötä. Kunnossapito-ohjelman päivittämisen päätaavoite on järjestelmän muuttuneeseen tilanteeseen vastaaminen.

2. Kriittisyyden arviointi käyttökokemustiedon perusteella

2.1 Tietolähteet ja kriittisyyden arviointi

Kunnossapidon tietojärjestelmien kirjaukset toimivat analyysien perustietolähteenä. Vikaantumistieto vastaavista järjestelmistä voi toimia olennaisena lisänä käsiteltävän järjestelmän kriittisyyden arvioinnissa.

Osajärjestelmän kriittisyyden arviointiin vaikuttavat valitussa tarkastelutavassa kaksi seikkaa: vikataajuus ja yksittäisen vian aiheuttamat keskimääräiset kustannukset. Määrittäminen voi tapahtua vikatapahtumien kirjausten perusteella sekä asiantuntija-arvioiden pohjalta. Vikojen aiheuttamat kustannukset muodostuvat kunnossapito- ja tuotannonmenetyksekustannuksista. Useiden järjestelmien kohdalla tuotannonmenetyksekustannukset muodostavat suurimman osan vikojen aiheuttamista kokonaiskustannuksista. Tosin esimerkiksi vähemmän kriittisten tai osittainkin redundanttisten järjestelmien kohdalla korjauskustannukset voivat olla kokonaiskustannusten suurin tekijä.

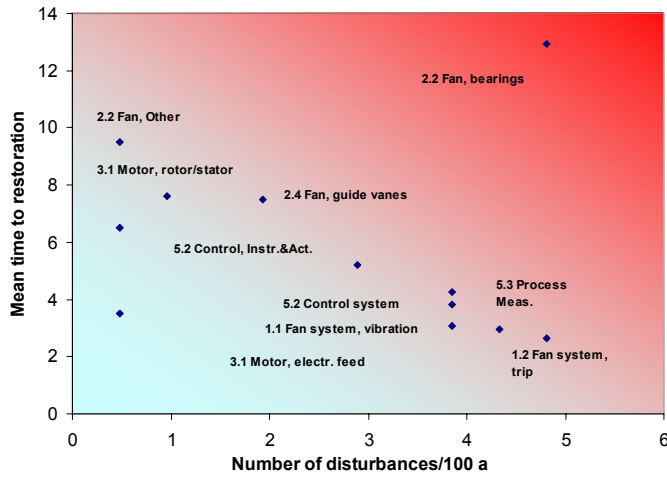
2.2 Laitosten käyttökokemusdata

Vikakirjaukset ovat usein vapaassa muodossa ja luokittelua vikatyypin, position tai rakennehierarkian mukaan ei ole tehty, tai se on tehty puutteellisesti. Riittävän tarkat kirjaukset helpottavat jälkikäteen tehtävää analyysityötä ja mahdollistavat luotettavat tulokset. Kehittyvän kunnossapidon suunnittelumenetelmä edellyttää nimenomaan asianmukaisen käyttökokemustiedon soveltamista. Onkin oletettavaa, että esimerkiksi vika- ja kunnossapitokirjausten laatu on monessa sovelluskohteessa ensimmäisten parannettavien seikkojen joukossa.

2.3 Valmistajan näkökulma

Laitevalmistajalla on usein halu kerätä vika-aineistoa laitoksilta tuotekehityksen tueksi. Tällöin on mahdollista saada hyvinkin laaja aineisto, josta johtopäätöksiä tekeminen kunnossapidon kehitys- tai seurantakohteiden valitsemiseksi toimitettavaa järjestelmää tai osajärjestelmää koskien on luotettavampaa kuin yksittäisen laitoksen suppean aineiston perusteella. Eri tuotantolaitosten järjestelmäkokoonten sekä menettelytavat järjestelmän kunnossapidon ja vikaantumis- ja kunnossapitotietojen keräämisen vaihtelevat. Yleisesti on odotettavissa, että kaikkia vikatapahtumia ei ensinkään tilastoida. Tarkastelu voidaan rajata joka tapauksessa merkittäviin vikaantumisiin ja kohteisiin. Onkin todennäköistä, että merkittävistä vikatapahtumista on saatavissa jokseenkin asianmukaiset

kirjaukset. Tosin pienemmät toistuvat tapahtumat saattavat jäädä huomioimatta. Pienempien häiriöiden merkitys voi olla huomattava, jos niiden määrä on suuri.

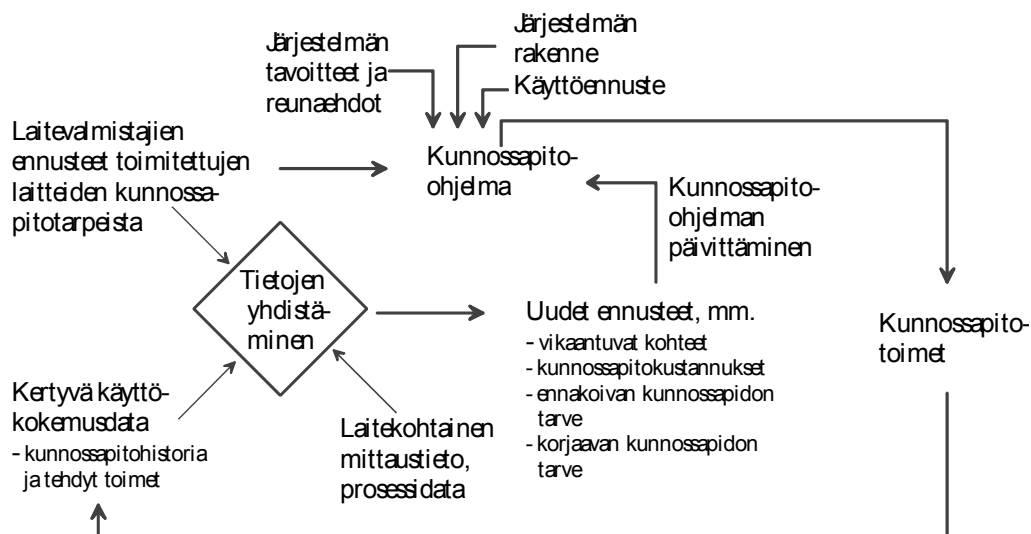


Kuva 1. Esimerkki laitevalmistajan vikatietojen analysoinnista.

Kuvassa 1 on esitetty esimerkki, jossa vikatapaukset on luokiteltu järjestelmähierarkian mukaan. Tällöin on mahdollista arvioida osajärjestelmätasojen kriittisyyttä perustuen vikojen määrään aikayksikköä kohden ja vikojen seurauksiin (mm. tuotannon keskeytykset). Osajärjestelmien päätasolle tehtävä luokittelu ei kuitenkaan usein riitä tarkkuudeksi kun tavoitteena on kunnossapito-ohjelman perusteltu päivittäminen. Aineisto tulee esikäsitellä ja luokitella siten, että vikatyypit saadaan kohdistettua selkeästi rajattuihin ja riittävän tarkan kokonaisuuden muodostaviin osajärjestelmiin tai mahdollisesti komponentteihin.

3. Käyttökokemustietojen yhdistäminen

Aiemmat kokemukset vastaavanlaisista järjestelmistä voivat toimia hyvänä lähtökohtana kunnossapito-ohjelman määrittämiselle. Varsinaista ”omaan” järjestelmää koskevaa käyttökokemustietoa tulee käyttää tämän alkuperäisen tiedon päivittämiseen. Kuvassa 2 on esitetty ”Kehittyvän kunnossapidon suunnittelumenetelmän” kaavio, jossa on esillä tarvittavat tietolähteet kunnossapito-ohjelman jatkuvalle kehittämiselle.



Kuva 2. Kehittyvä kunnossapito.

Kaiken saatavilla olevan informaation muuttaminen yleispäteväksi matemaattiseksi päätöksenteoksi on hankalaa, ja usein sen tavoittelemisen ei ole tarkoituksenmukaista. Päätöksentekomallin tulisi olla aina sovelluskohtainen. Kuvan 2 kaavion malli voi toteutua usein hyvin käytännönläheisellä tavalla ja eri tietolähteiden ja asiantuntijoiden yhteistyöllä. Usein ns. hiljaisen tiedon hyödyntämisen tehostaminen ja liittäminen esimerkiksi kirjatun käyttökokemustiedon käsittelyyn on kannattavaa. Tämä toteuttaa suuren osan kuvan 2 mallin perimmäisestä ajatuksesta.

Jotta kunnossapitoa voidaan kehittää, sen tehokkuutta on pystyttävä mittaamaan. Tehokkuuden tunnuslukuja on esitetty standardissa PSK 7501. Tuotantojärjestelmän tehokkuutta mitataan mm. käyttöasteella, käytettävyydellä ja kokonaistehokkuudella. Kunnossapidon vaikutus näihin seurantamuuttujiin on epäsuora, ja se tulee ottaa seurannassa huomioon. On lisäksi huomioitava, että käytettävyyden seurannan ja ohjauksen tueksi valittavat mittarit on sovellettava teollisuudenalan ominaispiirteitä vastaaviksi [2]. Korjaavan kunnossapidon osuuden sekä myös kriittisyysasteeltaan erilaisten vikatyypin määrien seuraaminen on ehkäisevän kunnossapidon tehokkuuden seuraamiseksi em. mittareiden lisäksi perusteltua. Edellä esitetty osajärjestelmäluokittelu on edellytys seurannalle.

4. Bayeslaiset menetelmät vikatietojen analysoinnissa

Bayeslainen lähestymistapa mahdollistaa eri lähteistä tarkasteltavaa suuretta koskevien tietojen yhdistämisen huomioiden näihin tietoihin liittyvän epävarmuuden. Käyttövarmuus- ja vikamalleja koskevat bayeslaiset mallit vaativat kuitenkin usein esimerkiksi integraalilausekkeiden numeerista ratkaisemista ja hyvin raskasta laskentaa. Lähtökohdiana on kehittää menettelytapa, jonka etuna on matemaattinen helppous ja tätä kautta

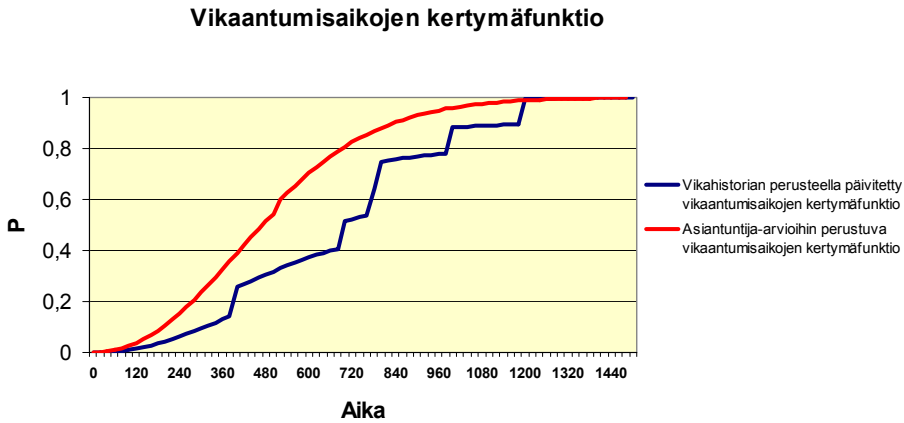
sovellettavuus mm. perinteisissä toimistosovelluksissa, esim. MS Excel. Avenin [3] mukaan bayeslaisuus nähdään riskianalyysinkin kentällä useasti hyvin teknisenä ja teoreettisena ja ymmärrys sen perimmäisestä tarkoituksesta jää hämäräksi. Tässä työssä onkin keskitytty bayeslaiseen lähestymistapaan tarkasteltavien suureiden, esim. vikataajuuden, kautta eikä niinkään mallin parametrien tarkan määrittämisen kautta.

Vikatietojen mallintaminen jakautuu yleisesti kahteen osa-alueeseen: korjattavien järjestelmien ja ei-korjattavien järjestelmien malleihin. Ei-korjattavien järjestelmien eli käytännössä vaihtokomponenttien mallintaminen tarkoittaa eri jakaumien hyödyntämistä komponentin vikaantumisaikojen mallintamiseen.

Yleisimmin käytetty vikaantumisaajan malli on eksponentiaalijakauma, jonka oletuksena on vakiovikataajuus. Eksponentiaalijakauman käyttöä puoltaa sen yksinkertaisuus, mutta vakiovikataajuusoletus ei usein ole perusteltu. Weibull-jakauman käyttö sen sijaan mahdollistaa ajan myötä paranevien ja huononevien komponenttien eliniän mallintamisen.

Koska Weibull-jakauman $f(t) = a\beta t^{\beta-1} \exp(-at^\beta)$ parametrien a ja β ratkaisut on määriteltävä toistensa suhteen, niiden laskeminen vaatii iterointia. Ei-parametristen bayeslaisten menetelmien käyttö luotettavuustarkasteluissa on tilastomatematiikan yksi kehittyvistä aloista. Kuvassa 3 on esitetty Brandowskin et al. [4] kehittämä malli järjestelmän tai komponentin luotettavuusfunktion ja vikaantumisaikojen kertymäfunktion laatimiseen asiantuntija-arvioiden sekä käyttökokemusdatan perusteella. Menetelmän hyviä puolia ovat sen yksinkertainen implementointi esimerkiksi Exceliin sekä menetelmän mahdollisuudet painokertoimien asettamiseen asiantuntijoille ja datan pohjalta tehtyjen havaintojen painottaminen suhteessa asiantuntijoihin datan kertyessä. Menetelmässä yksi asiantuntija-arvio vastaa yhtä todellista havaintoa. Kuvan 4 esittämässä tapauksessa asiantuntija-arvioita on ollut neljä kappaletta ja arvioidun komponentin vikaantumisia on kohdelaitoksella tapahtunut kuusi. Bayesin kaavan (1) perusteella voidaan laskea todennäköisyys sille, että vikaantuminen ajoittuu tietylle aikavälille ehtona se, että vikaantumista ei ole vielä tapahtunut.

$$P(T = [t_1, t_2] | T > t_1) = \frac{P(T > t_1 | T = [t_1, t_2]) \cdot P(T = [t_1, t_2])}{P(T > t_1)} \quad (1)$$

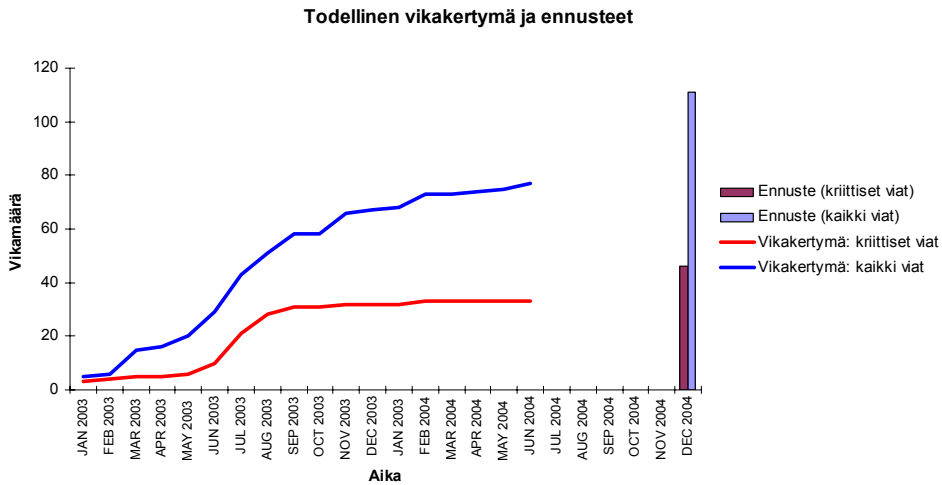


Kuva 3. Esimerkki komponentin tai osajärjestelmän vikaantumisaajan mallintamisesta.

Edellä esitetyt menetelmät pätevät komponenttien eliniän käyttökokemuseräiseen mallintamiseen. Järjestelmätarkasteluihin käytetään prosessimalleja, joiden tuloksena voidaan saada vikamäärien ennuste halutulle aikavälille. Bayeslaiset prosessimallit mahdollistavat esimerkiksi asiantuntija-arvioiden ja havaintojen yhteiskäytön. Prosessimallit jakautuvat homogeenisiin ja epähomogeenisiin Poisson-malleihin, joista ensiksi mainitulla oletuksena on vakiovikataajuus. Epähomogeenisista malleista suosituin lienee Power Law -malli, jonka käytöstä on kirjoitettu paljon. Beiser [5] esittää bayeslaisen ja Power Law -malliin pohjautuvan tavan määrittää korjattavan järjestelmän vikamäärän ennusteen perustuen prioritietoon ja kerättyyn vikahistoriaan. Kyseisen mallin implementointi ei onnistu toimisto-ohjelmistoilla. Sen sijaan Kunttu ja Kortelainen [6] esittävät, että asiantuntijatiedon voi hyödyntää liittämällä sen vikahistorian alkuun. Tällöin esimerkiksi toimistosovelluksessa implementoitava Shaulin [7] menetelmä on käyttökelpoinen asiantuntija-arvioiden ja vikahistorian yhteiskäyttöön. Edellä lyhyesti esiteltyjen menetelmien heikkoudeksi on esitetty niiden kykenemättömyys ennustamaan harvoin tapahtuvien vikaantumisten määriä, ja on todettava, että vikahistoria ei yksin riitä kunnossapidon päätösten tueksi.

Jakauma- ja prosessimallit muodostavat kokonaisuuden, jossa prosessimalleilla on mahdollista saada ennuste koko järjestelmään tai osajärjestelmiin kohdistuvista vikatapahtumista ja jakaumamalleilla ennuste tietyn komponentin eliniästä tai esimerkiksi vakavasta vikaantumisesta. Nämä ennusteet perustuvat täysin käyttökokemushistoriaan eivätkä ota huomioon järjestelmässä tapahtuvia muutoksia, ja sattumanvaraisien tapahtumien mahdollisuudet eivät tule myöskään huomioonotetuiksi. Tuleekin huomata, että asiantuntija- ja muuhun käyttövarmuustietolähteeseen perustuvaa arviota tulee käyttää kunnossapidon pitkäjänteisen suunnittelun tukena. Esimerkiksi kunnosvalvonnan mittauksen käyttö em. informaation kanssa voi mahdollistaa tilanteenmukaisemman toiminnan. Tosin asiantuntija-arvioiden hyödyntämisellä on muutostilanteissakin oltava merkittävä panostus. Kuvan 4 järjestelmän vikakertymäkuvaajasta huomataan, että vikataa-

juus on laskeva. Järjestelmää voidaan mallintaa paranevana epähomogeenisenä Poisson-prosessina.



Kuva 4. Koko järjestelmän vikojen sekä kriittisimpien vikatapausten seuranta ennusteen pohjatietona.

Asiantuntija-arvioiden ja vikatietojen yhdistäminen liian korkealla järjestelmätasolla ei usein johda tyydyttäviin tuloksiin. Jokaisella osajärjestelmällä voi olla useita toiminnallisia vikoja (functional failures) ja vioittumistapoja (failure modes). Järjestelmän kokonaisvikamäärien ja vikojen tuotannollisten kokonaisvaikutusten epätarkkakin ennustaminen voi palvella päätöksentekoa koko järjestelmään kohdistuvien panostusten määrittämisessä. Sen sijaan järjestelmän kunnossapitoa koskevassa päätöksenteossa tulee olla käytettävissä riittävän tarkka luokittelu. Kuvan 4 tapauksessa on kysymys järjestelmän alkuvaiheen positiivisesta vikakehityksestä, jossa järjestelmän ns. lastentaudeista ollaan pääsemässä eroon. Positiivinen kehitys ei välttämättä koske koko järjestelmää, vaikka kokonaisvikamäärät ja tuotannonkeskeytysten aiheuttamat kustannukset olisivatkin kääntyneet laskuun. Riittävän tarkka luokittelu osajärjestelmä- ja tarvittaessa komponenttitasolle sekä kriittisyyden mukaan tuottaa kunnossapitoa parhaiten palvelevan tiedon. Edellä mainittujen menetelmien käyttö luo mahdollisuuden ennusteiden tekemiseen tietyn aikavälin vikamääristä, mutta jo graafisen esityksen laatiminen eri luokkien vikaantumiskehityksestä käytettynä yhdessä järjestelmän asiantuntijoiden tiedon kanssa luo hyvän käsityksen järjestelmän tilasta ja kehityksestä. Kuvan 4 tapauksessa järjestelmän viat on luokiteltu vikojen aiheuttamien kustannusten perusteella eri kriittisyysluokkiin. Huomataan, että kriittisimpien vikojen määrä noudattaa samaa kehitystä kuin kokonaisvikamäärä.

5. Laitekohtaisen mittaustiedon hyödyntäminen käyttökokemustiedon rinnalla kunnossapidon päätöksissä

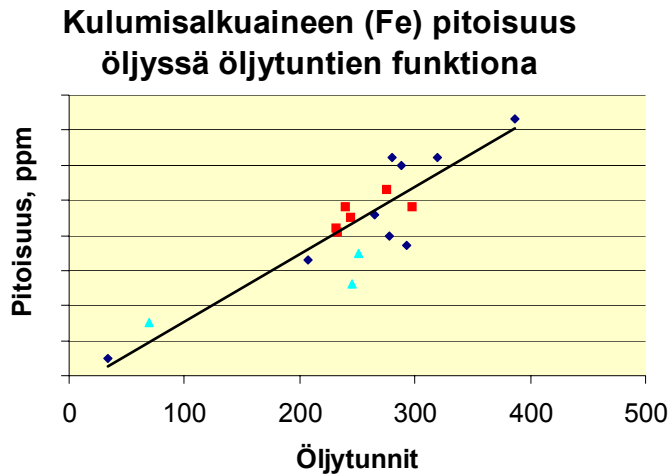
Keski-Säntti [8] toteaa, että mittaustietojen yhteiskäyttö voi tarkoittaa yksinkertaisimmillaan tilastollisten tunnuslukujen laskentaa, mutta monimutkaisempien menetelmien käyttö voi olla hyvin kohderiippuvaista. Tässä luvussa käsitellään yksinkertaisia ja teollisen ympäristön sovelluksiin helposti implementoitavia seurantamenetelmiä sekä hyvin lyhyesti Bayes-verkkojen ja sumean mallinnuksen mahdollisuuksia. Luvussa ei oteta kantaa järjestelmien dynamiikan tarkastelun mahdollisuuksiin, vaikkakin esimerkiksi jo graafisilla tarkasteluilla voidaan saada hyvä käsitys monotonisista muutoksista järjestelmän eri ominaisuuksissa mittausten perusteella.

Käyttökokemustiedon hyödyntämisellä voidaan parhaimmassa tapauksessa määrittää komponenttien vikaantumisaikojen jakauma luotettavasti. Tuotettua informaatiota on mahdollista hyödyntää kunnossapidon suunnittelussa. Laitekohtaisen mittaustiedon hyödyntämisellä voidaan parantaa tilanteenmukaista päätöksentekoa ja toimenpiteiden ajoittamista.

Tiettyjen laitekohtaisten mittausten kohdalla ollaan kiinnostuneita absoluuttisista arvoista, ja on olemassa ainakin epävarma käsitys siitä, mitä muuttujan arvo kertoo prosessin tai järjestelmän todellisesta tilasta. Seuraavassa on esimerkkejä tilastollisen prosessinohjauksen, SPC:n, päätöksentekorajoista:

- Yksittäinen arvo eroaa enemmän kuin 3σ keskiarvosta.
- 3 peräkkäisestä arvosta 2 eroaa enemmän kuin 2σ keskiarvosta.
- 5 peräkkäisestä arvosta 4 eroaa enemmän kuin σ keskiarvosta.
- 8 peräkkäistä arvoa on keskiarvon samalla puolella.
- 8 peräkkäistä arvoa osoittaa monotonista vähenemistä tai kasvamista.
- Riittävän suuri hajonta eksponentiaalisesti painotetussa liukuvassa keskiarvossa.

Yksinkertaisten lineaariseen regressiomalliin perustuvien tarkastelujen tekeminen voi olla useissa tapauksissa perusteltua. Lineaarinen kahden muuttujan regressiomalli muodostuu seuraavasti: $Y = b_0 + b_1X + \varepsilon$, jossa ε on mallinnusvirhe. Tällöin siis voidaan paitsi määrittää matemaattinen kaava tietyn muuttujan käyttäytymiselle myös konkretisoida graafisesti muuttujan arvojen kehittyminen eri tilanteissa tai ajan kuluessa. Selkeät graafiset esitykset soveltuvat erinomaisesti tarkasteluun, jossa tavoitteena on saada nopea katsaus tilanteeseen ja mahdollisiin muutoksiin.



Kuva 5. Esimerkki osajärjestelmän öljyanalyysitulosten seurannasta.

Prognos-hankkeen case-kohteessa on kehitetty off-line-öljyanalyysien tulosten hyötykäyttämistä kunnossapidon tueksi. Vaatimuksena analyysitulosten käytölle on niiden muuttaminen sähköiseen muotoon analyysien tekijän toimittamista kaavakkeista. Öljyanalyysien hiukkaslaskennan avulla on mahdollista havaita mm. suodatuksen puutteita, toimintahäiriöitä ja epänormaalin kulumisen aiheuttamia merkkejä [9]. Tuloksia hyödynnetään paljolti öljyn vaihtoväljen määrittämiseen. Kuvassa 5 on esitetty rautapitoisuuden määrän kehittyminen öljytuntien funktiona. Em. lineaarista regressiomallia on sovellettu ja saatu ns. normaalin tilanteen malli.

Bayeslainen päätöksenteko perustuu prioritiedon ja datan avulla muodostettavien päätöksentekorajojen hyödyntämiseen datapisteiden luokittelussa. Käsitellään yhden muuttujan (x) tapaus, jossa muuttujan arvoille on kaksi luokkaa, ω_1 ja ω_2 . Käytännössä päätöksentekorajat määrittyvät siten, että ω_1 valitaan kun $P(\omega_1 | x) > P(\omega_2 | x)$ [10]. Pelkän prioritiedon perusteella tapahtuva luokittelu määräytyisi ehdon $P(\omega_1) > P(\omega_2)$ mukaan. Edellisen ehdon toteutuminen tarkoittaa, että luokan ω_1 todennäköisyysjakauman arvo kyseisellä muuttujan arvolla ylittää luokan ω_2 todennäköisyysjakauman arvon. Käytännössä luokittelu perustuu siis luokille mallinnettujen todennäköisyysjakaumien vertailuun kussakin pisteessä.

Bayes-verkkojen mahdollisuudet ulottuvat jatkuvien muuttujien tarkasteluun, mutta käytännössä niitä sovelletaan diskreeteissä tapauksissa. Bayes-verkkoja ja bayeslaista todennäköisyyslaskentaa ylipäänsä voidaan käyttää a priori -tiedon päivittämiseen todisteilla (evidence). Mittaustiedon tulosten jakaminen luokkiin tietyn todennäköisyyksin varustettuna perustuen tuloksen merkittävyyteen ja tulosten liittäminen käyttökokemustiedon perusteella laadittuun arvioon vian todennäköisyydestä antavat mahdollisuuden käyttää Bayes-verkkoja tietyn vikatapauksen todennäköisyyden määrittämiseen eri tietolähteitä hyödyntäen.

Bayeslaiset ja todennäköisyysjakautumiin perustuvat menetelmät mallintavat epävarmuutta. Sumean mallinnuksen tavoite on hallita epätarkkuutta. Bayeslaisessa ja sumeassa mallintamisessa voidaan nähdä yhtymäkohtia mutta myös selviä eroja perustuen juuri edellä mainittuun epävarmuuden ja epätarkkuuden käsittelyyn. Sumeaan logiikkaan perustuvia sääntöjä voidaankin jossakin määrin esimerkiksi käyttää pohjana interpoloinnille. Tällöin voidaan edetä datan perusteella määritetyistä ja edellä käsitellyistä klustereista sumeisiin sääntöihin. Sumeiden sääntöjen muodostamisen voidaan katsoa parantavan ymmärrystä mittauksen käytöstä tietyn prosessin tilan tai ongelmatilanteen havaitsemiseksi ilman täsmällistä matemaattista määrittystä. Vaihtoehtoina ovat esimerkiksi Takagi-Sugenon nollannen ja ensimmäisen kertaluvun mallit [11]. Edellisessä mallinnussääntö antaa tietylle ehdolle johtopäätöksenä absoluuttisen arvon, ja jälkimmäinen tuottaa johtopäätöksenä lineaarisen matemaattisen funktion.

6. Yhteenveto

Kunttu et al. [1] toteaa, että yhtenä toimivan kunnossapito-ohjelman lähtökohtana on kunnossapidon tekeminen oikeissa kohteissa ja sopivimpien kunnossapidon menetelmien hyödyntäminen. Kunnossapidon päätökset tulee tehdä perustuen luotettavaan informaatioon. Tämä artikkeli luo katsauksen kunnossapidon päätöksentekoa tukeviin mahdollisuuksiin käyttökokemustiedon ja mittaustiedon hyödyntämisessä. Hyödynnettävien menetelmien kirjo on laaja. Toimintatapojen hahmottaminen informaation luomiseksi kunnossapitopäätösten tueksi on ensisijaista.

Lähteet

- [1] Kunttu, S., Tolonen, S., Reunanen, M., Valkokari, P. Kunnossapidon kehityskohteiden tunnistaminen. Kunnossapito, 8, 2004, s. 20–23.
- [2] Kortelainen, H. Paperi- ja selluteollisuuden käyttövarmuuden mittarit. Tampere, VTT. 1999. RISB; 005. 22 s. + liitt. 7 s.
- [3] Aven, T., Kvaloy, J.T. Implementing the Bayesian paradigm in risk analysis. Reliability Engineering and System Safety 78, 2002, s. 195–201.
- [4] Brandowski, A., Grabski, F. Bayesian estimation of the parameters in safety and reliability models for the subjective priors. 2003. Safety and Reliability.
- [5] Beiser, J.A., Rigdon, S.E. Bayes Prediction for the number of Failures of a Repairable System. IEEE Transactions on Reliability. Vol. 46. No. 2, 1997, s. 291–295.

- [6] Kunttu, S., Kortelainen, H. Supporting maintenance decisions with expert and event data. Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium 2004. Los Angeles, CA, 26–29 Jan. 2004. IEEE, s. 593–599.
- [7] Bar-Lev, S.K., Lavi, I., Reiser, B. Bayesian Inference for the power law process. Ann. Inst. Statist. Math. Vol. 44, No. 4, 1992, s. 632–639.
- [8] Keski-Säntti, J. Monilähteisten mittaustietojen yhdistäminen prognooseiksi ja päätöksenteon tueksi. VTT Symposium 236. Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka. Espoo, 1.12.2004. Helle, A. (toim.). VTT, s. 77–87.
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/symposiums/2005/S236.pdf>
- [9] Parikka, R., Tervo, J., Vaajoensuu, E., Vidqvist, V., Hiukka, R., Kiviranta, A. Koneiden voitelu- ja hydraulikkajärjestelmien on line -kunnonvalvonnan ja diagnostiikan tehostaminen. Kunnossapito, Vol. 18, No. 4, 2004. Erikoisliite ”Kunnossapitokoulu”.
- [10] Seber, G.A.F. Multivariate Observations. New York. John Wiley & Sons. 1984. 712 s.
- [11] Niskanen, V.A. Sumea logiikka – kirkasta älyä ja mallinnusta. WSOY. 2003. 242 s.

Sumeiden kognitiivisten karttojen (FCM) hyödyntäminen päätöksenteossa

Jarmo Keski-Säntti
VTT Elektroniikka
Oulu

Tiivistelmä

Sumeat kognitiiviset kartat on kehitetty älykkäiden menetelmien ja kognitiotieteiden pohjalta, ja nimityksestään huolimatta ne ovat lähempänä neuroverkkoja kuin sumeaa logiikkaa. Karttoja on kehitetty ja sovellettu hyvin laaja-alaisesti, mutta nykyisellään niitä sovelletaan lähinnä tietämyksen kartoitusjärjestelmiin ja päätöksenteon tukijärjestelmiin. Päätöksenteon alalla sovelluskohteita on useita, mutta huolimatta siitä, että menetelmä on helppokäyttöinen ja matemaattisesti yksinkertainen, sen soveltaminen käytännössä törmää skaalaukseen liittyviin ongelmiin. Näihin ongelmiin on kuitenkin olemassa ratkaisuja, jotka tosin monimutkaistavat menetelmän laskentaa mutta eivät kuitenkaan vaikuta helppokäyttöisyyteen.

1. Johdanto

Päätöksenteko ei ole kovinkaan tarkka tieteenala, vaan voidaan sanoa, että se tapahtuu usein prosesseina, jotka ovat sumeita ja sisältävät epävarmuuksia. Mitä monimutkaisemmiksi järjestelmät muuttuvat, sitä hankalammaksi muodostuu niiden kokonaisvaltainen hahmottaminen, mikä puolestaan voi johtaa siihen, että päätöksenteko tehdään periaatteessa tiettyjä linjauksia noudattaen. Tällaiset linjaukset voidaan tehdä yksinkertaisimmillaan nyrkkisääntöihin perustuen, mikä käytännössä on nopea tapa ratkaista asioita, muttei kuitenkaan ole aina edes järkevää. Jotta päätökset olisivat myös järjestelmän alemmilla tasoilla järkeviä, tarvitaan erittäin hyvää tietämystä ja apuvälineitä, jotka koostavat olemassa olevan tietämyksen helpommin hahmotettavaksi.

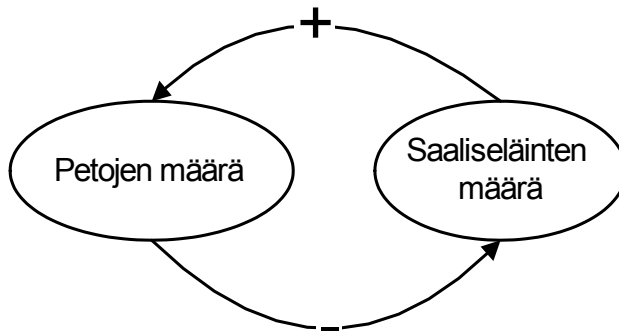
Tarve erilaisille päätöksentekoa tukeville menetelmille on suuri, ja lukuisia menetelmiä on kehitetty riippuen siitä, tarkastellaanko järjestelmiä strategisesta, taktisesta vai operatiivisesta näkökulmasta. Olennaista on myös se, että päätöksenteossa tekijöiden määrittelyllä on hyvin suuri vaikutus siihen, mitä lopputulokseksi saadaan. Esimerkiksi päätettäessä uuden koneen investoinnista voidaan käyttää useita kriteereitä, kuten konevaihtoehdot, tuotannon määrän kasvu, tuotannon kannattavuus lyhyellä tai pitkällä aikavälillä, ympäristövaikutukset jne. Myös vuorovaikutuksien arviointi, kuten linkittyminen muuhun

tuotantoon ja järjestelmiin, on huomioitava. Tyypillistä päätöksenteossa on se, että pitää pystyä huomioimaan useita asioita samanaikaisesti. Erilaisia menetelmiä helpottaa päätöksentekoa ovat mm. rationaalinen malli, Simonin normatiivinen malli, ryhmäpääntöksen mallit, analyttinen hierarkkinen prosessi (AHP), monen muuttujan päätöksenteko malli (MCDM), tapauspohjainen päättely (CBR) sekä bayes-verkot. Tässä artikkelissa paneudutaan sumeisiin kognitiivisiin karttoihin, jotka menetelmänä ovat suhteellisen uusia ja yksinkertaisia mutta sopivat hyvin päätöksenteon apuvälineeksi.

2. Sumea kognitiivinen kartta (FCM)

2.1 Sumea kognitiivinen kartta lyhyesti

Sumea kognitiivinen kartta (Fuzzy Cognitive Map, FCM) on menetelmä, jolla voidaan muodostaa graafinen kuvaus järjestelmästä niin, että järjestelmän tilamuuttujat yhdistetään toisiinsa syy-seurausta kuvaavasti (kuva 1). Sumeiden kognitiivisten karttojen vahvuutena on järjestelmän graafisen esityksen helppo ymmärtäminen sekä sen käytännöissäkin yksinkertainen muuntaminen tietokoneohjelmaan, minkä jälkeen niitä voidaan käyttää mm. simuloinnissa.



Kuva 1. Yksinkertaistettu sumea kognitiivinen kartta petojen ja saaliseläinten suhteesta.

2.2 Sumeiden kognitiivisen karttojen kehitys

Sumeat kognitiiviset kartat on kehitetty 1980-luvulla sumean logiikan ja neuroverkkojen tutkijan Bart Koskon toimesta [1, 2]. Pohjana tälle kehitykselle oli vuosikymmeniä jatkunut psykologian ja sosiologian alan tutkimus kognitiivisten karttojen alueella, kuten Axelrodin tutkimus poliittisesta eliitistä [3], johon teoriaan Kosko yhdisti sumean logiikan ideoita ja tietämystään neuroverkoista sekä myöhemmin differentiaalista Hebbian oppimista yrittäessään kehittää karttojen automaattista muodostamista [4]. Huolimatta nimityksestään sumeat kognitiiviset kartat ovat perusmuodossaan ihmisen opet-

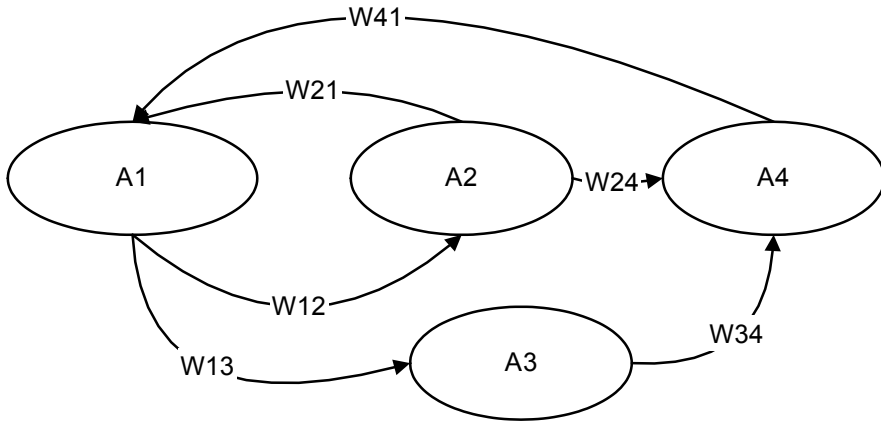
tamia neuroverkkoja (monikerroksinen perceptron), eivätkä ne siis ole sumeita perinteen määrittelyn mukaan.

Sumeita kognitiivisia karttoja on kehitetty ja sovellettu hyvin monenlaisten vuorovaikutusten, verkkojen ja monimutkaisten ilmiöitten hahmottamiseen, kuvaamiseen ja simulointiin. Tällaisia sovelluskohteita ovat hallintotieteet, peliteoriat, informaatioanalyysi, poliittisen suosion kehitys, sähköverkkojen analysointi, ihmisen ja koneen välinen vuorovaikutus, hajautetun ryhmässä tehtävän päätöksenteon tuki, logistiikka, säätöongelmat, tuotantojärjestelmien valvonta, suurten monimutkaisten järjestelmien hahmottaminen jne. [5, 6]. Koostettuna voidaan todeta, että sumeita kognitiivisia karttoja sovelletaan kahteen alueeseen, joista toinen on tietämyksen kartoitusjärjestelmät ja toinen on päätöksenteon tukijärjestelmät.

Päätöksenteon alalla sovelluskohteita on useita. Tietokoneeseen tunkeutumisen havaitsemisjärjestelmässä sumeaa kognitiivista karttaa käytetään hyökkäyksen vakavuuden määrittämiseen [7]. On kehitetty onnistunut sovellus erityisen kielellisen puutteellisuuden määrittämiseen tapauksissa, joissa kielellinen häiriö on hankala erottaa muista häiriöistä [8]. Päätöksentekoa tukevana sumeita kognitiivisia karttoja on käytetty mm. prosessissa, jossa analysoitiin esteettisesti kaupunkialueita [9], moniulotteisen tiedon esittämisen strategian muodostusprosessissa [10], paikkatiedon päättämisen tukijärjestelmässä mobiiliverkoissa [11], hajautettujen verkottuneiden järjestelmien vikojen hallinnassa [12], systeemin mallintamisessa sekä vikojen ja vaikutusten mallintamisessa [13].

2.3 Sumean kognitiivisen kartan määrittely ja laskenta

Sumeat kognitiiviset kartat koostuvat käsitteistä ja erilaisista kausaalisista eli syy-yhteysuhteista konseptien välillä. Käsitteitä edustavat solmut A ja kausaalista suhdetta suunnatut nuolet W kuvan 2 mukaisesti. Kun tiettyyn solmuun vaikutetaan, tämä vaikutus leviää koko verkkoon. Karttaan on myös mahdollista muodostaa takaisinkytkentöjä. Sumea graafinen rakenne mahdollistaa systemaattisen kausaalisen kehityksen ja tiedon laajentamisen yhdistämällä useita karttoja toisiinsa.



Kuva 2. Yksinkertaistettu sumea kognitiivinen kartta.

Matemaattisesti ajatellen jokainen solmu edustaa tiettyä avaintekijää, jota voidaan kuvata numerolla A_i , joka edustaa solmun aktivaatiotasoa, joka voidaan laskea kaavan 1 avulla. Kartta kuvataan tilavektorilla $A(1 \times n)$ ja matriisilla $E(n \times n)$.

$$A_i = f\left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n W_{ji} A_j\right) \quad (1)$$

W_{ji} voi olla välillä -1 ja 1 riippuen kausaalisuudesta. Mikäli etumerkki on positiivinen, käsitteiden välillä on kasvattava syy-seuraussuhde. Nollaa pienempi W_{ji} -arvo kertoo vuorostaan negatiivisesta vuorovaikutuksesta. Arvon suuruus kertoo, kuinka voimakkaasti käsite vaikuttaa toiseen käsitteeseen.

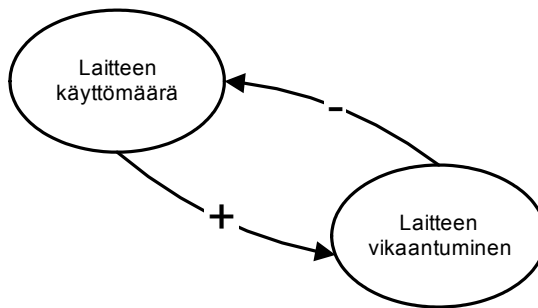
Jos sumea kognitiivinen kartta on muodostettu usean asiantuntijan tietojen perusteella, kukin asiantuntija laatii oman karttansa kokemuksensa mukaan kuvaamaan järjestelmää, määrittämällä käsitteet ja käsitteiden vaikutukset toisiin sumeaa määrittelyä käyttäen. Kun kukin asiantuntija on laatinut oman karttansa, ne voidaan yhdistää laajennetulla matriisilla E :

$$E = \sum_1^N b_i E_i \quad (2)$$

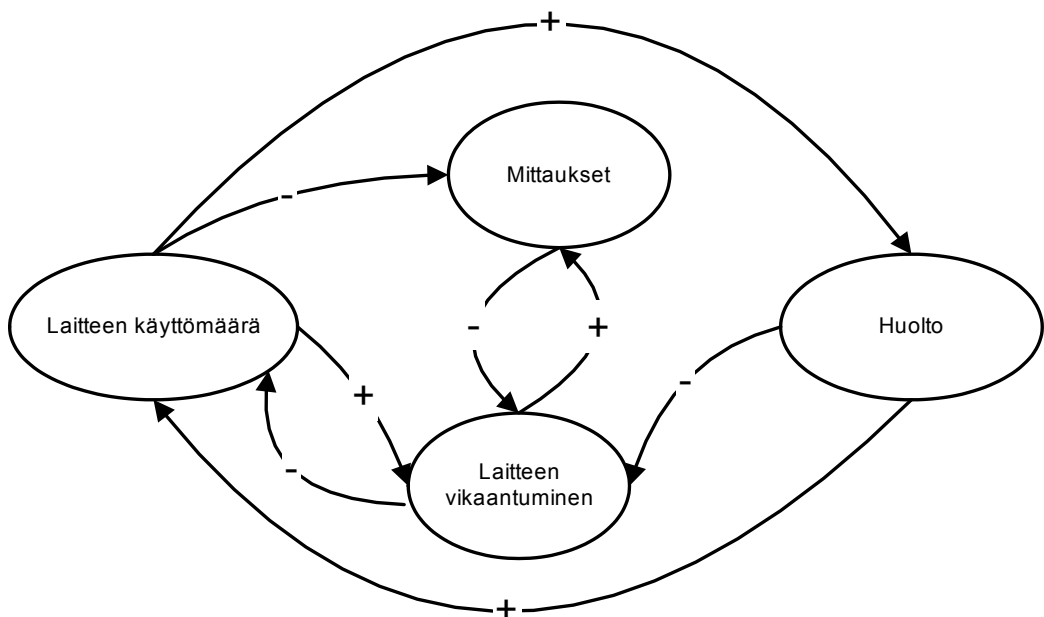
Matriisissa E edustaa koko karttaa, b on kunkin asiantuntijan painotus, E_i on asiantuntijan laatima kartta ja N edustaa asiantuntijoiden määrää. Myös dataa voidaan käyttää edustamaan asiantuntijoita. Kun kartta on muodostettu, voidaan ajaa yksi tai useampia simulaatiokierroksia, jolloin saadaan syvällisempi kuva muodostetun kartan rakenteesta. Lopullinen iteratiivinen laskenta matriisimuodossa jätetään tässä yhteydessä esittämättä.

3. Sumeat kognitiiviset kartat ja päätöksenteko

Edellä mainitun mukaisesti sumeita kognitiivisia karttoja on mahdollista käyttää päätöksenteon apuvälineenä. Prognos-projektin kannalta sumeita kognitiivisia karttoja voidaan hyödyntää useissa kohteissa päätöksenteon tukena tietojen hahmottamisessa ja tietojen yhdistämisessä. Erityisesti sellaiset kohteet, joissa ei ole jatkuvia mittaustietoja saatavilla, ovat potentiaalisia sovelluskohteita. Tarkastelukohteena voi olla jonkin laitteen vikaantuminen. Aluksi voidaan ajatella, että vikaantuminen riippuu laitteen käyttömäärästä, jolloin voidaan muodostaa riippuvuus käyttömäärästä vikaantumiseen. Toisaalta vikaantuminen vähentää käyttömäärää, jolloin voidaan havaita myös vastakkainen riippuvuus, kuten kuvassa 3 esitetään.

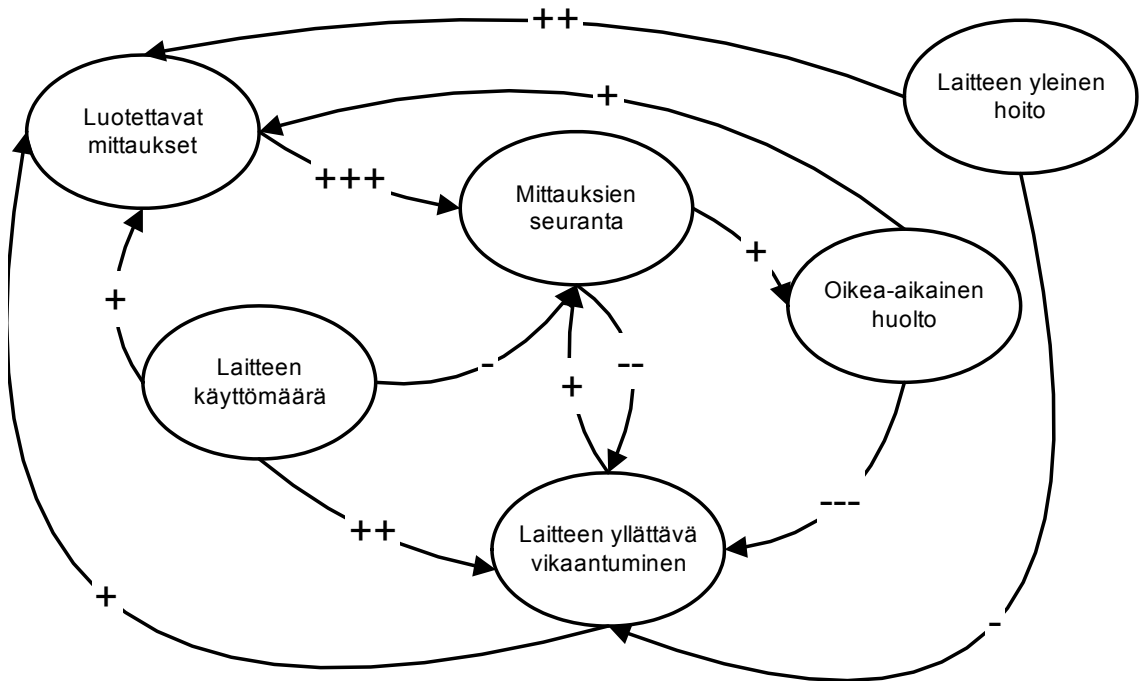


Kuva 3. Yksinkertaistettu sumea kognitiivinen kartta laitteen käyttömäärän ja vikaantumisen suhteesta.



Kuva 4. Yksinkertaistettu sumea kognitiivinen kartta laitteen käyttömäärän, mittauksien, huollon ja vikaantumisen suhteista.

Kuvan 3 esitys on hyvin suppea, ja todellisuutta voidaan kuvata paremmin, kun lisätään karttaan esimerkiksi mittaukset ja huolto kuvan 4 mukaisesti. Tällöin tulee jo ajankohitaiseksi miettiä, vaikuttavatko mittaukset esimerkiksi vikaantumiseen ja onko huollolla merkitystä laitteen käyttömäärään tai vikaantumiseen. Toisaalta kuvan 4 esitystä voidaan täydentää määrittämällä käsitteitä tarkemmin ja lisäämällä muita laitteen vikaantumiseen vaikuttavia tekijöitä, jolloin voidaan saada kuvan 5 mukainen esitys. Plus- ja miinusmerkkien määrä voidaan sopia etukäteen kuvaamaan vaikutuksen voimakkuutta, tai vaihtoehtoisesti on mahdollista käyttää liukuvaa numerointia.



Kuva 5. Yksinkertaistettu sumea kognitiivinen kartta laitteen yllättävään vikaantumiseen vaikuttavista seikoista.

Päätöksenteon tueksi kehitettävän kartan muodostamisen periaatteena on, että se luodaan loppukäyttäjälle. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kartan täytyy olla rakenteeltaan riittävän valmis ja sen täytyy pystyä muodostamaan vastauksia juuri niihin seikkoihin, joita halutaan tarkastella ja joihin haetaan vastauksia.

Tällaisessa käytössä voidaan havaita useita ongelmia. Ensimmäinen ongelma on datan kvantitatiivisuus syötteessä. Ongelma täytyy ratkaista joko skaalaamalla tai muuttamalla data kvalitatiiviseen muotoon. Molemmat vaihtoehdot vaativat useimmiten manuaalista käsittelyä. Toinen ongelma on vastedatan skaalaus, joka on käänteisesti sama kuin ensimmäinen ongelma mutta voidaan ratkaista myös automaattisella skaalauksella tai neuroverkoilla, mikäli hyvää opetusdataa on saatavilla. Kolmas ongelma on kausaalisten yhteyksien painotus, jonka ratkaisuksi on ehdotettu mm. differentiaalista Hebbian oppimista [4], tasapainotettua differentiaalista oppimista [14], defuzzifikaatiota tai jotain

muuta, esimerkiksi laskennallista menetelmää syy-seurauksien määrittämiseen. Viimeisenä ongelmana voidaan pitää sitä, että tällä hetkellä ei ole johdonmukaista mahdollisuutta ottaa karttaan mukaan aikaa, eli käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kartta muodostaa kuvauksen tietystä tasapainotilanteesta. Ongelmaa on pyritty ratkaisemaan, mutta tällä hetkellä ei ole käytössä sellaista yksinkertaista menetelmää, joka tähän soveltuisi.

Vaikka kartan käytössä on ongelmia, on myös havaittavissa tiettyjä etuisuuksia, kuten se, että sumea kognitiivinen kartta on helppo muodostaa piirtämällä. Toisena etuisuutena on menetelmän suhteellisen selkeä matemaattinen rakenne, joka tekee laskennan helposti hahmotettavaksi. Lisäksi kartta on helposti laajennettava, ja kaikki asian tiimoilla toimivat asiantuntijat voivat laatia oman karttansa, jotka voidaan yhdistää. Lisäksi menetelmälle on tyypillistä se, että se ei ainoastaan yhdistä syötettä ja vastetta vaan sen avulla voidaan yhdistää koko järjestelmästä saatavilla oleva tietous, koska karttoja voidaan käyttää yhdessä esimerkiksi tapauskohtaisen päättelyn ja neuroverkkojen kanssa.

4. Yhteenveto

Älykkäiden menetelmien, tietotekniikan ja kognitiotieteiden kehitys on ollut sumeiden kognitiivisten karttojen pohjana. Nimityksestään huolimatta ne ovat lähempänä neuroverkkoja kuin sumeaa logiikkaa, ja niiden soveltamisessa onkin hyödynnetty neuroverkkojen tietämystä ja kehitystä. Sumeat kognitiiviset kartat ovat helppoja muodostaa, ja ne tarjoavat yksinkertaisen, helposti hahmotettavan ja käytännöllisen graafisen esityksen. Matemaattisesti yksinkertaisena sumeita kognitiivisia karttoja on yritetty soveltaa hyvin monenlaisiin ongelmiin, mutta tietämyksen lisääntyessä on todettu, että parhaimmillaan ne ovat lähinnä tietämyksen kartoitusjärjestelmissä ja päätöksenteon tukijärjestelmissä. Päätöksenteon alalla sovelluskohteita on useita, mutta karttojen hyödyntäminen käytännössä törmää skaalaukseen ja ajan huomiointiin liittyviin ongelmiin. Näihin ongelmiin on tarjolla erilaisia tiettyihin tapauksiin sopivia ratkaisuja, mutta yksiselitteistä ja universaalia sovellusta ei kuitenkaan ole vielä saatu kehitettyä.

Lähteet

- [1] Kosko, B. Fuzzy Cognitive Maps. *Int. Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 24, 1986, s. 65–75.
- [2] Kosko, B. *Neural Networks and Fuzzy systems. A dynamic system approach to machine intelligence*, Prentice Hall, New Jersey, 1992.
- [3] Axelrod, R. *Structure of Decision, The Cognitive Maps of Political Elites*. Princeton, New Jersey, Princeton University Press, 1976.

- [4] Kosko, B. Fuzzy Engineering, Prentice-Hall, New Jersey, 1997.
- [5] Aguilar, J. A Survey about Fuzzy Cognitive Maps Papers. International Journal Of Computational Cognition, Vol. 3, No. 2, June 2005, s.27–33.
- [6] Keski-Säntti, J., Lampela, K., Leiviskä, K. A study on intelligent methods in optimization of a pulp bleach plant. Proc. TOOLMET'97 – Tool Environments and Development Methods for Intelligent systems, Oulu, Finland, 1997, s. 99–108.
- [7] Siraj, A., Bridges, S., Vaughn, R. Fuzzy Cognitive Maps for Decision Support in an Intelligent Intrusion Detection System. Technical Report, Department of Computer Science, Mississippi State University. MS 39762.
<http://www.cse.msstate.edu/~bridges/papers/nafips2001.pdf>.
- [8] Georgopoulos, V.C., Malandraki, G.A., Stylos, C.D. A fuzzy cognitive map approach to differential diagnosis of specific language impairment. Artificial Intelligence in Medicine 29, 2003, s. 261–278.
- [9] Xirogiannis, G.J., Stefanou, M., Glykas, M. A Fuzzy Cognitive map approach to support urban design. Expert Systems with Applications, 26, 2004, s. 257–268.
- [10] Carlsson, C., Fuller, R. Adaptive Fuzzy Cognitive Maps for Hyperknowledge Representation in Strategy Formation Process. Proceedings of International Panel Conference on Soft and Intelligent Computing, Technical University of Budapest, 1996, s. 43–50.
- [11] Satish Jamadagni, N.S. Dealing with location uncertainty in mobile networks using contextual Fuzzy Cognitive Maps as spatial decision support system. VTC, IEEE, 2000, s. 1489–1492.
- [12] Ndousse, T., Okuda, T. Computational Intelligence for Distributed Fault Management in Networks Using Fuzzy Cognitive Maps. IEEE 1996, s. 1558–1562.
- [13] Pelaez, C., Bowles, J. Using fuzzy cognitive maps as a system model for failure models and effects analysis. Information Sciences, Vol. 88, 1996, s. 177–199.
- [14] Vázquez, A. A Balanced Differential Learning algorithm in Fuzzy Cognitive Maps. Technical Report, Departament de Llenguatges i Sistemes Informatics, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), CnJordi Girona 1–3, E0834, Barcelona, Espanya 2002.

Vaativien säätösovellusten käyttövarmuus automaation elinkaarimallin näkökulmasta

Merja Mäkelä
Kymenlaakson ammattikorkeakoulu
Kotka

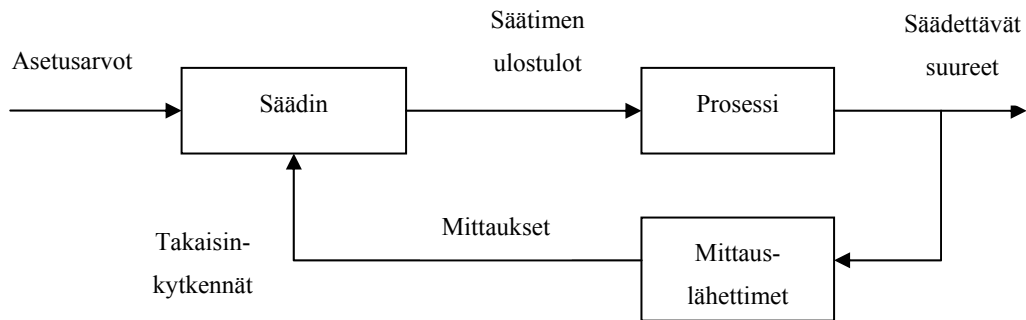
Tiivistelmä

Vaativia säätösovelluksia käytetään entistä enemmän prosessiteollisuudessa tuotannon tehostamiseksi. Nämä sovellukset sisältävät kerrostettuja säätörakenteita, monimuuttuja-algoritmeja ja optimointilaskentaa, jotka on muokattu kaupallisiksi paketeiksi. Suunnitteluvaiheessa säätömoduulit räätälöidään yksilöllisesti sovelluskohteisiin sopiviksi. Lyhyellä aikavälillä ohjattavan prosessin tasapainotila, raaka-aineiden laatu tai ulkoiset olosuhteet voivat muuttua merkittävästi, ja tällöin säätösovelluksilta edellytetään tavanomaisen säätökyvyn lisäksi jonkinlaista adaptiivisuutta. Säätösovellusten 5–10 vuoden elinkaaren aikana prosessi- ja automaatiolaitteistoissa voidaan tehdä uusintoja, jolloin säätösovellusten rakennetta pitää muuttaa tai optimoida sovelluksen parametreja uudelleen.

Perinteisesti vaativien säätösovellusten suunnittelusta vastaavat järjestelmätoimittajat, joilla on paras asiantuntemus tuotteistaan. Elinkaaren aikainen säätösovellusten optimointi saattaa jäädä vähäiseksi, jos laitoksen tai tehtaan omien tuotanto-, suunnittelu- ja kunnossapito-organisaatioiden hyvää prosessituntemusta ja pitkäaikaista kokemusta ei hyödynnetä. Tässä esityksessä tarkastellaan vaativien säätösovellusten käyttövarmuutta ja suorituskykyä automaation elinkaaren määrittely-, suunnittelu-, toteutus-, asennus-, testaus-, kelpoistus- ja tuotantovaiheissa. Esimerkkeinä vaativista säätösovelluksista käytetään paperikoneiden laatusäätöjä.

1. Säätösovelluksen vaativuus

Teollisuudessa on tavoitteena rakentaa taloudellisesti kannattavia tuotantolinjoja, jotka toimivat automaattisesti, häiriöttä ja vähällä käyttöhenkilökunnalla. Prosessitekniisten puutteiden ja prosessin ajoa häiritsevien tekijöiden kompensointiin sekä ihmisten käsiohjaustoimintojen korvaamiseen tarvitaan automaatiota. Prosessiteollisuudessa käytetään tällöin usein automaattista, takaisinkytkettyä säätöä. Suljetussa monimuuttujasäätöpiirissä takaisinkytkentänä ovat säädettävän suureen mittaukset, joiden perusteella tehdään jatkuvasti korjaavaa ohjaustoimintaa säätimen ulostuloihin (kuva 1). Asetusarvojen ja mittausten erotuksia kutsutaan säätövirheiksi tai säätöpoikkeamiksi.



Kuva 1. Takaisinkytketyssä monimuuttujasäätöpiirissä prosessista saatavat säädettävien suureiden mittaukset ovat takaisinkytkentöinä. Säädin vertaa jatkuvasti saatuja mittauksia asetusrvoihin ja laskee ulostuloja, joilla ohjataan prosessin toimilaitteita.

Prosessiteollisuuden säätimien yleisin laskenta-algoritmi on ollut vuosikymmenien ajan hyväksi havaittu erosuuretta vahvistava, integroiva ja derivoiva PID, josta on käytössä monia, hiukan toisistaan poikkeavia, kaupallisia versioita. On kuitenkin tilanteita, joissa PID-algoritmin käyttö ei tuota toivottua tulosta. Pitkät kulkuaikaviiveet ohjauskorjauksen näkymisestä säädettävissä suureissa tai yksittäisten säätöpiirien keskinäinen vahva riippuvuus toisistaan voivat olla haasteina. Näitä tilanteita varten on kehitetty muita algoritmeja, joiden toivotaan johtavan parempaan säätötulokseen. Usein PID-säädöistä poikkeavia säätöalgoritmeja nimitetään kehittyneiksi (engl. advanced). Tässä artikkelissa käytetään käsitettä **vaativa säätösovellus**, kun tarkasteltavalla säätösovelluksella on mm. seuraavia ominaisuuksia:

Monikerroksisuus

Säätösovelluksen rakenne on kerrostettu. Säätö voi olla esimerkiksi kaskadisäätö, jossa pääsäätöpiiri laskee asetusrvon aläsäätöpiirille. Usein aläsäätöpiiri on PID-pohjainen.

Monimuuttujaisuus

Säädettävänä on samanaikaisesti monta suuretta, jotka ovat toisistaan riippuvia. Säädös voi olla eri määrä ohjattavia ja säädettäviä suureita.

Laskenta-algoritmien monimutkaisuus

Säätölaskennassa voidaan käyttää hyväksi prosessimalleja esimerkiksi ennustukseen. Säätö saattaa perustua optimointilaskentaan, vaikkapa säätövirheen ja toimilaittepoikkeaman minimointiin, kuten malliprediktiivinen säätö (MPC). Säädön virityksessä on suuri määrä parametreja.

Läpinäkymättömyys

Säätöalgoritmin rakenne ja toimintaperiaate sekä parametrien vaikutukset eivät näy tuotesuojaussyistä suoraan käyttäjille, mikä voi vaikeuttaa ylläpitoa ja kehittämistä. – Vaativa osuus on sovelluksen sisällä, eikä käyttäjien edes tarvitse huolehtia kaikesta ytimessä olevasta, mikä taas osaltaan helpottaa käyttöä. Säätösovelluksen toiminnan parantaminen vaatii runsasta paneutumista. [1]

2. Säätösovelluksen käyttövarmuus

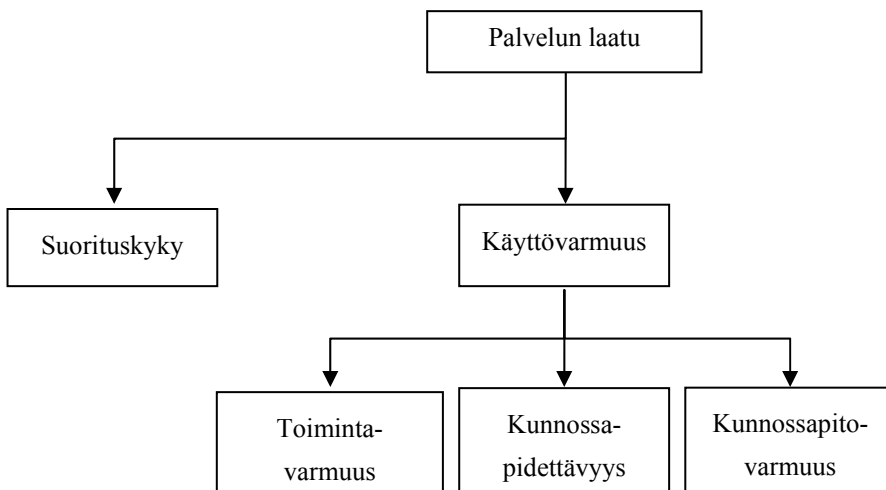
Standardien mukaisesti kohteen käyttövarmuudella tarkoitetaan kohteen kykyä olla tilassa, jossa se kykenee suorittamaan vaaditut toiminnot. Käyttövarmuus (dependability) kuvaa käytettävyyttä (availability), ja se määritellään koostuvaksi kolmesta osatekijästä (kuva 2):

Toimintavarmuus (reliability performance) on kohteen kyky suorittaa vaadittu toiminto määrättyissä olosuhteissa.

Kunnossapidettävyyys (maintainability) on kohteen kyky olla pidettävissä sellaisessa tilassa tai palautettavissa sellaiseen tilaan, jossa se pystyy suorittamaan vaaditut toiminnot.

Kunnossapitovarmuus (maintenance supportability) kuvaa kunnossapito-organisaation kykyä suorittaa vaadittu tehtävä.

Suorituskyvyllä (capability) tarkoitetaan kohteen kykyä kohdata palvelun laatu ja varmuus kuvattuna joillakin mitattavissa olevilla suureilla. [2], [3]



Kuva 2. Käyttövarmuus riippuu toimintavarmuudesta, kunnossapidettävyydestä ja kunnossapitovarmuudesta.

Säätösovelluksen toimintavarmuutta on se, että sovellus kykenee suorittamaan vaaditut säätö- ja ohjaustoiminnot annetuissa rajoissa ja määrättyissä olosuhteissa. Säätösovelluksen kunnossapidettävyys on sitä, että sovelluksella on kyky pysyä säätökykyisenä tai palautua säätökykyiseksi. Säätösovelluksen kunnossapitovarmuus riippuu mm. automaatiokunnossapito-organisaation ylläpito- ja kehittämiskyvystä.

Säätösovelluksen käyttövarmuuden toteutumista voidaan seurata säätöjen suorituskykyyn liittyvillä mittareilla. Säätösovellusten suorituskykyä kuvaavia mittareita sanotaan suorituskykyindekseiksi. Suorituskykyindeksit ovat laskettavia suureita, ja ne kuvaavat säädön hyvyyttä jollakin määrättyllä kriteerillä. [4]

3. Säätösovelluksen käyttövarmuus elinkaaren eri vaiheissa

Hajautettujen digitaalisten automaatiojärjestelmien (DCS) ja ohjelmoitavien logiikkajärjestelmien (PLC) sekä niiden sovellusten elinkaarta voidaan tarkastella seuraavien seitsemän vaiheen mukaisesti:

1. määrittely
2. suunnittelu
3. toteutus
4. asennus
5. toiminnallinen testaus
6. kelpoistus
7. tuotanto [5].

Vaativien säätösovellusten käyttövarmuuteen liittyviä tekijöitä tarkastellaan tässä esityksessä prosessinohjauksen, laadunhallinnan, kunnossapidon sekä prosessikehityksen näkökulmista automaation elinkaaren eri vaiheissa. Säätösovellusten suorituskykyä voidaan yleisesti tarkastella monien eri suorituskykyindeksien valossa [6], [7], [8].

3.1 Perusta määrittelyvaiheesta

Määrittelyvaihe voidaan jakaa suurissa hankkeissa kahteen osaan: esisuunnitteluun ja perussuunnitteluun. Määrittelyvaiheen tarkoituksena on kuvata automaatiokohde niin tarkasti, että suunnittelu voi alkaa. Esisuunnittelussa määritetään käyttäjävaatimukset ja vastuu on automaation tilaajalla. Tilaaja laatii lisäksi laatuja järjestelmänsä mukaisesti alustavan kelpoistussuunnitelman. [5]

Määrittelyvaiheen esisuunnittelussa luodaan perusta tilattavalle automaatiojärjestelmälle. Vaativien kohteiden automaatiiossa voidaan suositella esitutkimuksen (feasibility study) tekemistä, jotta tilaajan edustajalla on riittävästi tietoa käytettävissä, kun käyttäjävaatimuksia määritetään. Käyttäjävaatimukset on dokumentti, jossa kuvataan selkeästi, mitä automaatiojärjestelmän halutaan tekevän toimintaympäristössään. Erityistä huomiota tulee kiinnittää järjestelmän koko elinkaaren aikaisiin kehittämismahdollisuuksiin. Se, mitä edellytetään käyttäjävaatimuksissa mm. suunnittelu-, ohjelmointi- ja testaustavoilta, vaikuttaa koko automaatiojärjestelmän toimintavarmuuteen ja kunnossapidettävyyteen.

Perussuunnittelussa selvitetään prosessin ajotavat sekä määritetään automaation toiminta ja toteutusperiaatteet, jolloin voidaan esittää automaatiotoimittajalle tarjouspyyntö. Toimittajan tekemään tarjoukseen sisältyy automaatiojärjestelmän toiminnallinen kuvaus sekä projekti- ja laatusuunnitelma. Perussuunnittelu on tilaajan ja toimittajan yhteistyötä. Perussuunnittelussa on syytä varata riittävästi aikaa ja asiantuntevia voimia ajotapojen sekä vaativien säätö- ja ohjausperiaatteiden käsittelyyn. Automaation toiminnallisen kuvauksen tulee sisältää kuvaukset järjestelmästä käyttö- ja laiteliittymiseen sekä järjestelmän toiminnoista. Lopullisena määrittelyvaiheen asiakirjana on toimitussopimus liitteineen. Sopimuksen allekirjoittavat tilaaja ja valittu automaatiotoimittaja.

3.2 Kunnossapidettävyyttä suunnitteluvaiheesta

Suunnitteluvaiheessa tarkennetaan määrittelyvaiheen tuloksia siten, että automaatiojärjestelmän toteutus voidaan aloittaa. Järjestelmäsuunnittelussa laaditaan automaatiojärjestelmän laitteistokuvaus ja ohjelmistokuvaus. Kenttäsuunnittelussa sen sijaan keskitytään kenttäinstrumentoinnin laiteratkaisuihin. Suunnitteluvaiheen aikana tehdään piirikohtaiset toimintakuvaukset ja ohjelmiston moduulikuvaukset. Suunnitteluvaiheesta vastaa automaation toimittaja tai sen valtuuttama suunnittelutoimisto. [5]

Perusinstrumentoinnin osalta piirikohtaiset toimintakuvaukset ja positiotunnuskäytännöt ovat vakiinnuttaneet asemansa dokumentoinnissa ja automaation kunnossapidon välineinä 90-luvun jälkipuoliskolta lähtien. Piirien toimintakuvaukset syntyvät suunnitteluvaiheessa vähitellen ja tarkentuvat ajotapapalavereista lähtien käyttöönottoon asti, ja niitä hyödynnetään myöhemmin tuotantovaiheessa. Piirien toimintakuvaukset noudattavat tehtaan, suunnittelutoimiston tai järjestelmätoimittajan käytäntöä ja sisältävät esimerkiksi seuraavat asiat: piirin positiotunnus, piirin toiminta, piiriin vaikuttavat lukitukset ja ohjaukset, piirin lähtevät tiedot muihin piireihin, piirin hälytykset ja varoitukset, muutokset. Insinööritoimistot ovat merkittävästi edistäneet toimintakuvausten käyttöä elinkaari pohjaisten suunnittelukäytäntöjen standardoinnin osana.

Vaativien säätösovellusten osalta toimintakuvausten laatiminen on vaihtelevaa; käytäntö ei ole vielä vakiintunut. Useimmiten vaativien säätösovellusten toimituksissa tyydytään käsikirjojen periaatteellisiin algoritmien toimintakuvauksiin ja parametrien selityslistoihin, jos määrittelyvaiheessa ei muisteta erikseen keskustella toimintakuvausten tarpeesta. Kaikki vaativat säätösovellukset ovat aina jollakin tavoin yksilöllisiä ja räätälöityjä. Vaativien säätösovellusten ohjelmamoduuleilla on käytännössä tunnukset, jotka ovat rinnastettavissa perusinstrumentoinnin positiokäytäntöön. Usein ohjelmamoduulit tuloi-neen, lähtöineen ja parametreineen ovat piireihin verrattavia kokonaisuuksia, joten vaa-tivien säätösovellusten moduuleille voidaan suositella toimintakuvausten laadintaa pe-rusinstrumentoinnin piirikohtaisten toimintakuvausten tapaan. Kuvaukset ovat tällöin saatavissa joustavasti käyttöliittymiin prosessinohjauksen ja automaatiokunnossapidon tueksi. Toimintaselostuksissa voi olla kuvaa, tekstiä, dynaamisia linkkejä ja animaatiota tarpeen mukaan. Vaativan säätösovelluksen dokumentoinnissa on hahmottamisen kan-nalta hyvä tarkastella sovellusta ylhäältä alaspäin: ensin esitetään karkea sovelluksen rakenne ja sitten katsotaan moduulien sisään.

3.3 Tarkennuksia toteutusvaiheessa

Toteutusvaihe koostuu automaatiotoimittajan tekemästä, suunnitelmien mukaisesta laitteiden ja ohjelmistojen valmistuksesta, hankinnasta ja kokoonpanosta. Toimittajan tiloissa, yleensä tilaajan edustajan läsnä ollessa, tehdään tehdastestejä (Factory Acceptance Test, FAT). Automaation toimittaja vastaa toteutusvaiheesta. Suunnitteluvaiheessa laadittuja säätösovellusten toimintakuvauksia tarkennetaan ja täydennetään tarpeen mukaan toteutusvaiheessa. [5]

3.4 Alustavaa testausta asennusvaiheessa

Asennusvaihe sisältää automaatiotoimitukseen kuuluvien laitteiden kuljetuksen, asen-nuksen ja laitteistotestauksen. Asennuksesta on vastuussa automaatiotoimittajan hank-kima asennusurakoitsija. Asennusvaiheessa tehdään alustavaa instrumenttilaitteiden ja ohjelmiston toimivuuden testausta. [5]

3.5 Toistuvuusmittauksia toiminnallisessa testauksessa

Toiminnallinen testaus varmistaa asennettujen järjestelmien, ohjelmistojen ja kenttäin-strumentointilaitteiden toimivuuden. Kylmätestaus, jossa saatetaan käyttää pelkästään vesiä, valmistaa osaprosessia tai laitosta ylösajoon. Yksittäisten piirien, sekvenssien ja kerrostetuissa rakenteissa ylätasoin ohjausten normaaliajoin toiminnat sekä hälytykset, lukitukset ja muut suojaukset tarkistetaan kokonaisuudessaan. Kuumetestauksessa osa-

prosessin tai laitoksen ajossa käytetään varsinaisia prosessiaineita. Hyväksymistestauksessa (System Acceptance Test, SAT) toimittaja osoittaa tilaajalle, että automaatio on toiminnallisen kuvauksen mukainen. [5]

Mittalaitteet, toimilaitteet ja säätöalgoritmit ovat osana säätöpiirejä, ja niiden suorituskykyä voidaan kuvata toistuvuuden avulla. **Toistuvuus** voidaan ilmaista **varianssin σ^2 , keskihajonnan σ ja keskiarvon avulla**. Vaativien mitta-antureiden, esimerkiksi paperiteollisuuden mittapalkkiantureiden, toistuvuus saattaa olla takuuarvona toimitussopimuksessa. Suorituskykysuureiden tulkinnassa on olennaista, että toistuvuuden tarkka todentamistapa on määritelty. Vaativien säätöalgoritmien toiminnallinen testaus on toistaiseksi vakiintumatonta.

3.6 Tuotteen laadun toteaminen kelpoistusvaiheessa

Kelpoistusvaihe koostuu automaation teknisestä loppukelpoistuksesta ja prosessikelpoistuksesta. Automaation teknisessä loppukelpoistuksessa tilaaja osoittaa projektissa kertyneen aineiston ja mahdollisten lisätestien avulla, että järjestelmä on vaatimusten mukainen. Suorituskykytestauksessa todetaan suorituskykyvaatimusten, esimerkiksi laitteiston kuormitettavuuden ja vasteaikojen, toteutuminen. Automaation loppukelpoistus kohdistuu siis tekniseen järjestelmään. [5]

Prosessikelpoistuksen tavoitteena on sen sijaan osoittaa, että koko osaprosessi tai laitos ja siinä valmistettavat tuotteet vastaavat asetettuja vaatimuksia. Prosessikelpoistuksen ja tuotantovaiheen laadunhallinnan kannalta säätösovellusten suorituskykymittareiksi soveltuvat tilastolliset suureet.

Säädön tavoitteena voi olla säädettävän, laatua kuvaavan suureen, esimerkiksi paperitehtaalla tuotteen neliömassan vaihtelun vakioiminen ja minimoiminen tai vaikkapa voimalaitoksella savukaasun happipitoisuuden minimoiminen. Tilastollista vaihtelua kuvaamaan soveltuvat säädettävän suureen ja erosuureen **varianssi σ^2 , keskihajonta σ ja keskiarvo**. Säädettävän suureen varianssi kuvaa tilastollista vaihtelua mitta-arvon suhteen, kun taas erosuureen varianssi ilmaisee sen tilastollisen vaihtelun, kuinka kaukana ollaan asetusarvosta. Laskennat voidaan ohjelmoida toimimaan jaksollisina tai liukuvasti.

Tilastollinen vaihtelu säädettävässä suureessa voidaan ilmaista **Harris-minimi-varienssi-indeksin** avulla kaavan 1 mukaan seuraavasti [9]:

$$I_H = \frac{S_{mv}^2}{S_y^2} \quad (1), \text{ jossa}$$

I_H	Harris-minimivarianssi-indeksi
s_{mv}^2	teoreettisesti saavutettavissa oleva minimivarianssi
s_y^2	todellinen mitattu säädettävän suureen varianssi.

Teoreettisesti saavutettavissa olevan minimivarianssin laskemiseen tarvitaan tieto kulkuakaviiveestä sekä estimaatti häiriösuureen varianssista. Harris-minimivarianssi-indeksi tarjoaa mielenkiintoisen vertailukohdan: teoreettisesti saavutettava minimivarianssi on se varianssi, joka saavutettaisiin, jos optimoivassa säädössä käytettäisiin minimivarianssisäädintä. Indeksillä lähestyy lukuarvoa 1, kun säädin hoitaa tehtävänsä parhaalla mahdollisella tavalla minimoiden säädettävän suureen vaihtelua. [10]

Paperi- ja kartonkiteollisuuden tuotteiden laatusuureita mitataan tuotannon aikana mittapalkeilla, joissa on radan poikki kulkevat mittakelkat antureineen. Näytteenotto on siten jaksollista ja harvaa. Koko radan leveydeltä mittaavia laitteita on kuitenkin kehitteillä. Tuotannon aikaisten mittausten vertailukohtana voidaan käyttää erillisessä tiheässä raina-analysoinnissa saatua mittaustiedostoa. Tällöin päästään selville todellisista variansseista sekä signaalien esikäsittelyn ja keskiarvolaskennan vaikutuksesta laatusäätöjärjestelmissä. Tutkimuslaitoksilla on käytössään raina-analysaattoreita.

3.7 Suorituskyvyn toteaminen tuotantovaiheessa

Tuotantovaihe alkaa, kun prosessikelpoistus on tehty hyväksytysti. Automaatioon tulee ajoittain muutoksia, ja ne on tehtävä huolellisesti. Erityisesti ohjelmistoversioiden päivitykset ovat kriittisiä muutoksia. Automaation elinkaareen kuuluu lopulta myös järjestelmän poistaminen ottaen huomioon kierrätyksen ja ympäristönsuojelun näkökohdat. Tuotantovaiheen aikana ohjataan prosessia ja huolehditaan kunnossapidosta. [5]

Säätösovellusten käyttövarmuusmittareina tuotantovaiheessa voidaan käyttää kunnossapidosta tuttuja suureita:

Säätöpiirin **käyntiaika** on se aika, kun piiri on normaalissa ajotilassaan automaattimoodissa tai kerrostetuissa säädöissä kaskadimoodissa. Haluttaessa voidaan helposti ohjelmoida säätöpiirin käyntiaikalaskuri automaatiojärjestelmän toimilohko-ohjelmointiin ja esittää säätimen kulloinkin moodi visuaalisesti operaattorien käyttöliittymässä. Säätöpiirien toimintamooditiedot ovat selkeitä ja havainnollisia operaattoreille.

Säätöpiirin **häiriötoipumisaika** on se aika, joka tarvitaan muutos- tai häiriötilanteen jälkeen, kun säädettävä suure palautuu ennalta määritettyihin välisrajoihinsa. Säätötekniikassa tämä toipumisaika tunnetaan myös nimellä **asettumisaika**. Asetusarvomuutokset säätöpiireille, esimerkiksi muutokset operaattoreilta tai vaikkapa paperiteollisuuden

lajinvaihtotilanteissa, ovat ”häiriöitä” säätöpiirin toiminnalle. Yksinkertaisimmillaan asettumisaikoja voidaan seurata operaattorien käyttöliittymän suosituista trendikäyristä. Haluttaessa voidaan ohjelmoida myös laskureita mittaamaan asettumisaikojen pituuksia muutos- ja häiriötilanteissa.

Erosuureintegraali on pinta-ala, joka jää säädettävän suureen ja asetusarvon trendikäyrien väliin. Erosuureintegraali kuvaa siten säädettävän suureen poikkeamaa asetusarvosta. Erosuureintegraaleja ovat mm. neliöllisen virheen integraali (ISE), virheen itseisarvon integraali (IAE) sekä ajalla painotetut virheen itseisarvon (ITAE) ja virheen neliön (ITSE) integraalit [8]. Erosuureintegraalilaskentaa voidaan tehdä jaksottaisesti tai liukuvasti ja laskenta voidaan ohjelmoida helposti automaatiojärjestelmään. Erosuureintegraalin esittäminen visuaalisesti pinta-alana antaa havainnollisen käsityksen säätöpoikkeamasta. Esitystapa on ollut yleisessä käytössä paperiradan laatusuureiden poikki-profiilikuvaajissa, joissa esitetään tavoiteprofiili (asetusarvo) ja poikkeamat positiiviseen ja negatiiviseen suuntaan pylvinä mittaustarkkuuden antamissa puitteissa.

Tehospektrit kuvaavat signaalien tehon jakautumista eri taajuusalueille ja antavat tietoa signaalien jaksottaisista ominaisuuksista ja värähtelystä. Jaksolliset ilmiöt näkyvät terävinä, korkeina piikkeinä tehospektrikuvaajissa. Tehospektrilaskennalla voidaan paljastaa prosessilaitteistoon tai automaatioon liittyviä puutteita tai häiriöitä. Tehospektrien määrittäminen voi paljastaa vain sellaiset taajuudet, jotka ovat selvästi käytetyn näytteenotto-taajuuden alapuolella. Tehospektrianalysointi soveltuu prosessien ja automaation pitkäjänteiseen kehittämiseen. Se vaatii huolellista paneutumista: esimerkiksi signaalien las-kostumisilmiöt voivat tuottaa harhaanjohtavia tuloksia. Markkinoilla on runsaasti laitteistoja ja ohjelmistoja, joiden avulla voidaan kerätä tietoa ja tehdä tehospektrianalysointia. Tehospektrejä voidaan laskea usealla eri tavalla, mm. nopean Fourier-muunnoksen avulla (Matlab FFT). [11]

4. Yhteenveto

Vaativat säätösovellukset ovat rakenteeltaan monikerroksisia, ja ohjausalgoritmeissa käytetään prosessimalleja ja optimointilaskentaa. Vaativien sovellusten yksityiskohtainen toimintaperiaate ja parametrien vaikutukset eivät näy suoraan käyttäjille. Vaativien säätösovellusten käyttövarmuuden parantamista voidaan tarkastella toimintavarmuuden, kunnossapidettävyyden ja kunnossapitovarmuuden lähtökohdista automaation elinkaaren eri vaiheissa.

Vaativien säätösovellusten käyttövarmuuteen voidaan vaikuttaa elinkaaren aikana ja sovellusten suorituskykyä voidaan mitata erilaisilla suorituskykyindekseillä. Määrittelyvaiheessa luodaan säätösovellusten käyttövarmuuden perusta tilaajan käyttäjävaatimuk-

silla ja toimittajan tekemällä automaation toimintakuvauksella. Suunnitteluvaiheessa säätösovellusten kunnossapidettävyyteen voidaan vaikuttaa laatimalla perusinstrumentoinnin tapaan säätömoduulien toimintakuvaukset. Toiminnallisessa testausvaiheessa mittalaitteiden ja toimilaitteiden suorituskyvyn kuvaamiseen voidaan käyttää toistuvuutta, mutta vaativien säätöalgoritmien järjestelmällinen testaus on edelleen vakiintumatonta. Prosessikelpoistusvaiheessa tuotteiden laadun tilastolliset suureet, kuten varianssi ja keskihajonta, ovat kuvaavia ja teoreettista minimivarianssia voidaan käyttää vertailuun. Tuotantovaiheessa automaattilla olon aika, säädön asettumisaika ja erosuureintegraalit ovat hyvin soveltuvia operaattoreiden ja kunnossapitoihmisten käyttöön. Tehospektrilaskenta sen sijaan soveltuu pitkäjänteiseen prosessien ja automaation kehittämiseen.

Metsäteollisuuden vaativien säätösovellusten diagnostiikan tutkimusta rahoittavat Tekes, Suomen Akatemia ja suomalaiset metsäteollisuusyritykset.

Lähteet

- [1] Mäkelä, M. Vaativien säätösovellusten käyttövarmuuden parantaminen. Teoksessa: Automaatio 05, 6.–8.9.2005. Suomen Automaatioseura ry., Helsinki, 2005, s. 269–274. ISBN 952-5183-23-8.
- [2] Sähköteknillinen sanasto. Luotettavuus ja palvelun laatu. Suomen Standardoimisliitto, Helsinki, 1996. 143 s.
- [3] PSK 6201. Kunnossapito. Käsitteet ja määritelmät. PSK Standardointiyhdistys, Helsinki, 2003. 30 s.
- [4] SFS-IEC 600050-351. Sähköteknillinen sanasto. Automaattinen ohjaus ja säätö. Suomen Standardoimisliitto, Helsinki, 2000. 167 s.
- [5] Tommila, T. (toim.). Laatu automaatiossa. Parhaat käytännöt. Suomen Automaatioseura ry., Helsinki 2001, 245 s. ISBN 952-5183-12-2.
- [6] Ruel, M. Key performance index. In 90th Annual Meeting 27.–30.1.2004 Montreal, Book A. PAPTAC, Montreal, 2004, s. 141–145.
- [7] Dittmar, R., Bebar, M., Reinig, G. Control Loop Performance Monitoring. Motivation, Methoden, Anwenderwünsche. Automatisierungstechnische Praxis ATP, 45 (2003) Heft 4, 2003, s. 94–103.

- [8] Dorf, R.C., Bishop, R.H. Modern Control Systems. 9th edition, Prentice-Hall, USA, 2001. s. 248–249. ISBN 0-13-030660-6.
- [9] Harris, T.J. Assessment of control loop performance. Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 67, October 1989, s. 856–861.
- [10] Huang, B., Shah, S.L. Performance assessment of control loops. Springer-Verlag London, United Kingdom, 1999, s. 9–55. ISBN 1-85233-639-0.
- [11] Aumala, O., Ihalainen, H., Jokinen, H., Kortelainen, J. Mittaussignaalien käsittely. Pressus, Tampere, 1995, s. 87–200. ISBN 952-9835-16-7.

Piirreanalyysi koneen toimintatilan määrittämiseksi

Ville Järvinen, Juha Miettinen
Tampereen teknillinen yliopisto
Koneensuunnittelun laitos, Konedynamiikan laboratorio
Tampere

Tiivistelmä

Koneen toimintatilan määrittämisellä voidaan tavoitella koneen virheellisen toiminnan syyn selvittämistä, jolloin yleensä puhutaan vikadiagnostiikasta. Toisaalta toimintatilan määrittämisen tavoitteena voi olla koneen toiminnan ohjaaminen siten, että prosessi pysyy oikeassa ajoikkunassa. Tällöin kysymyksessä on koneen käynninseuranta. Toimintatilan hyvyyden kriteerinä kummassakin tapauksessa käytetään usein prosessin lopputuotteen hyvyyttä ja määrää, joka kuvaa tuottavuutta, ja koneen värähtelyn tasoa, joka korreloi koneen kestoiän kanssa.

Koneen toimintatila määritetään luokittelijan avulla. Luokittelijan suorittama määrittäminen perustuu koneen toimintaa kuvaaviin piirteisiin, jotka valitaan piirreanalyysin avulla. Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää piirreanalyysin käyttöä koneen tai prosessin toimintatilan määrittämisessä. Artikkelissa esitetään piirteiden irrotukseen kehitetty Matlab[®]-käyttöliittymä, selvitetään piirrematriisin tiivistämisen tarpeellisuutta sekä esitellään erilaisia piirteiden hakustrategioita. Lopussa on yhteenveto hyvälle luokittelijalle asetetuista vaatimuksista.

1. Piirreanalyysi

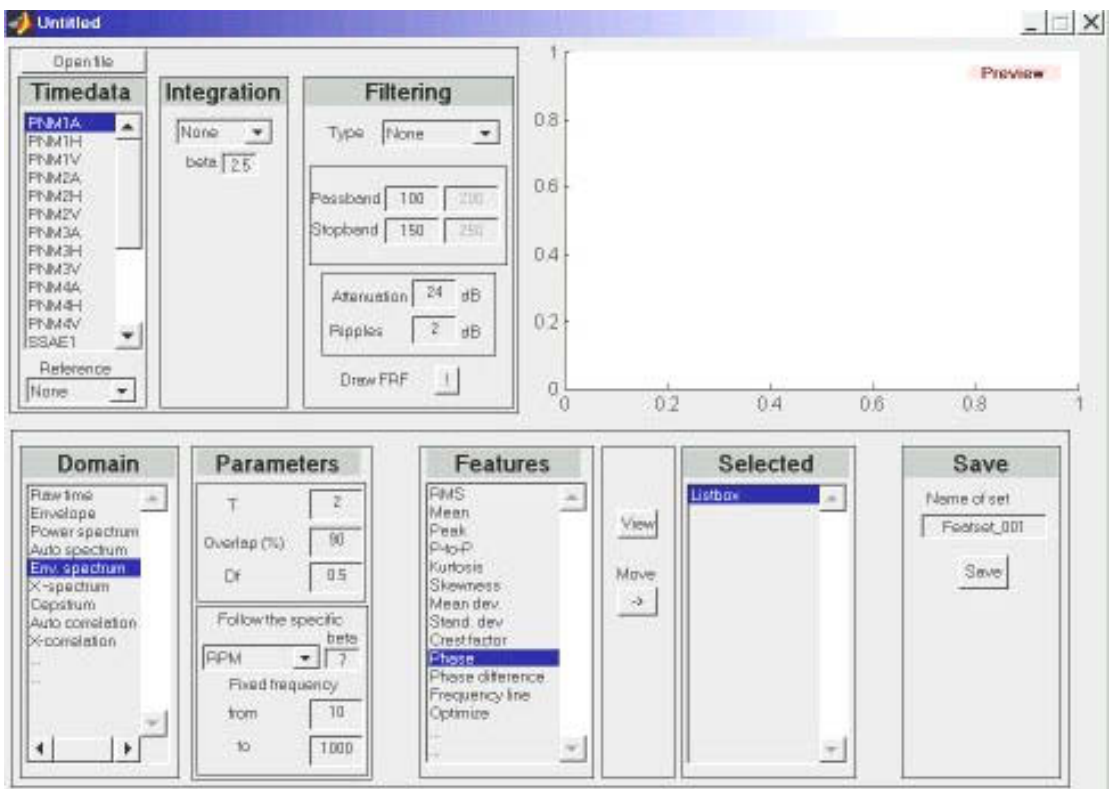
Datan louhinta (engl. data mining) ja hahmontunnistus (engl. pattern recognition) ovat pitkälle kehittyneitä tieteenaloja, joissa piirreanalyysistä on huomattavasti pitemmät perinteet kuin konediagnostiikan alueella. Kuitenkin päämäärät ovat kaikilla yhteiset, eli mittausavaruudesta siirrytään piirreavaruuteen, josta edelleen päätös- ja luokkavaruuteen. Piirreanalyysiä koskevat tieteelliset julkaisut ovat tällä hetkellä löydettävissä pääasiassa muualta kuin konediagnostiikan alueelta, mutta piirreanalyysin käytön lisääntyminen on selkeästi havaittavissa myös koneiden kunnan ja toimintatilan määrittämisessä ja siihen liittyvässä prognostisessa päätöksenteossa.

Piirreanalyysissä tehdään lähtökohtaisesti oletus, että koneen toimintatila on mittauksin todennettavissa, jolloin em. mittausavaruuden luominen mahdollistuu. Tavallisesti tämä pitää paikkansa, jos mittausmenetelmät ja -pisteet ovat perustellusti valittuja. Mittaussignaalin käsittely tästä eteenpäin luo pohjan sittemmin suoritettavalle luokitukselle, jonka avulla koneen toimintatila voidaan määrittää.

Piirreanalyysin keskeinen tavoite on määrittää sellainen piirrejoukko, jonka avulla luokittimen toiminta on optimaalinen. Piirreanalyysi on käsitteenä erittäin laaja, ja se sisältää suuren joukon eri työvaiheita. Näitä työvaiheita ovat mittausmenetelmien ja -pisteiden valinta, mittausinformaation keruu, piirteiden irrotus, piirrematriisin tiivistäminen sekä uudelleenryhmittely. Piirreanalyysin jälkeen varsinainen luokitin tekee määrittelyn toimintatilasta, käyttäen syöttöarvoina piirreanalyysin tuloksia. Luokittimen luotettava toiminta on oma problematiikkansa. Luokitin ei lähtökohtaisesti kuitenkaan voi toimia oikein, jos sen syöttöarvot eli piirteet eivät ole oikein määritettyjä.

1.1 Piirteiden irrotus

Piirteiden irrotusta varten on tässä tutkimuksessa tehty Matlab[®]-kielinen käyttöliittymä (kuva 1). Tarkoituksena on, että käyttöliittymän avulla raakasignaaleista on mikä tahansa piirre muodostettavissa.



Kuva 1. Piirteiden irrotusta varten toteutettu Matlab[®]-käyttöliittymä.

Käyttöliittymän ylempi puolisko sallii signaalin mielivaltaisen suodatuksen sekä integroinnin, jonka tulokset päivittyvät oikeassa reunassa sijaitsevassa preview-ikkunassa aina parametrien vaihtuessa. Esikatselu seuraa aina vasemmasta reunasta valittua mittausta tai, jos valittuja on useampia, näistä ensimmäistä. Kuten kuvastakin voi päätellä, raakasignaalista voidaan luoda lähes rajaton määrä erilaisia piirteitä, joista vain murto-osa tulee olemaan toimintatilaa todellisuudessa kuvaavia. Tämän vuoksi käyttöliittymä sellaisenaan onkin tarkoitettu kokeneen henkilön päämäärähakuiseen toimintaan ja kokeiluun.

Käyttäjää, myös kokenutta, varten on olemassa valmiita kuvauksia piirrematriisiksi, joka automaattisesti täytetään kyseisistä mittaustuloksista. Kokonaan uuden piirrematriisin luomiseksi on ohjelmassa optimointitoiminto, joka pyrkii löytämään hyvin toimintatilaa kuvaavan piirresetin jollakin menetelmällä. Nämä menetelmät ovat tutkimuksen kohteena ja esitellään myöhemmin.

1.1.1 Piirrematriisin luonti

Piirrematriisin kokoaminen on piirreanalyysin ensimmäinen vaihe. Tässä vaiheessa mittausvaruudesta siirrytään piirrevaruuteen. Piirrematriisi on tarkoitus tehdä ohjelmoidusti mittausdatasta. Koska koneet ovat yksilöitä eikä hälyttäviä tasoja useinkaan tiedetä, normalisoidaan piirrematriisi ensin. Tämä tarkoittaa laskettujen piirteiden vertailua edellisiin tuloksiin absoluuttisista tasoista välittämättä. Normalisointi muuttaa fysikaaliset suureet VdB:ksi, jolloin kulloisenkin amplitudin vertailu tapahtuu logaritmisellä asteikolla. Esimerkiksi +6 VdB tarkoittaa tällöin amplituditason kaksinkertaistumista referenssitason nähden, +20 VdB tason kymmenkertaistumista jne. Piirteiden referenssitasot on mielekästä asettaa koneen toimintatilan ollessa normaali. Edelleen harkittavaksi jää, kannattaako referenssitasoja määrittää kulloisellekin prosessitilalle vai otetaanko prosessitila huomioon erillisenä itsenäisen luokittimen välityksellä.

1.2 Piirrematriisin tiivistäminen

Alustava piirrematriisi tehdään käyttäjän asiantuntemukseen ja kokemukseen perustuen. Valinta pyritään tässä vaiheessa tekemään siten, että piirteet olisivat ilmiöitä hyvin kuvaavia. Asiantuntevasta valintatyöstä huolimatta tämä piirresetti on kuitenkin monelta osin puutteellinen, johtuen asiantuntijan puutteellisesta kyvystä hahmottaa piirteiden välisiä riippuvuussuhteita tms. luokittimen toimintaan sittemmin vaikuttavaa ominaisuutta.

Ensinnäkin matriisi on yleisesti tässä vaiheessa liian suuri syötettäväksi sellaisenaan luokittimen lähtötiedoiksi. Piirrematriisia tulee vähintäänkin tiivistää, jotta luokittimen opetukseen kuluva aika pysyy kohtuullisena. Toiseksi, vaikkakin piirteet olisivat ilmiöitä hyvin kuvaavia, luokittimen toimintaa ajatellen niillä täytyy olla myös erottelukykyä.

Rajatin mukaan [Rajat et al. 1996] voidaankin tehdä oletus, että luokittimen kyky selvästi erillisten luokkien muodostamiseen tarkoittaa sitä, että luokat edustavat erillisiä alueita jo piirreavaruudessa. Voidaan päätellä, että mitä enemmän luokat eroavat toisistaan, sitä luotettavampi on myös luokittimen toiminta. Eräänä piirteiden valinnan lähtökohtana voitaisiinkin pitää niiden kykyä muodostaa mahdollisimman erillisiä luokkia.

Sun et al. [Sun et al. 2004] tiivistävät ongelman näin: aluksi on joukko valittuja piirteitä, joista tulee valittavaksi osajoukko siten, että luokittimen virhe minimoituu. Tämä on ensisijaisesti optimointiongelma. Samoin Sun et al. ovat koonneet joukon referenssejä, joissa on käytetty erilaisia menetelmiä piirteiden valinnassa ja piirrematriisin tiivistyksessä [Dash 1997, Blum 1997, Jain 2000, Siedelecky 1998, Jain 1997, Yang 1998]. Sun on havainnut näiden koottujen menetelmien sisältävän kaksi pääkohtaa: hakustrategiat erilaisten piirreosajoukkojen hakemiseksi sekä evaluointimenetelmät, joilla valitun joukon soveltuvuutta arvioidaan erilaisin menetelmin.

1.2.1 Piirteiden hakustrategiat

Edelleen Sun on tehnyt jaottelun hakustrategioille: 1) optimaalinen, 2) heuristinen ja 3) satunnainen. Inza mukaan [Inza et al. 2000] jaoteltuna strategiat ovat mainituista vain kaksi ensimmäistä. Optimaalisessa hakustrategiassa käytäisiin läpi kaikki mahdolliset osajoukot, mikä on Sunin mukaan käytännössä usein mahdottomaksi kasvava tehtävä. Kuitenkin Inza kertoo kahdesta tavanomaisesti käytetystä optimaalisesta hakumenetelmästä, depth-first sekä breadth-first, ja käyttää tässä viittausta Liun [Liu et al. 1998] artikkeliin. Lisäksi Inza mainitsee optimaalisen haun menetelmänä Barnch & Bound -haun, joka on esitetty Narendran [Narendra et al. 1977] varhaisessa artikkelissa, jossa optimaalisen piirteiden osajoukon saavuttamiseksi ei tarvitse käydä kaikkia vaihtoehtoja kombinatorisesti lävitse.

Heuristisessa hakustrategiassa tehdään hyvin perusteltuja lokaaleja, yksittäisiä valintoja. Yhteistä heuristisille menetelmille on, että ne eivät kykene toimimaan piirrejoukon optimoijina, koska valintatilanteessa niiltä puuttuu kyky huomioida kokonaisuutta. Tunnusomaista heuristisille menetelmille on se, että tulos on aina sama hakua käytettäessä. Toisin kuin Sun, Inza jaottelee heuristisen hakustrategian vielä deterministiseen ja ei-deterministiseen heuristiseen tapaan. Kaksi edustavaa heuristista (deterministisesti) tapaa ovat Sequential Forward Selection (SFS) sekä Sequential Backward Selection (SBS). SFS aloittaa tyhjästä piirteiden joukosta ja lisää siihen aina parhaimman piirteen, kun taas SBS alkaa karsia yksitellen täydestä joukosta sellaisia piirteitä, joilla on vähiten vaikutusta luokittimen toimintaan. Näistä kahdesta käytetään myös yhdistelmää, jossa ensin käytetään SFS:ää, minkä jälkeen SBS:ää – nämä tunnetaan lyhenteillä SFBS ja SFBS (Sequential Floating Backward Selection). Pal [Pal 1999] tuo esiin kaksi menetelmää, jotka ovat periaatteiltaan hyvin samanlaiset SFS:n ja SBS:n kanssa, nimittäin

Sensitivity Based Feature Ranking (SEFER) sekä Attenuator Based Feature Selection (AFES). Lisäksi heuristisiin hakustrategioihin Inza mainitsee best-first-menetelmän ja viittaa sen soveltamisessa Kohavin [Kohavi et al. 1997] artikkeliin.

Satunnaishaussa (joka Inzan mukaan on luokiteltuna ei-deterministiseksi heuristiseksi menetelmäksi) heuristisesta poiketen valittujen piirteiden osajoukko ei muodostu aina samaksi eri hakujen jälkeen. Inza luettelee joitakin satunnaistyyppisiä hakustrategioita, sekä antaa useita kirjallisuusviittauksia niiden sovelluksiin. Näitä menetelmiä ovat mm. Geneettiset Algoritmit, Simulated Annealing sekä Las Vegas Algoritmi. Samoin Sun antaa useita viittauksia, joissa satunnaishakua on sovellettu geneettisellä algoritmilla. Lisäksi Sun tuo esiin vielä hyvin tyypillisen satunnaisalgoritmin, relief, jota on käyttänyt mm. Kira [Kira et al. 1992], ja sen lukuisia muunnoksia on soveltanut vastaavasti Wiskott [Wiskott et al. 1994].

1.2.2 Evaluointi

Piirteiden evaluointi on piirteiden hakustrategian jälkeinen työvaihe. Evaluoinnissa arvioidaan erinäisin menetelmin valitun piirteiden osajoukon hyvyttä luokittimen toiminnan kannalta. Tässä esitetään menetelmiä, joilla testataan valitun piirreosajoukon hyvyttä luokittimen toiminnan kannalta. Evaluointimenetelmät jaetaan yleisesti kahteen kategoriaan, filter ja wrapper. Luokittimen tai klusteroinnin käyttö yhdessä piirteiden osajoukon valinnan kanssa edustaa wrapper-menetelmää, kun taas filter-menetelmä toimii itsenäisesti luokittimesta riippumatta. ”Wrapper” terminä tuleekin siitä, että piirteiden valintaprosessi on ”kiedottu” luokittimen ympärille. Filter-menetelmä on tällä hetkellä yleisemmin käytetty johtuen sen pienemmästä laskennallisesta tehontarpeesta. Etenkin suuremmissa dimensioissa wrapper-menetelmä joudutaan poissulkemaan sen vaatiman suuren laskentatehon vuoksi. Kuitenkin wrapper-menetelmällä saavutetaan lähes poikkeuksetta parempia tuloksia. Tämä johtuu siitä, että optimaalinen piirteiden osajoukko on aina jollakin tavoin riippuvainen käytetystä luokittimesta. Esimerkiksi neuroverkkoa käytettäessä wrapper-menetelmä valitsee alustavan piirteiden osajoukon, jolla se mittaa neuroverkon toimintakykyä, sitten se generoi tästä hieman muuntamalla uuden setin ja mittaa taas neuroverkon toimintaa. Tätä toistetaan, kunnes saavutetaan kierron pysäyttävä ehto, ja siihen saakka paras piirresetti annetaan jatkokäsittelyyn. Wrapper-menetelmän käytöstä löytyy sovelluksia mm. Johnin et al. [John et al. 1994] ja Siedeleckyn et al. [Siedelecky et al. 1988] artikkeleista. Vastaavasti filter-pohjaisia menetelmiä on useita, ja niistä mm. FOCUSa on sovellettu Almuallin et al. [Almuall et al. 1991] artikkelissa; RELIEFiä ovat soveltaneet Kira et al. [Kira et al. 1992] ja Cardien algoritmia Cardie [Cardie 1993]. Filter-pohjaiset menetelmät ovat valtaamassa alaa, koska nykyään vallitsevat suuret tietomäärät ovat niille soveltuvimpia.

1.2.3 Pääkomponenttianalyysi

Pääkomponenttianalyysi (PCA) on ehkä yleisimmin käytetty keino piirrematriisin tiivistämiseksi. PCA:ssa etsitään piirrematriisille pääkomponentit ja -suunnat, joissa varianssit maksimoituvat ja residuaalit minimoituvat. Kuvaus tehdään pienempiulotteiseen avaruuteen. Kaksi tai kolme pääkomponenttia on usein järkevä valinta, jos datan klusterointia haluaa tarkastella visuaalisesti. Pääkomponentit ovat korreloimattomia, mikä tarkoittaa sitä, että kahdentavaa redundanttista dataa ei pitäisi enää olla. Pääkomponentit ovat järjestyksessä siten, että informaationsisältö vähenee pääkomponenttiluvun kasvaessa. Tästä ei pidä vetää johtopäätöstä, että vain ensimmäiset pääkomponentit valitsemalla saavutettaisiin alkuperäistä datan määrää riittävästi kuvaava sisältö. Informaation tärkeitä palasia saattaa sisältyä myös jälkimmäisiin pääkomponentteihin. Sitä, mikä osuus informaatiosta sisältyy mihinkin pääkomponenttiin, on erittäin vaikea hahmottaa muunnoksen jälkeen. PCA:ta on toteutettu myös neuroverkon avulla [Rubner et al. 1989].

2. Toimintatilan tunnistus

Toiminta- ja prosessitilan tunnistamisen tekee luokitin. Yleisimmät luokittimet ovat neuroverkko-, fuzzy- tai geneettisiin algoritmeihin perustuvia. Tässä tutkimuksessa rajataan fuzzy- sekä GA-algoritmien käytöt pois, sillä niistä ei ole löydettävissä periaatteellista etua neuroverkkoihin nähden. Yksi neuroverkon parhaita ominaisuuksia on sen kyky kuvata mitä tahansa jatkuvaa funktiota. Tämän johdosta tutkijalla ei tarvitse olla hypoteeseja kyseessä olevasta mallista tai tarkempaa käsitystä parametrien vaikutuksesta malliin. Olennainen heikkous neuroverkoilla on kuitenkin se, että luokittimen tulos on riippuvainen verkon topologiasta sekä sisäisistä kertoimista. Tämän lisäksi tulosta on mahdoton selittää analyytisesti, toisin kuin jos systeemin käyttäytymisestä olisi olemassa sitä ja siinä esiintyviä ilmiöitä kuvaavat teoriat. Neuroverkoja on monen tyyppisiä, joista jotkin soveltuvat toisiin tehtäviin paremmin kuin toiset: esimerkiksi Hopfieldin verkot optimointiin, Multi Layer Perceptron funktion approksimointiin ja luokitteluun, Self-organizing Feature Mapping klusterointiin sekä luokittimeksi ja Learning Vector Quantization klusterointiin.

Toimintatilan tunnistamisessa käytettävä luokittelija voi olla neuroverkko- tai muu perusteinen, mutta Venkatasubramanian [Venkatasubramanian et al. 2003] on koonnut hyvän luokittelijan ominaisuudet seuraavasti:

- 1) Toiminnan nopeus. Diagnosoivan järjestelmän tulee vastata toimintatilan häiriöihin nopeasti. Toimintatilan luokittelu on lisäksi riippuvainen myös prosessitilan luokitusta. Kuitenkin nopea vaste ja luotettava toiminta ovat usein ristiriitaisia ominaisuuksia luokittimelle. Toiminnan nopeuden optimoimiseksi joudutaan karsimaan verkon topologiasta, minkä on havaittu johtavan useampiin virrehälytyksiin.

- 2) Eriytävyyys. Systemillä täytyy olla kyky tehdä luokkien välille selvät erot. Ideaalisessa tapauksessa ehdotettu luokka on ortogonaalinen muihin luokkiin nähden. Tähän pyrkiminen ei ole kuitenkaan itseisarvo, vaan paras tulos syntyy usein redundantin datan ja mahdollisimman korkean eriyttävyyden ominaisuuksien kombinaationa.
- 3) Robustisuus. Luokittelijan täytyy olla robusti kohinan ja sattuvien epämääräisyyksien suhteen. Robustisuus ja luokittimen toimintavarmuus ovat kaksi toisiinsa lähellä olevaa käsitettä.
- 4) Uutuustilanteen tunnistaminen. Yksi luokittimen minimivaatimuksista on tunnistaa systeemin toimintatila normaaliksi tai epänormaaliksi, ja tilanteen ollessa epänormaali, luokitella tunnettujen toimintahäiriöiden mukaisesti tai ilmoittaa kyseessä olevan tuntematon, epänormaali toimintatila. Aluksi tämä aiheuttaa systeemille useita tunnistamattomia toimintatiloja, kunnes opetuksen kautta luokitin alkaa vähitellen tuntea niitä.
- 5) Luokittimen virhe-estimaatti. Yksi luokittimen tärkeistä ominaisuuksista on antaa käyttäjälle mahdollisuus arvioida tuloksen luotettavuutta. Järjestelmän tulee antaa käyttäjälleen alustava virhe-estimaatti luokittelun tuloksesta, jolloin käyttäjälle tulee parempi tuntuma ennusteen oikeellisuudesta.
- 6) Mukautuvaisuus. Prosessitilan lisäksi muutoksia voi tulla ympäristöolosuhteissa, raakamateriaalin laadussa, koneenkäyttäjän ajotottumuksissa ja vastaavissa seikoissa. Luokittimen kyky mukautua näihin on käyttäjän kannalta toivottu ominaisuus, sillä se vähentää uudelleenopetuksen ja virhediagnosointien määrää. Geneerisesti ajatellen mukautuvaisuus on myös Prognos-hankkeen kannalta vaadittu ominaisuus ottaen huomioon eri koneiden tai jopa casejen vaatimukset.
- 7) Selittävyys. Paitsi että luokittimen tulee pystyä paikantamaan toimintahäiriö sillä tulisi olla myös kyky selittää, kuinka vika pääsi syntymään ja kuinka se eteni tähän tilanteeseen. Tämä vaatii jotain syy-seuraussuhteen tiedostamisesta. Käyttäjälle arvokasta tietoa on paitsi se, miksi luokittimen tulos oli kyseinen, myös se, miksi se ei ollut jokin toinen.
- 8) Vaatimukset mallintamiselle. Luokittimen mallin tulee olla mahdollisimman yksinkertainen, jotta se mahdollistaisi nopean mallin kehityksen sekä reaaliaikaisen diagnosoinnin.
- 9) Muistintarve ja laskennalliset vaatimukset. Tavallisesti nopeiden reaaliaikaisten luokittimien tarvitsemat laskenta-algoritmit eivät ole monimutkaisia, mutta vastaavasti tällöin saattaa tarve muistinvaraukselle olla suurempi. Näiden välille on haettava sopiva tasapaino laskennan kokonaistehokkuuden kannalta.

- 10) Usean häiriötilan yhtäaikainen tunnistaminen. Käytännössä tällainen tilanne voi tulla eteen, jolloin luokittimelta vaaditaan paljon. Ongelmana usean tilan samanaikaisessa tunnistamisessa ovat usein tilojen keskinäiset vuorovaikutussuhteet. Etukäteisarviot mahdollisista vikojen kombinaatioista eivät kombinatorisista syistä johtuen tavallisesti onnistu, jos vain kyseessä on hiemankin monimutkaisempi prosessi.

3. Yhteenveto

Tässä työssä käsiteltiin piirreanalyysiä, joka on mittausinformaation esikäsittelyä koneen toimintatilan tunnistamiseksi. Mittausten jälkeen alkaa piirteiden analysointi, jossa ensin luodaan piirrematriisi. Piirrematriisin kokoamisessa tulee käyttäjän kokemus ensisijaiseksi valintaperusteeksi. Kun matriisi on koottu, alkaa sen informaation tiivistäminen ja jalostaminen. Tämä siksi, että matriisi on tässä vaiheessa liian suuri sekä sisältää turhaa, kahdentavaa, luokittimen kannalta huonoa tai jopa harhaan johtavaa tietoa. Kokenutkaan piirrematriisin valitsija ei voi ottaa näitä kaikkia lähtötiedoilta vaadittuja ominaisuuksia huomioon. Tämän ratkaisemiseksi on esitetty ja sovellettu lukuisia piirteiden käsittelymenetelmiä, joista päällimmäisiksi nousevat ns. heuristiset menetelmät. Heuristisissa menetelmissä piirrejoukosta haetaan luokittimen toimintaa ajatellen sellaisia piirteiden osajoukkoja, jotka johtavat luokittimen varmaan toimintaan. Luokittimelle on listattu joukko ominaisuuksia, joita sen toiminnalta voidaan edellyttää. Luokittimen toiminta on tietenkin paljon riippuvainen edellä kuvatusta piirreanalyysistä, joten näiden ominaisuuksien saavuttaminen luokittimella on yhteistyötä piirreanalyysin kanssa. Kaikkia kuvattuja hyvän luokittimen ominaisuuksia ei voida saavuttaa samanaikaisesti, vaan niiden suhteen on tehtävä kompromisseja.

Lähteet

- [1] Almuall, H., Dietterich, T.G. Learning With Many Irrelevant Features. In: Proc. AAAI-91, Anaheim, CA, 1991, s. 547–552.
- [2] Blum, A., Langley, P. Selection of Relevant Features and Examples in Machine Learning. *Artif. Intell.* 97, 1997, s. 245–271.
- [3] Cardie, C. Using Decision Trees to Improve Case-based Learning. In: Proc. 10th International Conference on Machine Learning, Amherst, MA, 1993, s. 25–32.
- [4] Dash, M., Liu, H. Feature Selection for Classification. *Intelligent Data Anal.* 1 (3), 1997, s. 131–156.

- [5] Inza, I., Larranaga, P., Etxebarria, R., Sierra, B. Feature Subset Selection by Bayesian Network-based Optimization. *Artificial Intelligence* 123, 2000, s. 157–184.
- [6] Jain, A., Duin, R., Mao, J. Statistical Pattern Recognition: a Review. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 22 (1), 2000, s. 4–37.
- [7] Jain, A., Zongker, D. Feature Selection: Evaluation, Application, and Small Sample Performance. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 19, 1997, s. 153–158.
- [8] John, G., Kohavi, R., Pfleger, K. Irrelevant Features and the Subset Selection Problem. In: *Proc. 11th International Conference on Machine Learning*, New Brunswick, NJ, 1994, s. 121–29.
- [9] Kira, K., Rendell, R. A Practical Approach to Feature Selection. *The ninth International Conference on Machine Learning*, 1992, s. 249–256.
- [10] Kohavi, R., John, G. Wrappers for Feature Subset Selection. *Artificial Intelligence* 97 (1–2), 1997, s. 273–324.
- [11] Liu, H., Motoda, H. *Feature Selection for Knowledge Discovery and Data Mining*. Kluwer Academic, Norwell, MA, 1998.
- [12] Narendra, P., Fukunaga, K. A Branch and Bound Algorithm for Feature Subset Selection. *IEEE Trans. Comput.* C-26 (9), 1977, s. 245–253.
- [13] Pal, N.R. Soft Computing for Feature Analysis. *Fuzzy Sets and Systems* 103, 1999, s. 201–221.
- [14] Rajat, K., Nikhil, R., Sankar, K. Feature Analysis: Neural Network and Fuzzy Set Theoretic Approaches. *Pattern Recognition*, Vol. 30, No. 10, 1997, s. 1579–1590.
- [15] Rubner, J., Tavan, P. A Self-organizing Network for Principal Component Analysis. *Europhys. Lett.* 10, 1989, s. 693–698.
- [16] Siedelecky, W., Skalansky, J. On Automatic Feature Selection. *Int. J. Pattern Recognition and Artificial Intelligence* 2, 1988, s. 197–220.
- [17] Sun, Z., Bebis, G., Miller, R. Object Detection Using Feature Subset Selection. *Pattern Recognition* 37, 2004, s. 2165–2176.

- [18] Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin, K., Kavuri, S.N. A Review of Process Fault Detection and Diagnosis, Part I: Quantitative Model-based Methods. *Computers and Chemical Engineering* 27, 2003, s. 293–311.
- [19] Wiskott, L., Fellous, J., Kruger, N., Malsburg, C. Estimating Attributes: Analysis and Extension of Relief. *European Conference on Machine Learning*, 1994, s. 171–182.
- [20] Yang, J., Honavar, J. Feature Subset Selection Using a Genetic Algorithm. In: Motoda, H., Liu, H. *A Data Mining Perspective*. Kluwer, Dordrecht, (Chapt. 8), 1998.

Panostusnosturin kunnonvalvonta vaihteistoöljyjen analysoinnin avulla

Pekka Vähäoja

Oulun yliopisto, Konetekniikan osasto
Mekatroniikan ja konediagnostiikan laboratorio
Oulu

Tiivistelmä

Tässä artikkelissa käsitellään öljyanalytiikan käyttöä koneiden kunnonvalvonnassa. Tutkittavana tapauksena oli Ruukki Productionin Raahen terästehtaan panostusnosturi, jonka kuntoa seurattiin Prognos-projektissa myös värähtelyanalyysien avulla. Öljynäytteet otettiin panostusnosturin kahdesta vaihteistosta. Näytteistä analysoitiin muutamien tyyppillisten kulumametallien ja lisäaineena käytettävän fosforin pitoisuudet. Öljyjen sisältämän kiintoaineen määrä selvitettiin kolmessa eri kokoluokassa ja suodatetun kiintoaineen morfologiaa, kokoa ja laatua selvitettiin kvalitatiivisesti valomikroskopian avulla. Lisäksi määritettiin öljyjen vesipitoisuudet, kokonaishappoluku ja viskositeetti eri lämpötiloissa. Tutkimus toteutettiin huhtikuun 2004 ja kesäkuun 2005 välillä. Tutkitujen vaihteistoöljyjen voiteluominaisuudet olivat tulosten mukaan kunnossa. Vaihteissa ei myöskään havaittu normaalia poikkeavaa kulumista.

1. Öljyanalytiikasta

Toimiva voitelu on oleellista koneen luotettavan toiminnan kannalta. Erilaisia voiteluaineanalyysijä on kehitelty ja hyödynnettykin jo useiden kymmenien vuosien ajan kuitenkin niin, että voiteluaineanalytiikan merkitys on entisestään korostunut viime vuosikymmeninä nopeiden toimitusten ja hyvän laaduntuottokyvyn tarpeiden kasvun myötä. Nykyään voiteluaineanalytiikka, jonka puitteissa tässä keskitytään erityisesti öljyjen analytiikkaan, on merkittävä osa mittaavaa kunnonvalvontaa. Öljyanalytiikkaa voidaan hyödyntää useissa eri sovelluskohteissa erittäin suurta puhtautta vaativista hydraulikkaöljyistä aina moottoriöljyjen kunnonvalvontaan. Öljyanalytiikan avulla voidaan saada tietoa kone-elinten kulumisesta, prosessin toiminnasta, voitelun tehokkuudesta ja itse öljyn kunnosta. Erilaisia analyysijä voidaan tehdä vaihteleva määrä sovelluskohteesta riippuen, mutta usein käyttökelpoisia analyysijä ovat mm. kulumametallipitoisuuksien ja öljyn lisäainepitoisuuksien määrittäminen, öljyssä olevien kiinteiden hiukkasten kvalitatiivinen ja kvantitatiivinen analysointi sekä öljyn voitelutehoa kuvaavien fysikaalisten parametrien määrittäminen. Vaikka useita öljyanalyysitekniikoita on standardisoitu, käy mo-

nesti niin, että menetelmiä täytyy edelleen kehittää sovelluskohteeseen paremmin sopiviksi. Kaikkia vikoja ei öljyanalyysien avulla voida ennustaa. Tällaisia vikoja ovat mm. epätasapaino ja asennusvirhe. Mikäli nämä kuitenkin alkaisivat aiheuttaa kone-elinten kulumista, tämä tietysti havaittaisiin. Toisaalta tietyt vikatyypit, kuten vaihteistojen ja hydraulikkajärjestelmien viat, voidaan havaita öljyanalyysien avulla jo hyvin varhaisessa vaiheessa. Näin ollen kunkin kohteen kunnonvalvontaan on valittava parhaiten sopivat analyysimenetelmät. Öljyanalytiikan ja värähtelymittausten avulla saatujen vikatiетоjen yhdistäminen mahdollistaa useimmissa kohteissa erittäin tehokkaan ennakoivan kunnonvalvonnan erityisesti, jos vielä seurataan samanaikaisesti prosessiparametreja. Myös tiettyjä öljyanalytiikan mittauksia voidaan toteuttaa ”on-line-mittauksina”, mikä taas parantaa vian havaitsemismahdollisuuksia aikaisessa vaiheessa. [1–6]

2. Tutkimuksen toteutus ja tulokset

Tämä tutkimus tehtiin Prognos-projektissa huhtikuun 2004 ja kesäkuun 2005 välisenä aikana. Mittauskertoja kertyi tälle aikavälille viisi kappaletta. Tutkittavana kohteena olivat panostusnosturin 122 pohjois- ja eteläpään vaihteistojen öljyt. Ruukki Productionin työntekijät ottivat öljynäytteet imupumpulla. Näytteistä määritettiin tiettyjen metallien (Fe, Cr, Ni, Cu, Zn) ja lisäaineena käytetyn fosforin pitoisuudet, kiintoainepitoisuudet kolmessa eri suuruusluokassa ($> 0,45$, > 5 ja $> 12 \mu\text{m}$), happoluku (TAN), vesipitoisuus ja viskositeetti kolmessa eri lämpötilassa. Lisäksi suodatinmembraaneja tutkittiin kvalitatiivisesti mikroskoopilla.

2.1 Metallit ja fosfori

Öljyssä olevat rauta, kromi ja nikkeli voivat olla peräisin kulumasta teräsosasta ja kupari sekä sinkki kulumasta messinki- tai pronssiosasta. Useimmiten onkin riittävää analysoida vain pääkomponentteina esiintyvien raudan (teräs) ja kuparin (messinki/pronssi) pitoisuudet, jotta voidaan varmistua tiettyjen koneenosien kulumisesta. Tutkittavissa kohteissa teräspartikkelit voivat olla peräisin esim. vaihteista, laakereista, akseleista tai prosessipölystä. Messinkipartikkelit voivat irrota laakerien pidikkeistä. Sinkki voi olla tiettyissä öljyissä myös lisäaineena. Tulosten mukaan sinkkiä ei käytetty lisäaineena tutkituissa öljyissä. Fosforia käytetään öljyissä usein hapettumisenesto-, kulumisenesto- ja korroosionestolisäaineiden osana [7]. Vaihteistoöljyissä fosforin tyypillinen käyttökohde on esim. EP-lisäaineissa vähentämässä koneenosien kulumista kuormituksessa [7]. Tutkittujen metallien ja fosforin pitoisuudet määritettiin Philips PU 7000 ICP-OES -laitteistolla käyttäen (1/10 w/v) kerosiinilaimennosta. Tulokset ilmoitettiin [ppm]- eli [mg/kg]-yksikköinä. Kerosiinilaimennusmenetelmän huono puoli on sen herkkyuden aleneminen, kun kiinteiden partikkelien koko kasvaa yli $10 \mu\text{m}$. Liuenneet, pienemmät

partikkelit ja orgaanisessa muodossa esiintyvät metallit luonnollisesti havaitaan täydellisesti mittaustarkkuuden rajoissa. Öljynäytteiden esikäsittelyyn onkin tarkoituksena jo syksyn 2005 aikana kehittää menetelmä, jossa näytteet hajotetaan mikroaaltoavusteista happohajotusta käyttäen vesi-happoliuoksiksi, soveltaen jo olemassa olevia tutkimuksia ja standardeja [8]. Tällöin myös suuret partikkelit hajoavat ja tulevat näin ollen varmasti havainnoitua. Huomautettakoon kuitenkin, että kerosiinilaimennusta on käytetty laajalti öljyanalytiikassa ja kulumistapahtumat havaitaan silläkin useimmiten [9]. Tarkastelujakson aikana vaihteistoöljyille määritettyjen metallien ja fosforin pitoisuudet on esitetty taulukoissa 1 ja 2.

Taulukko 1. Tiettyjen metallien ja fosforin pitoisuus eri näytteenottokerroilla kohteessa 122 pohjoinen.

Mittaus	Fe [ppm]	Cr [ppm]	Ni [ppm]	P [ppm]	Cu [ppm]	Zn [ppm]
Huhtikuu 2004	12	< 1	< 1	871	< 1	1
Elokuu 2004	13	3	15	866	< 1	3
Marraskuu 2004	9	< 1	< 1	813	< 1	< 1
Helmikuu 2005	9	< 1	< 1	826	1	2
Kesäkuu 2005	10	< 1	< 1	824	< 1	< 1

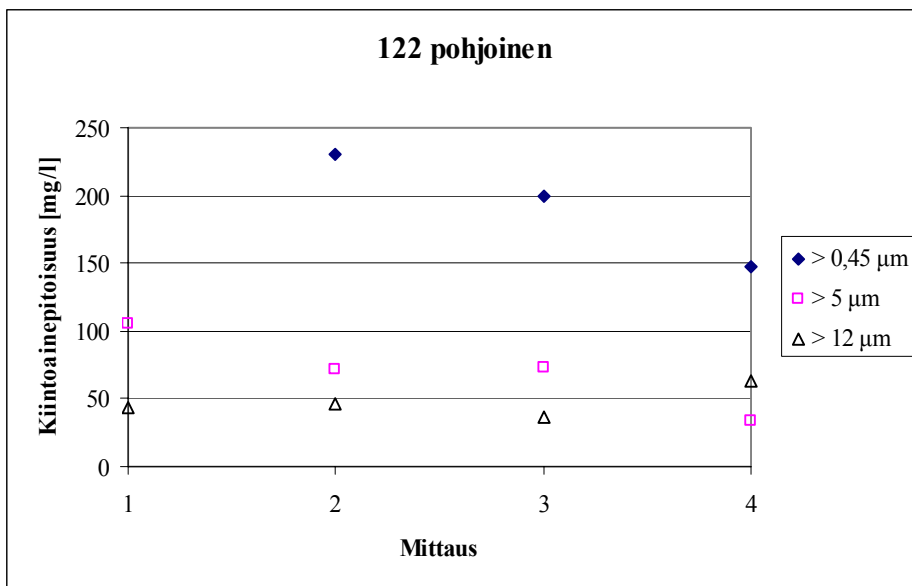
Taulukko 2. Tiettyjen metallien ja fosforin pitoisuus eri näytteenottokerroilla kohteessa 122 etelä.

Mittaus	Fe [ppm]	Cr [ppm]	Ni [ppm]	P [ppm]	Cu [ppm]	Zn [ppm]
Huhtikuu 2004	1	< 1	< 1	853	< 1	1
Elokuu 2004	5	1	16	864	< 1	3
Marraskuu 2004	4	< 1	< 1	821	< 1	< 1
Helmikuu 2005	6	< 1	< 1	825	1	2
Kesäkuu 2005	3	< 1	< 1	818	< 1	< 1

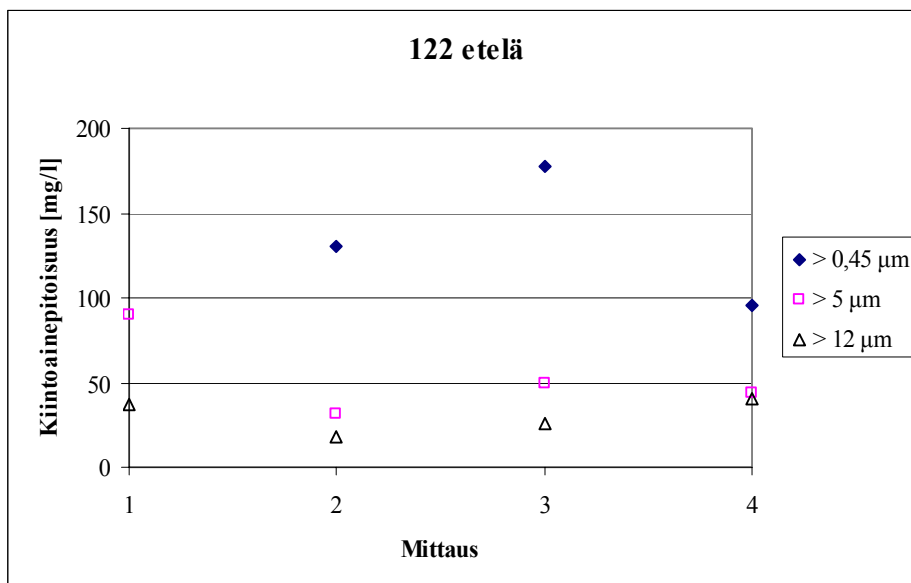
Kaikkien näytteistä määritettyjen metallien pitoisuudet olivat alhaiset ja pysyivät samalla tasolla koko tarkastelujakson ajan. Näin ollen vaihteet eivät olleet juuri kuluneet. Esim. teräsosan kuluessa rautapitoisuus nousisi merkittävästi, joten se on hyvä indikaattori vaihteen kunnolle. Metallipitoisuudet olivat lähes samaa luokkaa molemmissa vaihteissa, joskin raudan pitoisuudet olivat eteläpuolen vaihteen öljyssä hieman pienemmät koko seurannan ajan. Kohtuullisen suuri nikkelpitoisuus elokuun 2004 näytteissä voi johtua näytteenotosta tai mittauksessa sattuneesta virheestä, ei kuitenkaan teräsosan kulumisesta, koska rautapitoisuus ei noussut. Fosforipitoisuudet laskivat 5,4 % (122 pohjoinen) ja 4,1 % (122 etelä) seurantajakson aikana. Koska fosforipitoisuus on muuttunut näin vähän, todennäköisesti EP-lisäaine on vielä täysin toimintakuntoinen.

2.2 Kiintoainepitoisuudet ja mikroskopia

Suuri öljyn kiintoainepitoisuus voi olla merkki koneen kulumisesta, ympäristöstä/prosessista koneen sisään joutuvasta pölystä (esim. huohottimien kautta) tai huonosti toimivasta suodatuksesta. Kiinteät partikkelit voivat tässä tapauksessa olla peräisin vaihteesta, laakereista, laakerien pidikkeistä, akseleista, tiivisteistä tai prosessiympäristön pölystä. Varsinaista suodatusta näissä vaihteissa ei ollut, ja voitelussa käytettiin kylpyvoitelua. Kiintoainepitoisuus määritettiin kolmessa eri kokoluokassa: $> 0,45 \mu\text{m}$, $> 5 \mu\text{m}$ ja $> 12 \mu\text{m}$. Öljynäytteitä liuotettiin sopiva määrä tolueeniin (40–200 ml, 1:1 v/v) ja suodatettiin em. huokoskoon selluloosanitraattimembraanien läpi. Membraaneille jääneen kiintoaineen määrän perusteella laskettiin kiintoainepitoisuus [mg/l]. Suodatinmembraaneja tutkittiin kvalitatiivisesti Nikon Epiphot TME -valomikroskoopilla ja pyrittiin selvittämään näytteissä tyypillisesti esiintyvien partikkelien kokoja, muotoja ja laatuja sekä luokittelemaan partikkeleja Roylancen et al. [2] esittämän mallin mukaan. Tarkastelujakson aikana mitatut öljyjen kiintoainepitoisuudet molemmille vaihteille on esitetty kuvissa 1 ja 2 ajan funktiona. Mittaukset 1–4 tehtiin elokuussa 2004, marraskuussa 2004, helmikuussa 2005 ja kesäkuussa 2005.



Kuva 1. Kiintoainepitoisuuden kehitys kohteessa 122 pohjoinen.



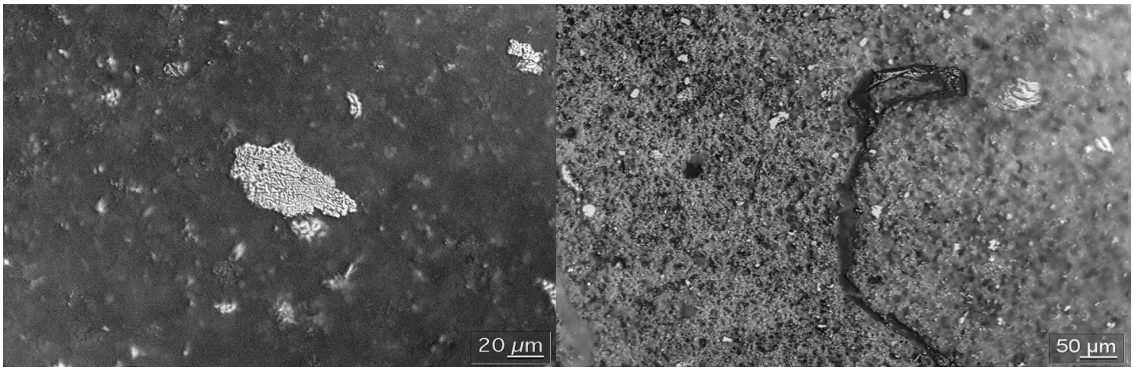
Kuva 2. Kiintoainepitoisuuden kehitys kohteessa 122 etelä.

Kiintoainepitoisuus pysyi molemmissa kohteissa alhaisella tasolla kaikissa kokoluokissa, ja se jopa saattoi tarkastelujakson aikana pienetä. Tähän saattaa vaikuttaa esim. suurempien partikkelien laskeutuminen öljysäiliön pohjalle ennen näytteenottoa. Totaali-kiintoainepitoisuus ($> 0,45 \mu\text{m}$) vaihteli 95–230 mg/l kohteesta ja mittauskerrasta riippuen. Suurempien kokoluokkien pitoisuudet olivat huomattavasti pienempiä, joten todennäköisesti valtaosa partikkeleista on alle $< 5 \mu\text{m}$ kokoisia eivätkä siten kovin merkittäviä. Toisaalta mikäli kulumista tapahtuu, erityisesti suurten partikkelien määrä kasvaa, joten näitä on toki syytä seurata jatkossakin.

Kvalitatiivisessa mikroskooppisessa tarkastelussa [10] havaittiin, että pohjoispuolen vaihteen öljyssä oli huomattava määrä hapettuneita (mustia) metallipartikkeleita, jotka peittivät membraanin kauttaaltaan. Nämä partikkelit kuuluivat pääasiassa normaalin kulumisen irrottamiin rubbing (hankautumiskulumis) -partikkeleihin. Jonkin verran havaittiin myös kirkkaita samantyyppisiä partikkeleita. Yleisimmät suuret partikkelit olivat kirkkaita leikkautumiskulumis- (cutting) ja laminaaripartikkeleja (laminar). Laminaarien koko vaihteli kolmestakymmenestä useisiin satoihin mikrometreihin. Cutting-tyyppiset partikkelit olivat lähinnä pitkiä teräslankoja. Harvemmin havaittiin väsymiskulumis- (fatigue chunks) ja vakavan hiontakulumisen partikkeleita (severe sliding). Hapettuminen saattoi tuottaa myös ruosteisia metallipartikkeleita mustan metallin lisäksi.

Partikkelimäärät olivat yleensä huomattavasti pienempiä eteläpuolen vaihteen öljyssä kuin pohjoispuolen vaihteen öljyssä. Partikkelit hapettuivat tyypillisesti pienikokoiseksi mustaksi metalliksi ja harvemmin myös ruosteeksi. Suurimmat partikkelit olivat yleensä laminaareja, jotka olivat joko kirkasta metallia, osittain tai kokonaan hapettuneita. Harvemmin havaittiin leikkautumiskulumis- ja väsymiskulumispartikkeleita. Kirkkaat par-

tikkelit olivat yleensä pienempikokoisia kuin vastaavat partikkelit pohjoispuolen öljyssä. Todennäköisesti mikäli ko. vaihteissa kulumista alkaa tapahtua, niin leikkautumiskulumis- ja erityisesti laminaaripartikkelien määrä kasvaa. Mikäli kyseessä on vakava kuluminen, alkaa mitä ilmeisimmin myös vakavan hiontakulumisen irrottamien partikkelien määrä kasvaa. Kirjallisuuden perusteella [2] vaihteiden kulumisessa öljyn joukosta voidaan löytää erityisesti laminaareja, väsymiskulumisen ja vakavan hiontakulumisen irrottamia partikkeleja. Kuvissa 3–4 on esitetty pari tyypillistä kulumametallipartikkelia. Mikroskooppikuvista koostettiin myös vaihdekohtaiset yleisimpiä partikkeleja esittelevät PowerPoint-esitykset, joissa kuvia on helppo tarkastella.



Kuva 3. Teräslaminaari.

Kuva 4. Hapettunut teräksinen cutting-partikkeli.

2.3 Vesipitoisuus, happoluku ja viskositeetti

Näytteiden vesipitoisuudet määritettiin automaattisella Mettler Toledo DL 36 KF-titraattorilla, happoluvut (TAN) tavallisella happo-emästitrauksella ja viskositeetti Brookfield DV II+-rotaatioviskometrillä. Vesipitoisuudet ilmoitettiin [ppm]- eli [mg/kg]-yksiköissä, happoluku [mgKOH/g]-yksiköissä ja viskositeetti dynaamisena viskositeettina [cP]-yksiköissä. Vettä voi joutua öljyn joukkoon tässä tapauksessa lähinnä ympäristöstä kosteutena tai kondenssivetenä. Suuri vesimäärä voi edesauttaa öljyn hapettumis- ja hajoamisreaktioita sekä alentaa öljyn viskositeettia ja aiheuttaa myös koneen osien korroosiota ja edesauttaa mikrobikasvustojen syntymistä öljyn joukkoon. Happoluku kertoo öljyn joukossa olevien hapettumis- tai hajoamistuotteiden (orgaanisten happojen määrän) ja sen tulee olla normaalitilanteessa mineraaliöljyillä pieni < 1 mgKOH/g. Viskositeetti on öljyn tärkein ominaisuus, ja sen tulee olla sopiva koneen normaalissa käyntilämpötilassa, jotta voitelu olisi tarpeeksi tehokas ja jotta kulumista ei esiintyisi. Vesipitoisuudet ja happoluvut on esitetty taulukoissa 3 ja 4 ja viskositeetit lämpötilan funktiona kuvissa 5 ja 6. [1]

Taulukko 3. Vaihteistoöljyjen vesipitoisuudet tarkastelujakson aikana.

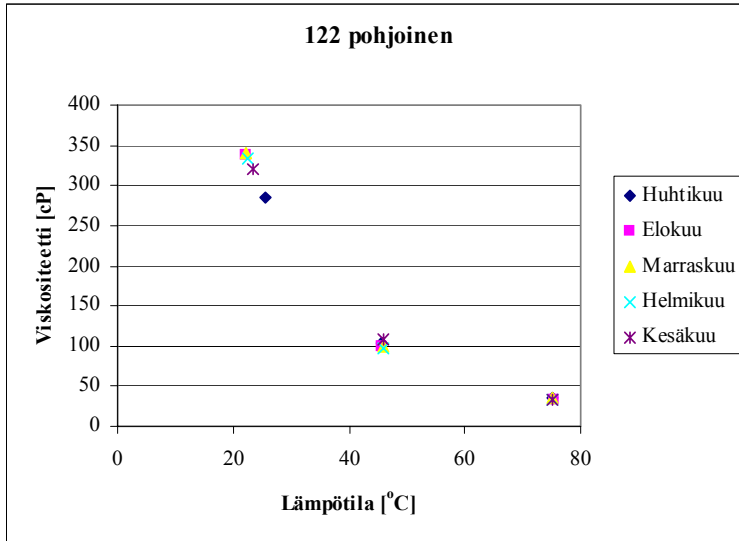
Mittaus	122 pohjoinen [ppm]	122 etelä [ppm]
<i>Huhtikuu 2004</i>	319	1113
<i>Elokuu 2004</i>	279	276
<i>Marraskuu 2004</i>	45	35
<i>Helmikuu 2005</i>	36	42
<i>Kesäkuu 2005</i>	37	37

Vesipitoisuus oli ensimmäisellä mittauskerralla korkea eteläpuolen vaihteessa. Tämä saattoi johtua näytteenotosta ja mahdollisesti laitteesta olleesta kondenssivedestä. Myöhemmillä mittauskerroilla vesipitoisuus oli pienempi ja tasoittuikin todella alhaiselle tasolle (noin 40 ppm vettä molemmissa öljyissä). Tällaisesta vesimäärästä ei ole mitään haittaa koneen tai öljyn toiminnalle.

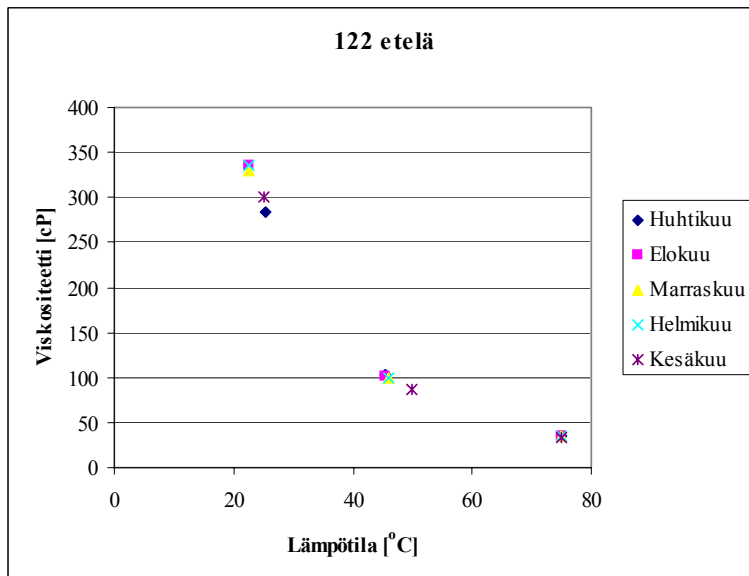
Taulukko 4. Vaihteistoöljyjen happoluvut tarkastelujakson aikana.

Mittaus	122 pohjoinen [mgKOH/g]	122 etelä [mgKOH/g]
<i>Huhtikuu 2004</i>	0.81	0.73
<i>Elokuu 2004</i>	0.81	0.75
<i>Marraskuu 2004</i>	0.80	0.74
<i>Helmikuu 2005</i>	0.77	0.74
<i>Kesäkuu 2005</i>	0.80	0.76

Öljyjen happoluvut pysyivät samalla alhaisella tasolla koko tarkastelujakson ajan, joten niiden hapettumista tai vanhenemista ei tarkastelujakson aikana tapahtunut.



Kuva 5. Öljyn viskositeetit tarkastelujakson (huhtikuu 2004–kesäkuu 2005) aikana kohteessa 122 pohjoinen.



Kuva 6. Öljyn viskositeetit tarkastelujakson (huhtikuu 2004–kesäkuu 2005) aikana kohteessa 122 etelä.

Öllyjen viskositeeteissa ei tapahtunut merkittäviä muutoksia tarkastelujakson aikana, joten niiden voitelukyky on edelleen hyvä.

3. Yhteenveto

Tutkittujen vaihteistoöljyjen voiteluominaisuudet olivat kunnossa. Vaihteissa ei myöskään havaittu normaalista poikkeavaa kulumista. Nämä tulokset ovat yhdenmukaisia Jaakko Leinosen [11] suorittamien värähtelymittausten kanssa. Vaihteistot ovat hyvässä toimintakunnossa, mutta luonnollisesti niiden seuranta kannattaa tulevaisuudessa jatkaa, jotta mahdolliset viat voidaan havaita aikaisessa vaiheessa ja näin välttyä tuotannonmenetyksiltä. Näiden öljyjen analysointia on tarkoitus vielä jatkaa ja käyttää niitä myös hyväksi kehitettäessä uusia menetelmiä öljyanalytiikkaan.

Lähteet

- [1] Toms, L. A. Machinery Oil Analysis – Methods, Automation & Benefits. 2nd edition. Coastal Skills Training. Virginia Beach. 1998. 383 s.
- [2] Roylance, B.J., Hunt, T.M. The Wear Debris Analysis Handbook. 1st edition. Coxmoor Publishing Company. Oxford. 1999. 128 s.
- [3] Newell, G.E. Oil Analysis – Cost Effective Machine Condition Monitoring Technique. In: Proc. of Condition Monitoring '99. Swansea. UK. 12th–15th April 1999, s. 387–394.
- [4] Troyer, D.D. Effective Integration of Vibration Analysis and Oil Analysis. In: Proc. of Condition Monitoring '99. Swansea. UK. 12th–15th April 1999, s. 411–420.
- [5] Niiranen, E. Hiukkaslaskenta öljyjärjestelmien kunnonvalvonnassa. Tribologia – Finnish Journal of Tribology, Vol. 23. No 3–4. 2004, s. 5–15.
- [6] Parikka, R., Vaajoensuu, E. Valon läpäisyyn perustuvat low cost -analysointorit öljyjen käynninaikaiseen kunnonvalvontaan. Tribologia – Finnish Journal of Tribology, Vol. 22. No 4. 2003, s. 16–22.
- [7] Wills, J.G. Lubrication Fundamentals. Marcel Dekker, Inc. New York. 1980. 465 s.
- [8] EPA Method 3051A (Revision 1). Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils and Oils. Environmental Protecting Agency. USA. January 1998. 25 s.

- [9] Vähäoja, P., Lahdelma, S., Kuokkanen, T. Condition Monitoring of Gear Boxes Using Laboratory-scale Oil Analysis. In: Proc. of the 17th Int. Congress of Condition Monitoring and Engineering Management (COMADEM 2004). Cambridge. UK. 23–25.8.2004, s. 104–114.
- [10] Vähäoja, P., Lahdelma, S., Kuokkanen, T. Experiences with Different Methods for Monitoring the Quality and Composition of Solid Matter in Rolling and Gear oils. In: Proc. of the 18th Int. Congress of Condition Monitoring and Engineering Management (COMADEM 2005). Cranfield. UK. 31.8.–2.9.2005, s. 463–473.
- [11] Leinonen, J. Siltanosturin nostokoneiston kunnonvalvonta. Diplomityö. Oulun yliopisto. Konetekniikan osasto. Oulu. 2005. 95 s.

Tutkimukseen liittyvää julkaisutoimintaa

Mittausstrategia, jota tässä tutkimuksessa käytettiin, perustuu suurelta osin seuraavaan julkaisuun: Vähäoja, P., Lahdelma, S., Kuokkanen, T. Condition Monitoring of Gear Boxes Using Laboratory-scale Oil Analysis. In: Proc. of the 17th Int. Congress of Condition Monitoring and Engineering Management (COMADEM 2004). Cambridge. UK. 23.–25.8.2004, s. 104–114.

Tässä tutkimuksessa tehtyä öljyjen kiintoaineanalytiikkaa esitellään julkaisussa: Vähäoja, P., Lahdelma, S., Kuokkanen, T. Experiences with Different Methods for Monitoring the Quality and Composition of Solid Matter in Rolling and Gear oils. In: Proc. of the 18th Int. Congress of Condition Monitoring and Engineering Management (COMADEM 2005). Cranfield. UK. 31.8.–2.9.2005, s. 463–473.

Lisäksi tutkittuja vaihteistoöljyjä osittain hyödynnettiin oheista öljyjen metallianalytiikkaan liittyvää julkaisua tehtäessä: Vähäoja, P., Välimäki, I., Heino, K., Perämäki, P., Kuokkanen, T. Determination of Wear Metals in Lubrication Oils; A Comparison Study of ICP-OES and FAAS. (Hyväksytty julkaistavaksi Analytical Sciences-lehdessä 7/2005, painossa.)

Syksyn 2005 tai talven 2006 aikana valmistuu Pekka Vähäojan voiteluaineiden kemiallista tutkimusta käsittelevä väitöskirja, jossa luonnollisesti käsitellään tämänkin tutkimuksen tuloksia soveltuvilta osin.

Robotin kunnonvalvonta

Jari Halme
VTT Tuotteet ja tuotanto
Espoo

Tiivistelmä

Robotin toiminnan kannalta tärkeintä on, että robotilla voidaan suorittaa määritellyt liikeradat mahdollisimman tarkasti ja oikea-aikaisesti. Robotin kustannusteknisesti kriittisimmät komponentit ovat robotin servomoottorit ja vaihteet. Vaurion tapahtuessa näiden korjaus- ja huoltoajat saattavat olla huomattavan pitkiä. Robotilla pyörimis- ja liikenopeudet eivät säily vakioina, samoin kuorman asema tukipisteeseen nähden muuttuu. Tyypillisesti värähtelydiagnostiikassa käytetyt menetelmät edellyttävät, että vertailtavat mittaukset on näytetty yhtäläisistä kuormitus- ja nopeusolosuhteista. Yksi mahdollisuus toteuttaa poikkeamatilanteiden tunnistus jatkuvassa tuotantokäytössä olevalla robotilla on valittujen vasteiden vertaaminen samasta prosessista mutta eri aikoina mitattujen vasteiden kanssa. Kriittisimpien komponenttien tarkennettuun seurantaan voidaan suunnitella instrumentoitu testiajo, jossa suoritetaan yhdellä nivelellä kerrallaan nivelliike toisesta ääripäästä toiseen ääripäähän. Tällöin kuormitus voidaan pitää testin aikana vakiona ja haluttaessa myös nopeus lähtöä ja pysähdystä lukuun ottamatta. Etämonitoroinnin avulla robotin kuntoa voidaan seurata siellä, missä siihen on kustannusteknisesti parhaat analyysiresurssit käytössä.

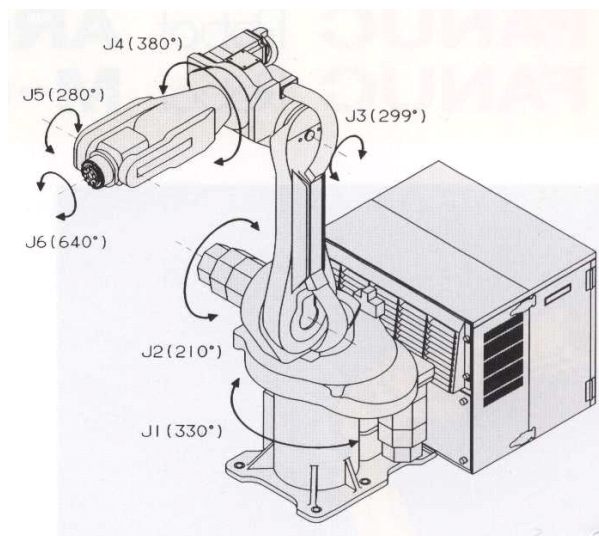
1. Johdanto

Valvottavassa kohteessa kunnonvalvonnan menetelmät riippuvat kohteessa komponenteista, niihin vaikuttavista kuormista, kuormitusolosuhteista ja näiden keskinäisistä riippuvuuksista, syntyvien vaurioiden esiintymistaajuudesta ja taloudellisesta merkittävydestä sekä vaurioiden havaittavuudesta ja riittävän havaittavuusluotettavuuden saavuttamiseksi tarvittavista resurssi- ja investointikustannuksista. Roboteilla valvonnan tarpeet riippuvat luonnollisesti voimakkaasti sekä käytetystä robotityypistä että sen sovelluskohteesta ja -tavasta. Tässä artikkelissa esitetään Prognos-tutkimushankkeessa servomoottoriosaprojektin yhteydessä toteutettuja robotiikan kunnonvalvonnan tarpeisiin liittyvää kohde ja komponenttietoa sekä suoritettuja kunnonvalvontamittauksia robotin nivelpisteistä, vaihteista ja moottorista robotin vikaantumisen ennakoinnin kehittämistä varten. Seurattava robotti on Foxconnin tuotantokäytössä oleva Fanucin R-J2 M-6i -tyypin teollisuusrobotti.

2. Teollisuusrobotti

2.1 Käyttökohde ja rakenne

Robotti palvelee robottisolun yhteydessä olevaa ruiskupuristuskonetta siirtämällä valmistetut, kevyet muovikuoret yksitellen ruiskupuristuskoneelta pakkaus- tai siirtoalustalle elelleenkäsiteltäväksi. Robotin mekaaninen rakenne koostuu nivelistä, nivelvarsista sekä tarraimesta. Robotin nivelvarsia käyttää yhteensä kuusi AC-servomoottoria. Ensimmäinen moottori (M1) on robotin tukirakenteessa ja pyörittää robotin ensimmäistä nivelvartta vertikaaliakselin ympäri (kuva 1). Toinen moottori (M2) on ensimmäisen nivelvarren päässä ja käyttää planeettavaihteen välityksellä robotin toista nivelvartta. Vastaavasti kolmas moottori (M3) on toisen nivelvarren päässä ja käyttää kolmatta nivelvartta. Neljäs moottori (M4) on kolmannella nivelvarrella, lähellä moottoria M3. Moottori M3 kiertää neljättä nivelvartta, joka on kolmannen nivelvarren akselin jatkeella samassa suunnassa. Viides moottori (M5) on neljännen, haarukkamaisen nivelvarren rakenteen sisällä ja käyttää vaihteen kautta haarukan välissä olevaa viidettä nivelvartta. Kuudes moottori (M6) on viidennen nivelvarren päässä, ja se kiertää kuudetta nivelvartta, joka on viidennen nivelvarren akselin suuntainen. Kuudenteen nivelvarteen on kiinnitetty robotin tarrain. Tarraimen avaus- ja sulkemismekanismi on käytöltään pneumaattinen.



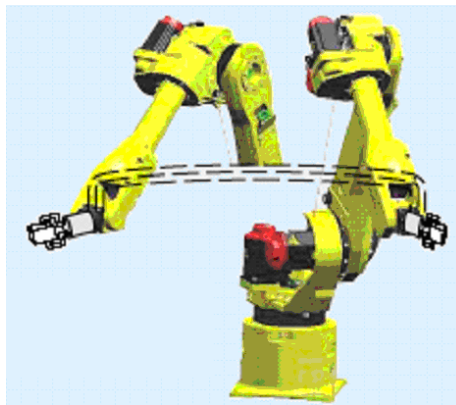
Kuva 1. Kuusiakselinen, AC-servomoottoreilla varustettu Fanucin teollisuusrobotti ilman tarrainta [Fanuc 2005, I].

2.2 Liikeradat ja -nopeudet

Robotin päätoimintoihin kuuluu yhden työkierron aikana valmistetun muovikuoren poiminta ruiskupuristuskoneelta, aseointi kuoren reunajäysteiden poistoa varten ja

lopuksi kuoren siirtäminen jatkokäsittelyalustalle. Samalla tuotteella ja samassa solussa työvaiheet noudattavat samaa sekvenssiä, jossa liikesarjat seuraavat toisiaan aina samantapuisina ja samassa järjestyksessä työkierrosta toiseen (kuva 2).

Robotin absoluuttiset nivelliikenopeudet riippuvat robotille määritetyistä liikeradoista sekä nivelten keskinäisistä suhteista että yksittäisten nivelten nivelkiertonopeuksista (taulukko 1). Robotin tukipisteestä etäämmällä olevissa nivelpisteissä summautuneet liikenopeudet ovat yleensä suurimmat. Robotin nopeudet muuttuvat huomattavasti työkierron aikana riippuen suoritettujen työkierron vaiheesta sekä nivelpisteiden keskinäisestä asemoinnista kierron aikana. Lisäksi liikeradat ovat suhteellisen lyhytkestoisia. Robotin nivelten staattinen kuormitus riippuu robotilla liikuteltavan massan (rungon, tarraimen ja siirrettävän tuotteen redusoidu massa) etäisyydestä nivelpisteistä ja dynaaminen kuormitus massan kiihtyvyydestä nivelpisteen suhteen. Robotin nivelten liikeradoista syntyneet kumuloituneet kuormitukset ovat suurimmillaan robotin tukipisteessä ja sen lähellä olevissa nivelissä. Suurin sallittu kuormitus käytetyn robotin ranteessa on 6 kg.



Kuva 2. Esimerkki robotin liikeradasta [Fanuc 2005, II].

Taulukko 1. Robotin R-J2 M-6i nivelten maksimikiertonopeudet sekä suurimmat sallitut taivutus- ja hitausmomentit nivelille J4, J5 ja J6 [Fanuc 2005, II].

J2 M6i	Nivelet					
	J1	J2	J3	J4	J5	J6
Maksiminopeus [°/s]	120	120	120	360	360	450
Sallittu momentti [Nm]	–	–	–	15,7	9,8	5,9
Sallittu hitausmomentti [kgm ²]	–	–	–	0,63	0,20	0,061

3. Monitoroitavat komponentit

Robotin toiminnan kannalta tärkeintä on, että robotilla voidaan suorittaa määritellyt liikeradat mahdollisimman tarkasti ja oikea-aikaisesti. Kustannusteknisesti kriittisimmät komponentit ovat robotin servomoottorit ja vaihteet. Vaurion tapahtuessa näiden korjaus- ja huoltoajat saattavat olla huomattavan pitkiä. Korjaavan kunnossapitostrategian asemesta tarvitaan kuntoon ja kunnan seurantaan liittyviä toimenpiteitä.

Servomoottorit

Robotin nivelliikkeet tuotetaan nivelkohtaisilla Fanucin AC-servomoottoreilla (Kuva 3), joilla jokaista niveltä voidaan käyttää itsenäisesti käytössä olevan ajoprofiilin mukaisesti. Halutun ajoprofiilin ja todellisten liikkeiden väliset residuaalit korjataan servomoottorin pulssianturilta tulevan takaisinkytkentäinformaation ja robotille integroidun säätöyksikön avulla. Säätkorjattu ohjaussignaali ohjataan moottoreiden servovahvistimen kautta takaisin servomoottoreille. Robotin varren taipuma voidaan etukäteen kompensoida. Robotin mekaaniset välykset, käytöstä aiheutuneet kulumat ja mittaepätarkkuudet kumuloituvat robotin epätarkkuudeksi. Uuden Fanuc M6i robotin toistotarkkuudeksi luvataan $\pm 0,1$ mm.



Kuva 3. Fanucin AC-servomoottori [Fanuc 2005, III].

Nivelkuormitusten mukaisesti moottoreiden nimellistehot ovat nivelkohtaisia, ja suurimmillaan ne ovat lähinnä kiinteää tukipistettä olevissa nivelissä J1, J2 ja J3.

Servomoottorit ovat sähkömekaanisia laitteita, joiden vikaantuminen voi johtua sähköisistä, mekaanisista ja muista, ulkoisista syistä. Mekaanisia vikalähteitä ovat mm. laakerivauriot, käämin ja laminoinnin liikkeet, roottori-iskut ja epäkeskisyys. Tyypillinen mekaaninen vika on laakerivaurio. On arvioitu, että yli 40 % sähkömoottorin vioista aiheutuu laakereista [Singh et al. 2003]. Laakereiden toimintakuntoon vaikuttaa erityisesti käytetyn laakerirasvan laatu (synteettisiä ja mineraalipohjaisia rasvoja ei saa sekoittaa) sekä rasvan oikea määrä. Sähköisiä syitä ovat mm. käämityksestä johtuvat kierros-, vaihe- tai maaohikosulkuilanteet ja roottoritankohalkeamat. Staattorivaurioiden yhteenlaskettu osuus on yli 25 % ja roottorivaurioiden yli 5 % [Singh et al. 2003]. Ulkoisia vikalähteitä ovat mm. transientit jänniteheilahtelut ja -häiriöt, ympäristön epä-

suotuisa lämpötila, kosteus ja puhtaustaso sekä mekaaniset vikälähteet ylikuorma, sykkivä kuormitus ja väärä asennus. Servomootoreiden ohjauslogiikan ongelmat liittyvät useammin säädön asetusten epäkelpoisuuteen kuin varsinaisen ohjauslogiikan vikaantumiseen.

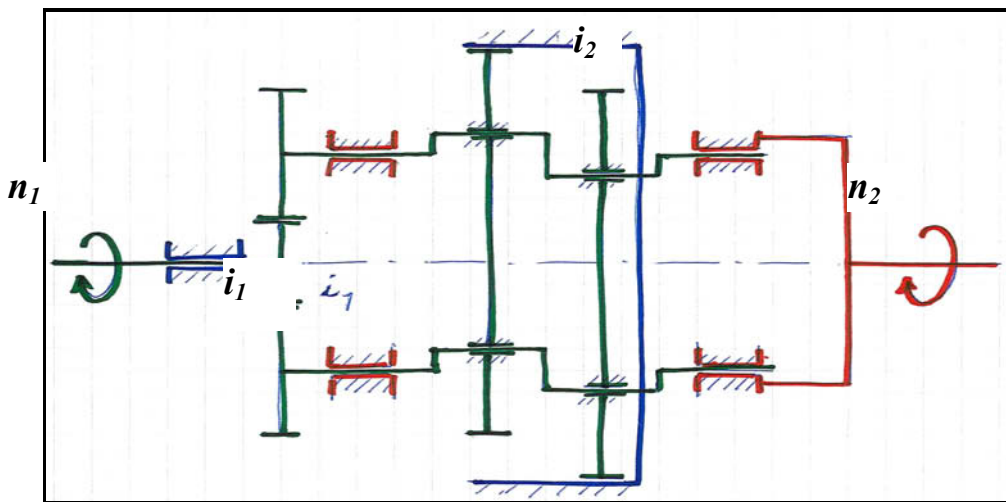
Sähkömootoreiden moottorivaurioihin liittyviä dynaamisia ilmiöitä ja vikoja voidaan suurelta osin monitoroida sekä sähköisin että värähtelyteknisin mittauksin. Lähteessä Halme et al. [2005] on koottu yhteen joukko erilaisia servomootorin vikaantumislähteitä sekä näille soveltuvia havainnointimenetelmiä. Laakerivaurioiden osalta soveliaimpia monitorointimenetelmiä ovat värähtelymittaukset sekä tarvittaessa myös laakerin voitelurasvan öljyanalyysit. Sähkömootoreiden mittauspohjaisessa monitoroinnissa ja diagnostiikassa tarvitaan hyvää taajuusresoluutiota silloin, kun halutaan seurata roottoriin liittyviä vikoja tai vikaantumista, kuten roottorin epäkeskisyyttä ja roottorisauvojen kuntoa. Näissä vikatyypeissä värähtelyspektrissä voi näkyä sivunauhoja, joiden taajuus on moottorin synkronisen ja todellisen pyörimisnopeuden välinen erotus. Erotusta kutsutaan moottorin jättämäksi. Tyypillisesti jättämän taajuus on vain muutama hertsi. Riittävän resoluution varmistamiseksi spektri voidaan tarvittaessa kohdentaa zoomaamalla tietylle kapealle taajuuskaistalle. Tämä edellyttää, että kyseinen ominaisuus on käytössä käytettävässä mittausjärjestelmässä. Lisäksi kaikki taajuustasossa tapahtuvien ilmiöiden seuranta ja niistä tehtävät päättelyt edellyttävät mitattavan kohteen pyörimistaajuuden mittaamista ja seuranta. Tämä koskee niin itse servomootoria kuin sen mekaanisia oheislaitteita, esimerkiksi vaihteita, tuulettimia jne. Mahdolliset eri mittausten väliset vertailut tulee liipaista yhtäläisistä tilanteista, joissa sekä pyörimisnopeus, kuorma että työkierto ovat kaikki samassa vaiheessa.

Vaihteet

Robotissa on servomootoreiden ja käytettävien päänivelten välissä mekaaniset alennusvaihteet. Vaihteita käytetään muuttamaan moottorin pyörimisnopeus optimaaliseksi nivelnopeudeksi. Robotin nivelessä J3 käytetty planeettavaihte koostuu useista toisiinsa nähden rinnakkaisesti ja sisäkkäisesti pyörivistä rattaista (Kuva 4 ja Kuva 5). Ensimmäisellä välitysportaalla i_1 välityssuhde on 4 ja toisella, kampiakselin muodostamalla välitysportaalla i_2 välityssuhde on 40. Vaihteen kokonaisvälityssuhde (n_1/n_2) on 160.

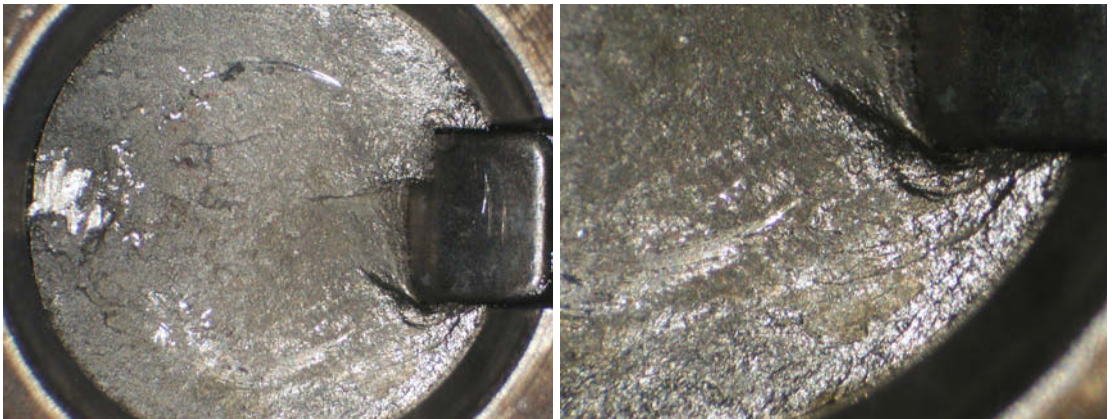


Kuva 4. Robotin nivelessä J3 käytetty planeettavaihte. Ylhäällä vasemmalla planeettavaihte ja ensiöpuolen sisäpuolinen keskuspyörä (n_1), oikealla sisäpuolinen keskuspyörä ja ensimmäisen portaan planeettarattaat on purettu. Alhaalla vasemmalla vaihteen toisen portaan planeettapyörät ja ulkopuolinen, sisähammastettu keskuspyörä. Oikealla planeettapyöriä kampeava akseli.



Kuva 5. Nivelessä J3 käytetyn planeettavaihteen skemaattinen rakenne. Kuvassa näkyy kampiakselin toiminta.

Planeettavaihteissa käytettävien hammaspyörien, akseleiden ja laakerointien mahdolliset perusvikaantumismekanismit ovat samankaltaisia muiden hammaspyörävaihteiden kanssa. Hammasvaihdetyypeistä riippumatta teho vaihteen läpi välitetään hammaspyöräkontaktien ja hammasrynnön kautta ensioakselilta vaihteelta lähtevälle toisioakselille. Hampaat kuluvat ja väsyvät vaihteella vallitsevan tilanteen ja kuormituksen mukaisesti. Vaihteiston vikojen kehitykseen vaikuttavat oleellisesti kuormitustekijät. Tyypillisesti vika kehittyy vähitellen paikallisesta viasta koko hammaspyörästä koskevaksi. Äärimmäisessä tapauksessa hammaspyörät tai käyttävä akseli saattavat murtua (kuva 6). Hammaspyörästä voi myös vioittua esimerkiksi valmistuksen, kuljetuksen tai asennuksen aikana tapahtuneiden käsittely- ja toimintavirheiden vuoksi. Hammaspyörän vauriotyypit ja suhteelliset osuudet on esitetty taulukossa 2 [Kleemola 2002].



Kuva 6. Katkenneen aurinkopyörän akselin murtumapinta. Akseli on murtunut törmäyksestä syntyneen ylikuormituksen seurauksena.

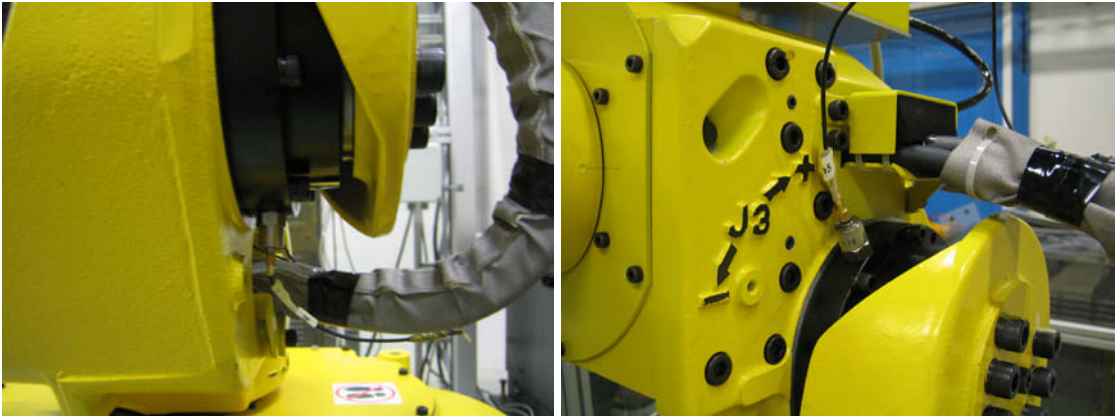
Taulukko 2. Hammaspyörän vauriotyypit [Kleemola 2002].

VAURIOITYYPIT:	Osuus [%]
Väsymismurtuma	36,8
Ylikuormitusmurtuma	20,1
Hampaan pinnan kuoppautuminen ja/tai kuoriutuminen	19,7
Abrasiiviinen kuluminen	10,3
Plastinen virtaus	5,3
Hampaan lohkeaminen	4,3
Adheesiokuluminen	2,9
Muut vauriotyypit	0,6
Yhteensä	100

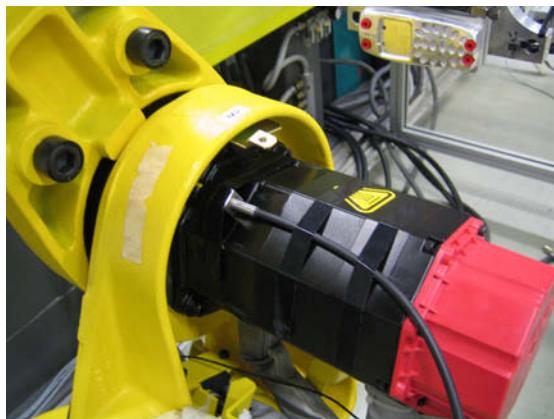
Planeettavaihteiden värähtelydynamiikka on haasteellista, sillä hammaspyöräryhmistä tulevien ryntöiskujen herättämät vasteet ovat monimutkaisemmin hallittavissa kuin tavallisissa vaihteissa. Planeettavaihteiden vikojen ja vaurioiden havainnoinnissa tarvitaan yleensä kehittyneempiä menetelmiä kuin perinteisissä hammasvaihteissa, vaikkakin vikamuodot ovat pääsääntöisesti samankaltaisia ja yhtäläisiä. Tyypillisesti planeettavaihteiden luotettava havainnointi edellyttää eri elementeistä ja lähteistä tulevien värähtelyherätekomponenttien erottelua ja luokittelua sekä mahdollisesti näiden piirteiden mallinnusta tai tarkkaa taajuussuodatusta. Yhteisenä piirteenä kaikilla analysointimenetelmillä on se, että vaihteen pyörimisnopeus on vakio tai analysoitavat mittaukset on liipaistu yhtäläisellä ja hallitulla ehdolla (esim. määritelty pyörimisnopeus- ja kuorma-ehdo). Tällöin mittaustilanne on yhtäläinen ja järkevä vikatilanneanalysoinnin kannalta.

4. Instrumentointi ja mittaukset

Foxconnilla tuotantokäytössä oleva teollisuusrobotti instrumentoitiin värähtelykiihtyvyy-, akustisen emission ja äänimittauksiin soveltuvaksi. Mittauskohteiksi valittiin robotin nivelten J2 ja J3 yhteydessä olevat moottorit ja vaihteet. Niveliin J2 ja J3 kiinnitettiin nivelmoottoreiden vastakkaiselle puolelle radiaalisuuntaan mittaavat kiihtyvyyssanturit (kuva 7). Akustisen emission anturi kiinnitettiin nivelen J2 moottorille (kuva 8). Äänitasot mitattiin laajakaistaisella mikrofoniin tuotantosolun sisältä noin yhden metrin etäisyydeltä robotin kiinnityspisteestä.



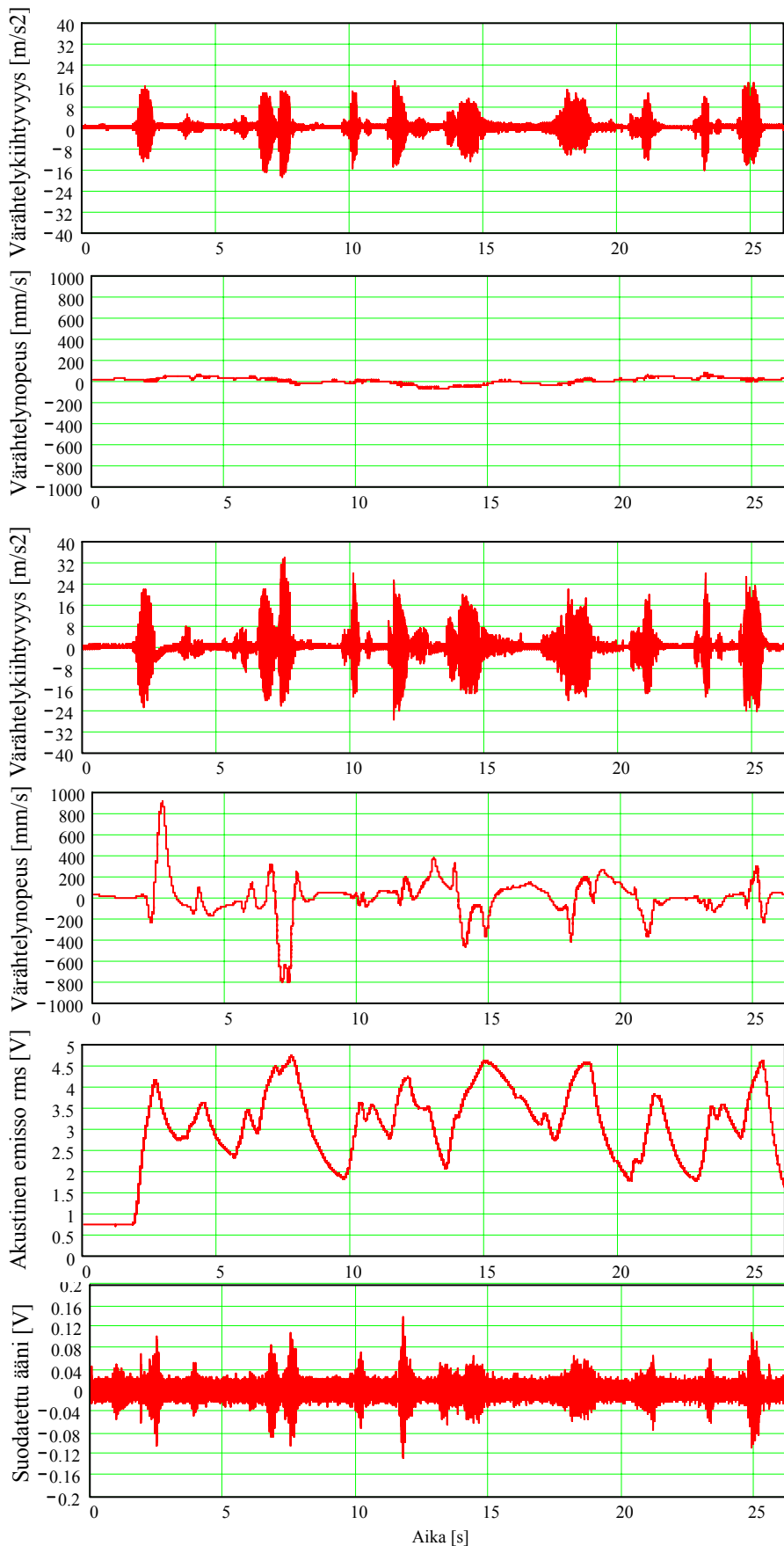
Kuva 7. Kiihtyvyyssanturi nivelissä J2 (vasen kuva) ja J3 (oikeanpuoleinen kuva).



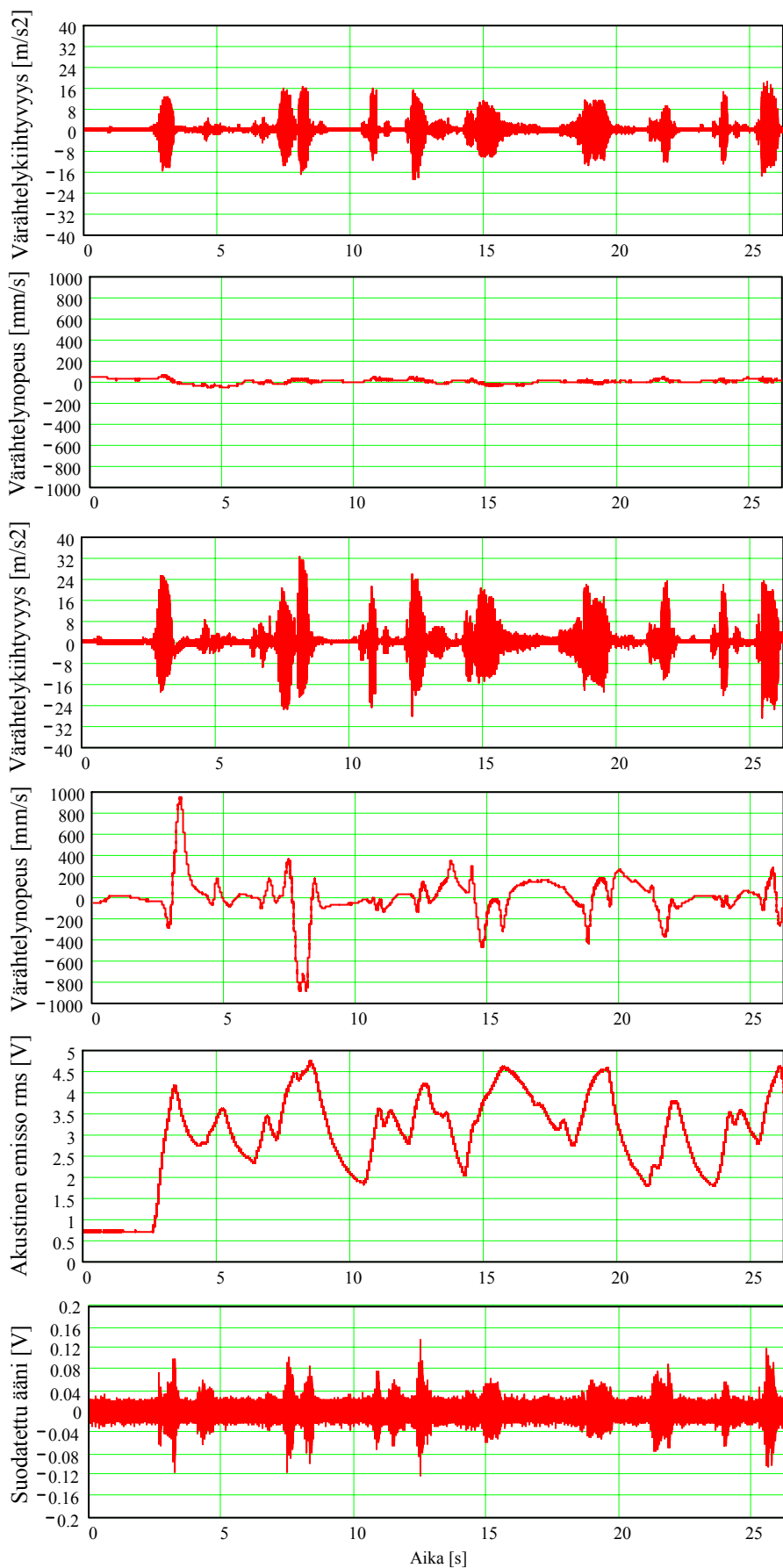
Kuva 8. Akustisen emission anturi nivelmoottorilla J2.

Pyörimis- ja liikenopeudet eivät säily vakioina; samoin kuorman asema tukipisteeseen nähden muuttuu. Mitään yhtäjaksoista tilaa, jossa kuormitukset ja nopeudet olisivat vakioita, ei ole. Vasteiden sekvenssisyys näkyy kaikista mitatuista vasteista (kuva 9 ja kuva 10). Värähtelykiihtyvyyssmittauksissa pisteiden J2 ja J3 välillä näkyy poikkeama kiihtyvyytasoissa, mikä johtuu pisteessä J3 vaikuttavasta suuremmasta ratanopeudesta. Ratanopeuksien erilaisuus näkyy selkeästi kiihtyvyyssignaaleista integroiduissa nopeusvasteissa.

Kuvissa 9 ja 10 esitetyt mittaustulokset on mitattu samasta prosessista mutta eri työkiertoista. Mittausten välillinen aikaero oli pieni, ja robotin tila luontaista hajontaa lukuun ottamatta vakio. Kuvista 9 ja 10 näkyy, että pientä mittausten väliseen liipaisuun liittyvää ja robotin säätöön liittyviä poikkeamia lukuun ottamatta eri mittauskertojen väliset vasteet ovat lähes samankaltaisia. Värähtelynopeudet on laskettu integroimalla värähtelykiihtyvyyssignaalit kerran aikatasossa, ja ne kuvaavat robotin liikenopeutta mittaussuunnassa. Nivelessä J2 ollut anturi oli poikittain nivelen J1 liikesuuntaan nähden, ja J3:n anturin mittaussuunta yhtyi nivelen J2 liikesuuntaan.



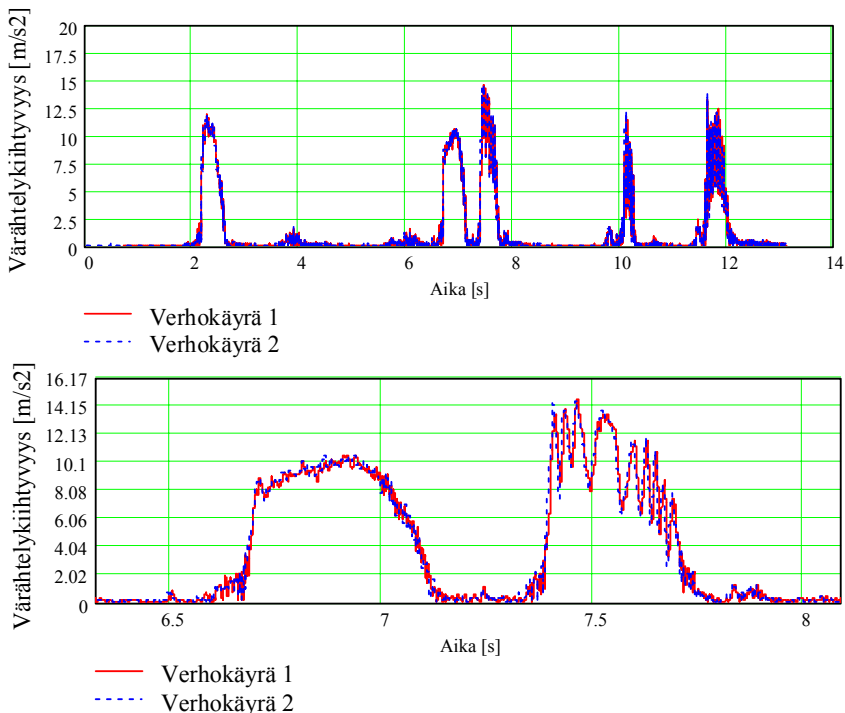
Kuva 9. Mittausvasteet ylhäältä alaspäin ensimmäisessä tarkastellussa työkierrossa. Värähtelykiihtyvyys pisteessä J2, liikenopeus pisteessä J2, värähtelykiihtyvyys pisteessä J3, liikenopeus pisteessä J3, akustisen emission tehollisarvo pisteessä J2 ja kaistanpäästösuodatettu (1 000–5 000 Hz) äänitaso robotilla.



Kuva 10. Mittausvasteet ylhäältä alaspäin toisessa tarkastellussa työkierrossa. Värähtelykiihtyvyyys pisteessä J2, liikenopeus pisteessä J2, värähtelykiihtyvyyys pisteessä J3, liikenopeus pisteessä J3, akustisen emission tehollisarvo pisteessä J2 ja kaistanpäästösuodatettu (1 000–5 000 Hz) äänitaso robotilla.

Työkierron asemointiin ja tarkkuuteen vaikuttavien muutosten monitorointi

Tyypillisesti selektiiviset, eri herätelähteet toisistaan erottelevat värähtelydiagnostiikassa käytetyt menetelmät edellyttävät, että vertailtavat mittaukset on näytetty yhtäläisistä kuormitus- ja nopeusolosuhteista. Tämä on selvästi haasteellista robotiikassa. Yksi mahdollisuus toteuttaa poikkeamatilanteiden tunnistus jatkuvassa tuotantokäytössä olevalla robotilla on valittujen vasteiden vertaaminen samasta prosessista mutta eri aikoina mitattujen vasteiden kanssa. Tällöin tulee huolehtia, että vertailtavat signaalit on liipaistu samasta vaiheesta esimerkiksi normaalitilanteesta mitatun referenssisignaalin kanssa. Tarvittaessa ristikorrelaatioita voidaan käyttää apuna signaalien asemoinnissa. Asemoitujen, vakiopituisten mitattujen ja referenssisignaalien tai niiden sopivalla taajuusikkunalla suodatettujen verhoikäyrien välisiä muutoksia ja riippuvuuksia voidaan seurata. Kuvassa 11 on esitetty kuvissa 9 ja 10 esitettyjen J3-pisteen värähtelykiihtyvyyksien verhoikäyrät. Koska tilanne oli eri mittausten välillä samanlainen, kuvasta 11 näkyy robotin työkiertoon liittyvä normaali hajonta. Tilanteessa, jossa robotin tuoteperhe ja työsekvenssi vaihtuu usein, vertaaminen referenssisignaaleihin ei ole aina suoraan mahdollista. Tällöin robotilla voidaan ajaa määrävälein vakioliikesarja, jota ajamalla ja johon vertaamalla voidaan robotissa tapahtuvat muutokset myös havainnoida. Muutosseuranta voidaan parametrizoida laskemalla joko vaiheittaisesti tai koko signaalille esimerkiksi residuaalien neliösummien aikariippuva trendikäyrä. Laskettujen normaalihajonnasta poikkeavien muutosten avulla voidaan tunnistaa sekä prosessissa että robotin asemointiin ja ajoitukseen vaikuttavat mekaaniset ja sähköiset muutokset. Menetelmällä ei voida erotella eikä poimia esiin yksittäisiä vikakomponentteja. Tähän tarvitaan erillinen analyysi tai testaus.

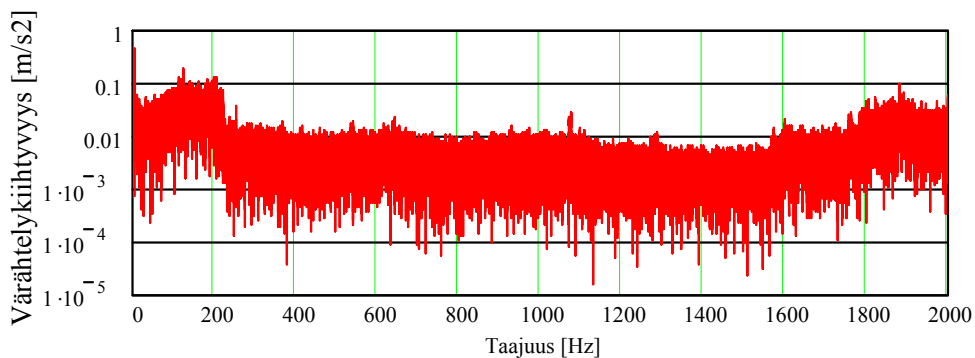


Kuva 11. Pisteestä J3 mitatuista värähtelykiihtyvyyksistä lasketut verhoikäyrät taajuusalueella 100–300 Hz. Ylhäällä aikajakso 0–14 sekuntia ja alla zoomattu aikajakso 6,3–8,1 sekuntia.

Kunnonvalvonta-analyysit

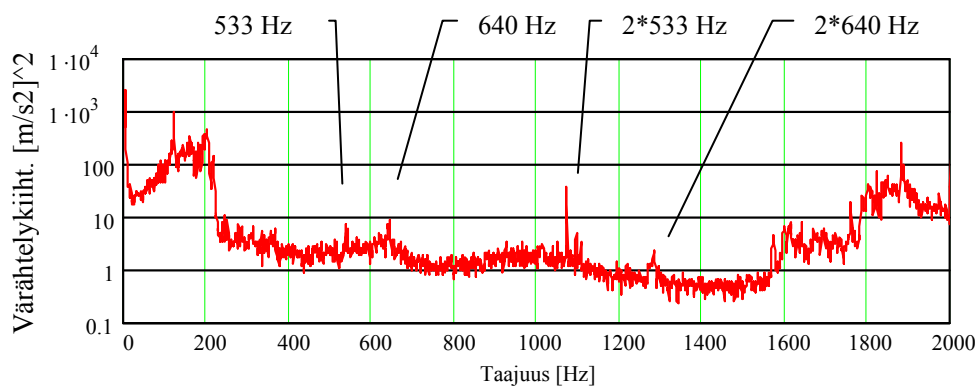
Kriittisimpien komponenttien tarkennettuun seurantaan (esimerkiksi vaihteet ja moottorit) voidaan suunnitella erillinen aika-ajoin ajettava instrumentoitu testiajo, jossa yhdellä kriittisimpiin komponentteihin liittyvällä nivelellä kerrallaan suoritetaan nivelliike toisesta ääripäästä toiseen ääripäähän. Tällöin kuormitus voidaan pitää testin aikana vakiona tai tunnettuna ja haluttaessa myös nopeus voidaan lähtöä ja pysähdystä lukuun ottamatta pitää vakiona tai tunnettuna. Tämä helpottaisi kriittiseksi arvioitujen eri herätetaajuuksien ja -vasteiden tunnistamista sekä niiden vaikuttavuuden seurantaa ja muutosten arviointia.

Robotin toiminnan kannalta kriittiseksi arvioidun vaihteen ja sen toiminnan suora, normaalissa tuotantokäytössä suoritettava kunnonvalvonta on luonnollisesti edellä esitettyistä syistä johtuen haasteellista. Robotin liikkeet häiritsevät dynaamista analyysia, samoin pyörimisnopeuden ja kuormituksen jatkuva muutos. Akselilla J3 olevan planeettavaihteen toisiopuolen suurin sallittu pyörimisnopeus on kyseiselle robottityypille sallitun ja määritetyn maksiminopeuden mukaan $1/3$ Hz. Vaihteen välityssuhteesta (160) ja toisiopuolen maksiminopeudesta voidaan laskea ensiöpuolen (eli moottorin) maksimi pyörimisnopeus, joka on 53,3 Hz. Maksiminopeuksilla vaihteen ryntötaajuudet ovat ensiöpuolella 640 Hz (moottorin akselin ryntötaajuus) ja toisiopuolella 533 Hz (planeettavaihteen ulkokehän ryntötaajuus). Taajuustason analyyseissa mitatuista signaaleista voidaan erottaa eri taajuuskomponentit ja kohdentaa tarkastelu halutuille kaistoille. Taajuustason analyysit perustuvat yleisemmin FFT-muunnokseen ja siitä muodostettuun spektriin. Analyysin kannalta on edullista, jos signaalit ovat stationäärisiä. Kuvassa 12 on esitetty nivelen J3 robotin yhden työkierron aikana mitatun värähtelykiihtyvyyssignaalin spektri. Taajuuksien painotukset riippuvat työkierron aikana eriaikaisesti vaikuttavista pyörimisnopeudesta riippuvista herätetaajuuksista, kuormituksista ja näiden keskinäisistä vuorovaikutuksista sekä myös rakenteen ominaistajuuksista. Huomioitavaa on, että yhden sekvenssin aikana pyörimisnopeudet vaihtuvat nivelkohtaisesti yhden tai useamman kerran nolasta nivelen maksimiin. Taajuudet, jotka ovat pitkäkestoisimpia ja joiden aikana vaikuttavat suurimmat kuormitukset, näkyvät spektrissä selkeimmin. Alle 210 Hz:n taajuudet ovat nyt selkeimmin edustettuina, ja on oletettavaa, että niihin vaikuttaa robotin alempitaajuuksien liikkeiden lisäksi yhden työsekvenssin aikana jokin otollinen herättevastepari. Vaihteen J3 ryntötaajuuksista johtuvia nämä taajuudet eivät todennäköisesti ole. Esitetystä spektristä robotin nivelen J3 ryntötaajuuksia on vaikea erottaa.



Kuva 12. Yhden työkierron aikana mitatun nivelen J3 värähtelykiihtyvyyden spektri.

Tarvittaessa purskemaisuuksia, eri taajuuskomponentteja sisältävästä yhdestä mittaus-signaalista voidaan laskea paloittain keskiarvoistettu spektri. Keskiarvoistuksen avulla stokastisen kohinan vaikutusta voidaan pienentää. Kuvassa 13 on esitetty robotin nivel-
 lelle J3 lasketun värähtelykiihtyvyyssignaalin paloittain keskiarvoistettu spektri. Kes-
 kiarvoistamalla alemman taajuuden ilmiöiden lisäksi robotin maksimipyörimisnopeu-
 della vaikuttavat planeettavaihteen ryntötaajuudet ja niiden monikerrat saadaan näky-
 viin. Vaihteen kunnan kannalta seurattavia suureita ovat erityisesti suhteelliset energia-
 muutokset ryntö- ja omaistaajuuden sivunauhoilla [Randall 2004]. Sivunauhat esiintyvät
 akseleiden pyörimistaajuuksilla. Lisäksi energiamäärät ryntötaajuuksien harmonisilla
 komponenteilla voivat muuttua. On kuitenkin huomioitava, että ehjälläkin vaihteella
 näkyvät vaihteen ryntötaajuudet ja niiden harmoniset komponentit sekä usein myös
 esimerkiksi akseleiden pienistä epäkeskisyyksistä moduloituneet sivunauhat.



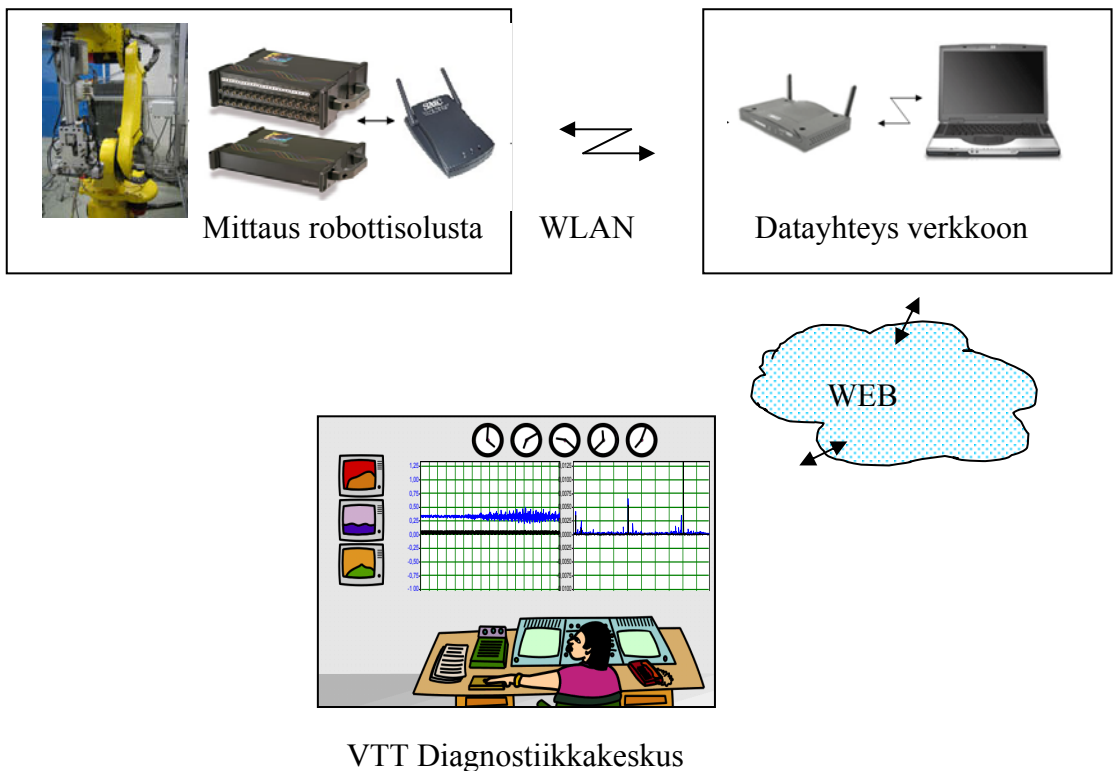
Kuva 13. Yhden työkierron aikana mitatun nivelen J3 värähtelykiihtyvyyden paloittain keskiarvoistettu spektri (50 näytettä, 50 % limittäisyys).

Esitettyjen mittausvasteanalyysien lisäksi robotin kuntoa voidaan seurata analysoimalla robotin niveliltä kerättyjä rasvanäytteitä. Yleisesti ottaen soveltuvia rasva-analyysimenetelmiä ovat mm. ferrografia-analyysit, hiukkaslaskenta ja rasvan värimää-
 ritykset. Yhdessä muiden menetelmien tai toteutuneiden käyttötuntien kanssa voidaan
 luotettavammin arvioida monitoroitavan robotin käyttökuntoa ja siinä tapahtuvia muu-

toksia sekä kehittää menetelmiä vikaantumisen ennakointiin tai vikaantumisen kannalta kohonneen riskitason indikointiin.

5. Etämittauskonsepti

Robotissa tapahtuvien muutosten valvontaan voidaan soveltaa ratkaisuja, joissa monitorointi tapahtuu etäällä varsinaisesta kohteesta. Valvottava robotti instrumentoidaan normaalisti valvottavalle kohteelle soveliaain anturein ja mittausmenetelmin. Kytkemällä mittaussignaalit erilliselle tiedonkeruulaitteelle, jossa on verkkovalmius, signaalit voidaan välittää verkon kautta etämonitorointipisteeseen, jossa tehtävillä tarkentavilla analyyseilla voidaan havaita itse muutostilanne sekä tehdä tarkentavia lisäanalyyseja ja päätelmiä (kuva 12). Ratkaisu on kustannustehokas, sillä analyysi voidaan tehdä siellä, missä varsinaiset mittausasiantuntijat sekä soveliaimmat signaalisanalysointiresurssit kulloinkin ovat. Samalla voidaan pienentää analyysiin liittyviä epävarmuustekijöitä sekä saada merkittäviä säästöjä nopeammalla asiantuntijareagoinnilla. Esiitetty etämonitorointiratkaisu on testattu Foxconnilla olevalla robotilla.



Kuva 14. Etämonitorointikonsepti, jossa robotin vasteet monitoroidaan etäältä.

6. Yhteenveto

Robotin kustannusteknisesti kriittisimmät komponentit ovat robotin servomoottorit ja vaihteet. Vaurion tapahtuessa näiden korjaus- ja huoltoajat saattavat olla huomattavan pitkiä. Robotilla pyörimis- ja liikenopeuden eivät säily vakioina; samoin kuorman asema tukipisteeseen nähden muuttuu. Yksi mahdollisuus toteuttaa poikkeamatilanteiden tunnistus tuotantokäytössä olevalla robotilla on valittujen vasteiden vertaaminen samasta prosessista tai erillisestä vakioliikesarjasta eri aikoina mitattujen vasteiden kanssa. Seurattavana suureena voi olla signaalipoikkeaminen neliösumma. Menetelmällä ei voida erotella yksittäisiä vikakomponentteja. Tarkennettuun kriittisimpien komponenttien seurantaan voidaan suunnitella testiajo, jossa kuormitus ja haluttaessa myös nopeus pidetään testin aikana vakiona. Etämonitoroinnin avulla robotin kuntoa voidaan seurata siellä, missä siihen on kustannusteknisesti parhaat analyysiresurssit käytössä.

Lähteet

Fanuc I. Cost effective robot for ARC welding and handling applications. Esite 2005.

Fanuc II. Handling intelligent robot. Esite 2005.

Fanuc III. High speed, high precision and high efficiency nano control servo. Esite 2005.

Halme, J. 2005. AC-servomoottori – rakenne, vikaantumisen ja havainnointimenetelmät. Espoo, VTT Tuotteet ja tuotanto. 32 s. BTUO43-051348.

Kleemola, J. 2002. Hammasvaihteen vikadiagnostiikka värähtelymittauksien ja neuro-laskennan avulla. Diplomityö, 56 s.

Randall, R.B. 2004. State of the art in monitoring rotating machinery – part 1. Journal S.V. Sound and vibration, Vol. 38, Issue 3, s. 14–20. ISSN 0038-1810.

Singh, G., Kazzaz, A. 2003. Introduction machine drive condition monitoring and diagnostic research – a survey. Electric Power Systems Research 64 (2003). Elsevier, s. 145–158.

Prognostiikkatulosten 3D-visualisointijärjestelmä

Jukka Rönkkö, Veli-Matti Hagberg, Paula Järvinen, Jussi Markkanen,
Markus Ylikerälä
VTT Tietotekniikka
Espoo

Tiivistelmä

Prognostiikkajärjestelmän tulosten, laitosmallin visualisoinnin ja huolto-ohjeiden esittäminen tarjoaa uuden sovellusmahdollisuuden kolmiulotteisille (3D) käyttöliittymäteknikoille [1]. Esittelemme 3D-käyttöliittymätoteutuksen, joka tarjoaa käyttäjälle havainnollisen kuvan vikaantuvien toimilaitteiden sijainnista laitoksessa, sekä olennaisen vikaantumisinformaation. Käyttöliittymä tarjoaa eri näkymiä laitosmalliin kokonaiskuvan ja eri yksityiskohtien hahmottamiseksi sekä mahdollisuuden liikkua mallissa ja valita tarkemmin vikaantuneet tai vikaantuvat kohteet tarkastelun alle. Lisäksi käyttäjällä on pääsy huoltotietokantaan, jossa annetaan lisätietoa vikaantuneen tai vikaantuvan kohteen huollosta. Käyttöliittymätoteutusta sovelletaan projektin aikana kahteen case-tapaukseen: Pyhäsalmen kaivoksessa toimiviin lastauskoneisiin sekä Rautaruukin panostusnosturiin.

1. Johdanto

Ideaalitapauksessa prognostiikkajärjestelmä tuottaa tietoja laitoksissa toimilaitteiden jokapäiväisille käyttäjille siten, että he pystyvät tekemään huoltoon liittyviä päätelmiä mahdollisimman suoraviivaisesti. Nämä loppukäyttäjät harvoin tarvitsevat yksityiskohtaisempaa tietoa itse analyysistä. Tärkeintä on, että analyysin lopputulokset pystytään esittämään havainnollisella tavalla käyttäjille, jotta vikaantuva kohde ja sen sijainti selviävät yksikäsitteisesti. 3D-käyttöliittymä laitosmalliin tarjoaa oikein toteutettuna tällaisen mahdollisuuden.

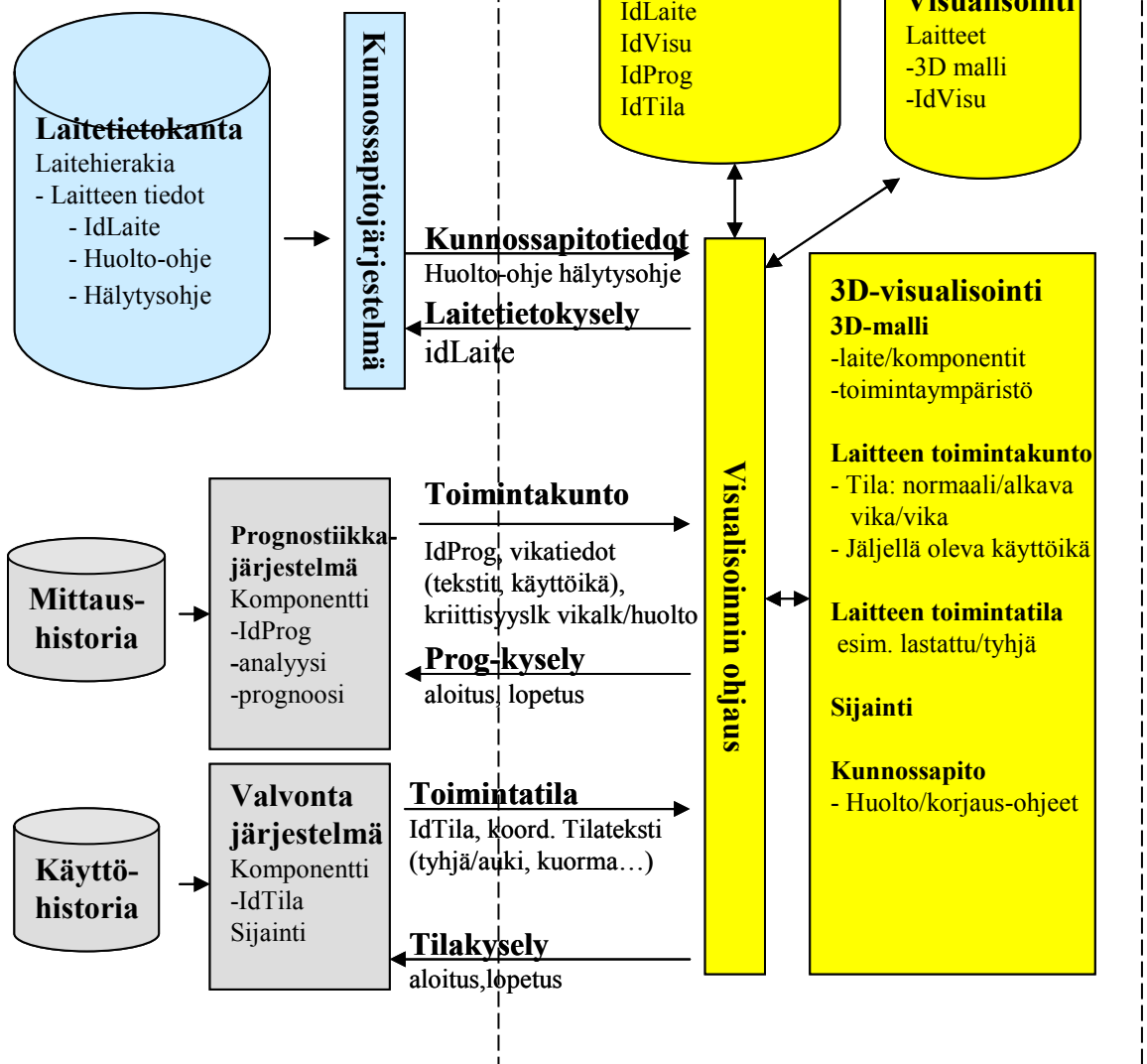
3D-käyttöliittymän on tarjottava tietyt peruspalvelut [2], joita ovat tässä tapauksessa laitoksen ja toimilaitteiden 3D-mallien esittäminen käyttäjälle, navigointi mallissa, eritasoiset näkymät malliin ja vikatiетоjen sekä huolto-ohjeiden esittäminen valitusta vikatapah- tumasta. Lisäksi liikkuvien toimilaitteiden paikkatiedon tuominen 3D-malliin havainnol- listaa vallitsevaa tilannetta laitoksessa. Toimilaitteiden paikkatieto ei ole prognostiikka- analyysia tekevän järjestelmän tuottamaa, vaan suurempaa laitetietoa, jota voidaan saada esim. laitteiden etäohjausjärjestelmiin liittymällä.

Tässä artikkelissa esitämme kuvauksen yhdestä mahdollisesta toteutustavasta prognostiikkajärjestelmän 3D-käyttöliittymälle. Kyseisen arkkitehtuurin mukainen ja kuvatut toiminnot sisältävä järjestelmä toteutetaan Prognos – teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka -projektissa ja sitä sovelletaan Rautaruukin panostusnosturiin sekä Pyhäsalmen kaivoksen lastauskone-caseihin projektin aikana.

2. Prognostiikkasysteemin arkkitehtuuri

Prognostiikkasysteemin arkkitehtuurin on tarjottava selkeästi määritellyt rajapinnat visualisoinnin ja prognostiikkaohjelmistototeutuksen sekä reaaliaikaisemman paikkatiedon välille. Esitämme seuraavassa modulaarisen arkkitehtuurin, joka toteuttaa tämän vaatimuksen. Kuvassa 1 on yleisellä tasolla esitetty koko prognostiikkasysteemin arkkitehtuuri. Systemi koostuu komponenteista, jotka voivat toimia hajautetusti eri tietokoneissa. Itse visualisointijärjestelmä on esitetty katkoviivojen sisällä. Kuvassa esitetty *laitetietokanta* pitää sisällään laitteiden huolto-ohjeet siten, että ne voidaan laitteen tunnisteen perusteella hakea kannasta. *Visualisoinnin ohjaukseen* liittyvä *prognostiikkajärjestelmä* tuottaa analyysimenetelmin prognostiikkatietoa visualisointia varten. *Valvontajärjestelmällä* kuvataan järjestelmää, joka tuottaa toimilaitteiden paikkatietoa visualisoinnille.

Prognostiikan 3D-visualisointi



Kuva 1. Prognostiikkajärjestelmän arkkitehtuuri.

3D-visualisoinnin käynnistyessä visualisoinnin ohjaus lähettää prognostiikka- ja valvontajärjestelmälle sanomat, joilla käynnistetään tiedon välitys. Järjestelmät lähettävät sanomia laitteen kunnosta, huoltotarpeesta, toimintatilasta ja sijainnista aina kun niissä tapahtuu muutoksia. Visualisoinnin ohjaus päivittää käyttöliittymää vastaanottamiensa sanomien perusteella. Vikaantumistilanteissa käyttöliittymään haetaan kunnossapitojärjestelmästä tilanteeseen liittyvä ohjeistus. Valvontajärjestelmä päivittää toimilaitteiden paikkatietoa kulloistakin tilannetta vastaavaksi. Visualisoinnin ohjaus vastaanottaa toimilaitteiden paikkatietosanomaa ja siirtää toimilaitteita 3D-laitosmallissa vastaavasti.

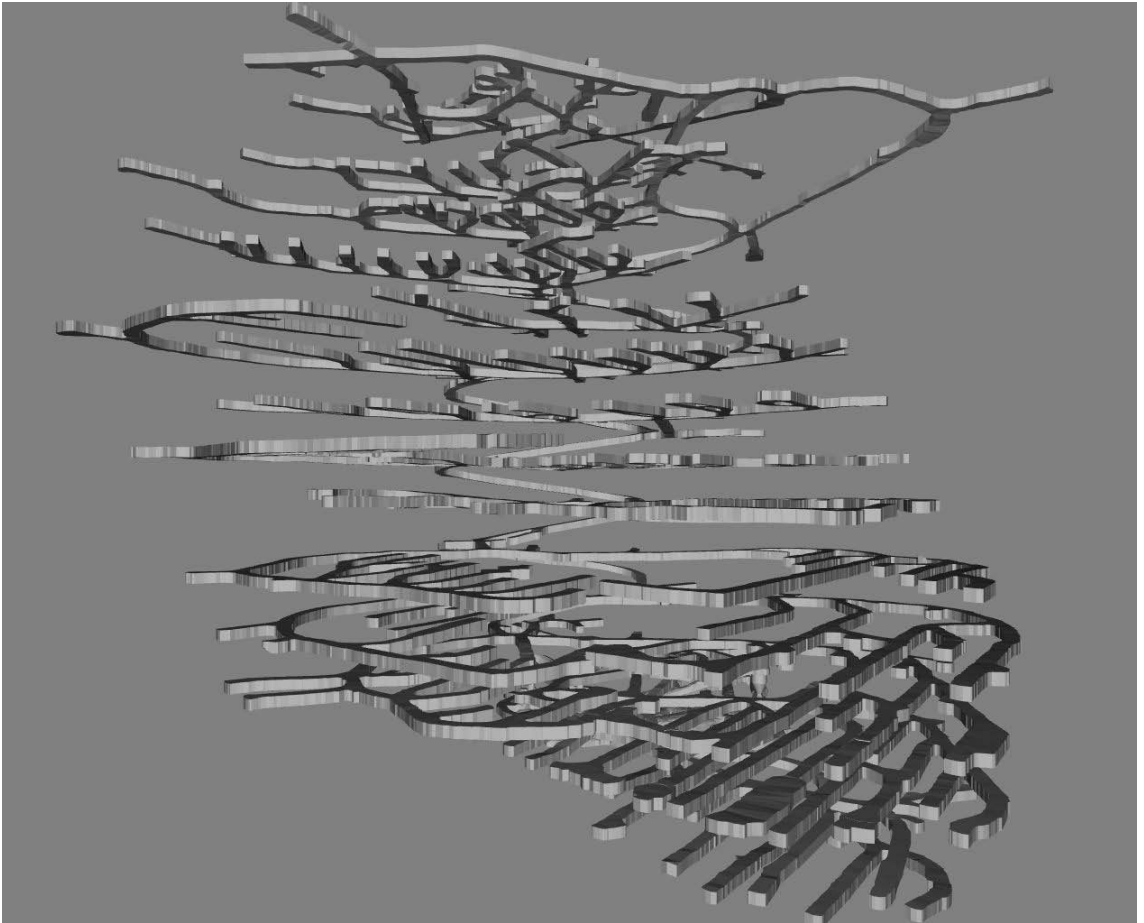
Prognostiikkajärjestelmän lähettämät tiedot ja sen tekemä analyysi perustuvat mittaus-historiatietokantaan, joka sisältää laitteiden mittaustiedot. Valvontajärjestelmän lähettämät tiedot perustuvat käyttöhistoriatietokantaan tai kytkentään laiteohjausjärjestelmään. Käyttö- ja huolto-ohjeet on varastoitu laitetietokantaan. Koska jokaisessa tietokannassa laitteet on identifioitu omien tunnusten avulla, tarvitaan tunnusten vastaavuus-taulukko, id-vastaavuudet. Visualisointiin liittyvät 3D-mallit on varastoitu omaan visu-alisointitietokantaan.

3. Visualisointijärjestelmän toiminnot

Alkutilanteessa näytetään käyttäjälle laitteen ja toimintaympäristön 3D-malli. Laite on oletustilassa ja -sijainnissa. Aloituksen jälkeen 3D-visualisointia päivitetään toiminta-kuntosanomien (prognostiikkajärjestelmä) ja toimintatilasanomien (valvontajärjestelmä) perusteella. *Toimintakuntosanomien* perusteella havainnollistetaan vikaantumistilan ja huoltotarpeen muutos. Visualisointitapa riippuu komponentin kriittisyydestä ja vikaan-tumisasteesta. Värikoodaus kertoo tilanteen kriittisyyden asteen. *Toimintatilasanomien* perusteella päivitetään laitteen sijainti ja komponenttien toimintatilat.

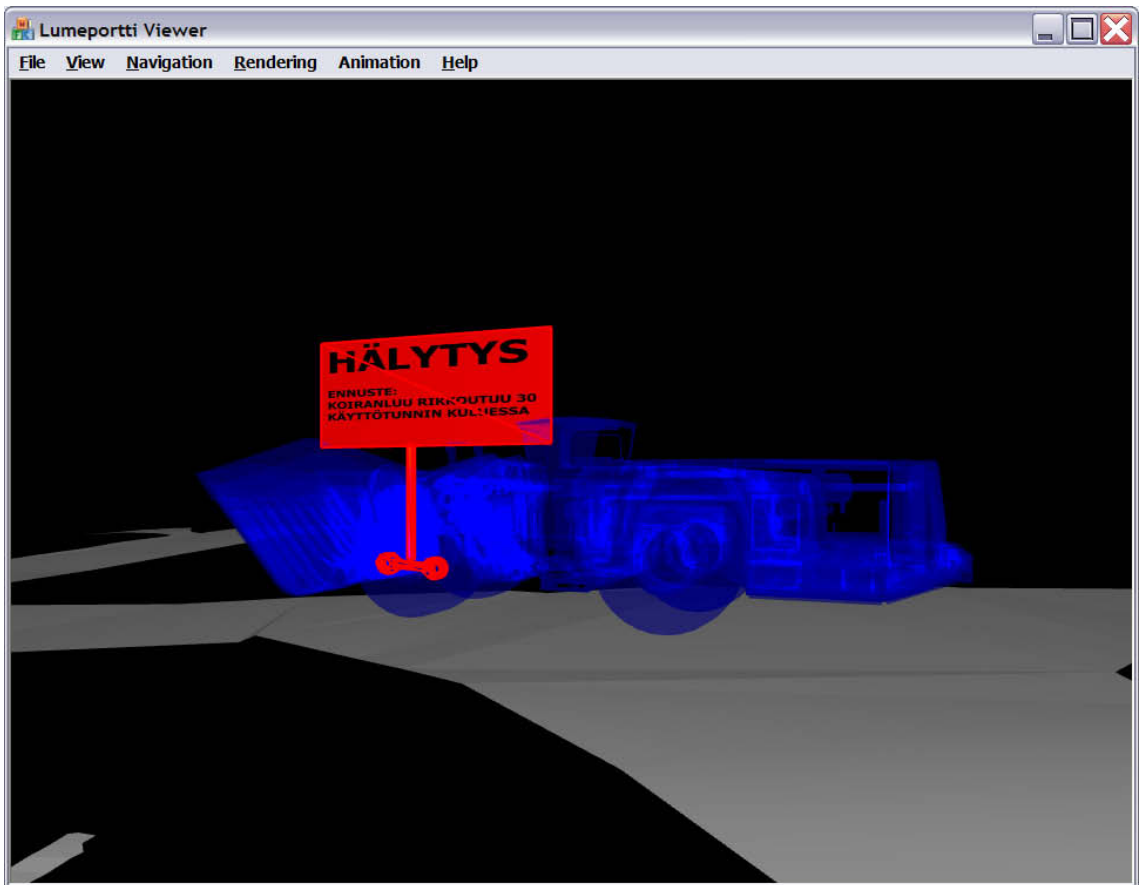
Käyttäjä voi valita yksityiskohdiltaan eritasoisia näkymiä visualisoinnista: *yleisnäky-män, laitenäkymän tai komponenttinäkymän*. Näkymissä havainnollistetaan laitteiden vikaantumista ja huoltotarvetta. Käyttäjä voi siirtyä vikaantuneen tai vikaantuvan toimi-laitteen tai sen osan suhteen yksityiskohtaisempaan esitykseen valikon avulla.

Yleisnäky-mässä käyttäjälle (ks. kuva 2) muodostuu yleiskuva tuotantolaitoksen raken-teesta ja toimilaitteiden paikoista tuotantolaitoksessa. Vikaantuminen kerrotaan väri-koodistolla: jos vika on vakava ja jo tapahtunut, koko laite on punainen, jos laite vikaan-tuu lähiaikoina, laite on oranssi, jos vikaantuminen tapahtuu myöhemmin, laite on kel-tainen. Dynaamiseen valikkoon tulee vikaantuneiden ja vikaantuvien toimilaitteiden nimet. Kuvassa 2 on esimerkki yleisnäky-mästä: Pyhäsalmen kaivoksen tunneliverkosto kokonaisuudessaan.



Kuva 2. Yleisnäky, Pyhäsalmen kaivos.

Laitenäkyssä (ks. kuva 3) vikaantuvaan tai vikaantuneeseen osaan liittyy lippu, joka kertoo vikaantumisen ajankohdan ja osan tekstillä. Kuvassa Pyhäsalmen kaivoksen lastauskone on vikaantumistilanteessa esitetty puoliläpinäkyvänä ja vikaantuva tai vikaantunut osa erikseen huomiovärillä korostettuna.



Kuva 3. Laitenäkymä, Lastauskone, Pyhäsalmen kaivos.

Eri hierarkiatasoilla on visualisoinnissa (yleisnäkymä, laite- tai komponenttinäkymä ja huolto-ohje) mahdollista liikkua kontekstisidonnaisten valikoiden avulla.

Navigointi mallissa on käyttöliittymän kautta mahdollista myös vapaamuotoisesti, esim. avaruushiiren tai näppäimistön ja tavallisen hiiren avulla.

4. Yhteenveto

Hyvin toteutettu laitoksen prognostiikkajärjestelmän 3D-käyttöliittymä tarjoaa käyttäjälle havainnollisen käsityksen laitoksen vikaantumistilanteesta sekä potentiaalisten vikaantuvien toimilaitteiden yksikäsitteisen nopean paikallistamisen. Esitimme 3D-käyttöliittymän tärkeimmät vaatimukset ja toiminnot käyttäjän kannalta sekä yhden mahdollisen toteutustavan 3D-käyttöliittymäksi prognostiikkajärjestelmään. Olennaisena osana toteutusta määrittelimme kolmitasoisien hierarkian visualisoinnin hallitsemiseksi. Hierarkia koostuu yleisnäkymästä, laitenäkymästä ja komponenttinäkymästä. Komponenttitasolla käyttäjä pääsee lisäksi käsiksi huolto-ohjeisiin. Hyvin laadittu 3D-käyttöliittymä voi kompleksisessa ympäristössä toimia eri tietovarantoja yhdistävänä

tekijänä laitoksissa. Uutena ideana esitämme sen soveltamista myös prognostiikkatulosten esittämiseen, jossa se kokoaa prognostiikka-analyysin päätelmätiedon, laitteiden sijaintitiedon ja laitosmallin sekä huolto-ohjetiedon käyttäjän saavutettavaksi yhden käyttöliittymän kautta.

Lähteet

- [1] Kalawsky, R.S. (1993) *The Science of Virtual Reality and Virtual Environments*. Addison-Wesley.
- [2] Bowman D.A. (1999) *Interaction techniques for common tasks in immersive virtual environments*. Doctoral thesis. Georgia Institute of Technology.

Liite 1

Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka -hankkeessa ilmestyneet julkaisut

Seuraavassa on lueteltu hankkeessa ilmestyneet julkaisut tutkimustahoittain ja julkaisu-tyypeittäin lukuun ottamatta projektissa tuotettuja luottamuksellisia ja projektin sisäisiä raportteja.

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Kansainväliset lehtijulkaisut

Ahola, J., Vartiainen, E., Lindh, T. Phase Retrieval from Impedance Amplitude Measurement. Accepted for future publication in the IEEE Power Electronics Letters.

Kansainväliset konferenssit

Ahola, J., Lindh, T., Särkimäki, V., Tiainen, R. Modeling the High Frequency Characteristics of Industrial Low Voltage Distribution Network. Norpie 2004, 12–14 June 2004, Trondheim, Norway.

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.

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.

Rautiainen, 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.

Mäkelä, M., Ratilainen, M., Pyrhönen, O., Haltamo, J., Tarhonen, P. Model Predictive Control Technology in Paper Quality Control: a Case Study of a System Update. Paptac 91st Annual Meeting, Pulp and Paper Technical Association of Canada, Paperweek 2005, 7–10 February 2005, Montreal, Quebec, Canada, B95–B99. ISBN 1-897023-09-X.

Tiainen, R., Särkimäki, V., Lindh, T., Ahola, J. Estimation of the Data Transfer Requirements of Vibration and Temperature Measurements in Induction Motor Condition Monitoring. In the Proceedings of European Conference on Power Electronics and Applications, 12–15.9.2005, Dresden, Germany.

Särkimäki, V., Tiainen, R., Ahola, J., Lindh, T. Wireless technologies in condition monitoring and remote diagnostics of electric drives; requirements and applications. In the Proceedings of European Conference on Power Electronics and Applications, 12–15.9.2005, Dresden, Germany.

Kotimaiset konferenssit ja seminaarit

Särkimäki, V., Ahola, J., Tiainen, R. Lyhyen kantaman radiotekniikat ja niiden soveltaminen teollisuusympäristössä, Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka, vuosiseminaari 1.12.2004, Espoo.

Mäkelä, M. Vaativien säätösovellusten käyttövarmuuden parantaminen. Automaatio 05 Seminaaripäivät 6.–8.9.2005, Helsingin Messukeskus.

Opinnäytteet

Särkimäki, V. Lyhyen kantaman radiolähettimien soveltuvuus sähkökäyttöjen kunnonvalvonnan ja etädiagnostiikan tiedonsiirtotarpeisiin. Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2004.

Ratilainen, M. Paperikoneen laatusäätöjärjestelmän uusinnan vaikutukset laatusäätöjen suorituskykyyn. Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2004.

Tiainen, R. Sähkökoneen etädiagnostiikan kenttätason tiedonsiirtotarpeen arviointi ja instrumentoinnin kehittäminen. Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2004.

Muut opinnäytteet (Erikoistyöt ym.)

Tirronen, T. Profibus-kenttäväyläliittymän integrointi sulautettuun mikrokontrollerijärjestelmään. Elektroniikan erikoistyö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2004.

Ahonen, T. Pienteholähteen suunnittelu langattomille sähkökoneen kunnonvalvontantureille. Elektroniikan erikoistyö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2004.

Kosonen, A. HomePlug-sähköverkkomodeemit ja niiden toiminnan testaus laboratorioympäristössä. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2004.

Oulun yliopisto

Kansainväliset konferenssit

Vähäoja, P., Lahdelma, S., Kuokkanen, T. Condition Monitoring of Gearboxes using Laboratory – Scale Oil Analysis. COMADEM 2004. Cambridge, s. 104–114.

Vähäoja, P., Lahdelma, S., Kuokkanen, T. Experiences in Different Methods for Monitoring the Quality and Composition of Solid Matter in Rolling and Gear Oils. In: Proc. of the 18th Int. Congress of Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (COMADEM 2005), Cranfield, England 31.8.–2.9.05.

Vähäoja, P., Välimäki, I., Heino, K., Perämäki, P., Kuokkanen, T. Determination of Wear Metals in Lubrication Oils; A Comparison Study of ICP-OES and FAAS. Hyväksytty julkaistavaksi Analytical Sciences -lehdessä, artikkeli painossa.

Kotimaiset konferenssit ja seminaarit

Leinonen, J., Lahdelma, S. Nosturin kunnonvalvonta. Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka, vuosiseminaari 1.12.2004, Espoo.

Opinnäytteet

Leinonen, J. Siltanosturin nostokoneiston kunnonvalvonta. Diplomityö, Oulun yliopisto, Konetekniikan osasto, joulukuu 2004, 71 s. + liitteet.

Tampereen teknillinen yliopisto

Kansainväliset lehtijulkaisut

Miettinen, J., Salmenperä, P. Operation Monitoring of Roll Cover by Acoustic Emission. Journal of Acoustic Emission. Vol. 21/January–December 2003. 30 April 2004. ISSN 0730-0050. S. 230–238.

Kansainväliset konferenssit

Miettinen, J. Operation Monitoring of Grease Lubricated Rolling Bearings by Acoustic Emission Measurements. *International Journal of COMADEM*. 7(2) April 2004, s. 2–11.

Järvinen, V. Dynamics of Acceleration Sensors Fixed to Rotating Frame. In the Proceedings of 11th World Congress in Mechanism and Machine Science (IFTOMM), April 1–4, 2004, Tianjin, China. Vol. 5, s. 2129–2133.

Järvinen, V. Correlation between Fixed and Rotating Frame Measurements. To be published in the Proceedings of 17th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (COMADEM), August 23–25, 2004 Cambridge, UK, s. 95–103.

Järvinen, V. Rotating Sensor Response by Means of Traveling Waves. To be published in the Proceedings of IX. International Conference on the Theory of Machines and Mechanisms (ICToMM), August 31–Sept. 2, 2004, Liberec, Czech Republic, s. 391–396.

Kotimaiset konferenssit ja seminaarit

Miettinen, J. Diagnostiikka kunnonvalvonnan tukena. Kunnossapitopäivät, Tampere 28.10.2003. 22 s.

Järvinen, M., Miettinen, J. Taajuusvastefunktioiden hyödyntäminen kunnonvalvonnassa. Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka, vuosiseminaari 1.12.2004, Espoo.

Salmenperä, P., Miettinen, J. Akustisen emission Wavelet-analyysi. Koneensuunnittelun kansallinen symposiumi. 31.5.–1.6. 2005, Oulu.

Opinnäytteet

Hynönen, P. Vierintälaakerien rasvakeskusvoitelu. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2005.

VTT Elektroniikka

Kotimaiset konferenssit ja seminaarit

Keski-Säntti, J. Monilähteisten mittaustietojen yhdistäminen prognooseiksi ja päätöksenteon tueksi. Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka, vuosiseminaari 1.12.2004, Espoo.

Kivikunnas, S., Keski-Säntti, J., Ruuska, J. Standardoinnin tarve ja hyödyt tuotantoprosessien suorituskykyjärjestelmissä. Seminaariesitelmä, AUTOMAATIO 05 Seminaari-päivät 6.–8.9.2005, Helsingin messukeskus. Suomen Automaatioseura ry, s. 329–334.

VTT Tietotekniikka

Kotimaiset konferenssit ja seminaarit

Hagberg, V.-M., Launonen, R., Markkanen, J., Pärnänen, A., Rönkkö, J., Siltanen, P., Ylikerälä, M. Laitoksen tai koneen kolmiulotteinen malli käyttöliittymänä. Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka, vuosiseminaari 1.12.2004, Espoo.

VTT Tuotteet ja tuotanto

Kansainväliset konferenssit

Kunttu, S., Kortelainen, H. Supporting maintenance decisions with expert and event data. Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium 2004. Los Angeles, CA, 26–29 Jan. 2004. IEEE (2004), s. 593–599.

Holmberg, K., Helle, A., Halme, J. Prognostics for Industrial Machinery Availability. Maintenance, Condition Monitoring and Diagnostics – International Seminar. POHTO, Oulu, 28.–29.9.2005.

Kotimaiset lehtijulkaisut

Helle, A. Seisokin välttäminen voi säästää satoja tuhansia euroja päivässä. Kunnossapito 3/2004, s. 37.

Kunttu, S., Tolonen, S., Reunanen, M., Valkokari, P. Kunnossapidon kehityskohteiden tunnistaminen. Kunnossapito 8/2004, s. 20–23.

Parikka, R., Helle, A., Sainio H., Vaajoensuu, E. Vierintälaakerin rasvavoitelutilanteen kokeellinen tutkiminen. Kunnossapito 6/2005, s. 38–41.

Kotimaiset konferenssit ja seminaarit

Helle, A. (toim.). Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka. Espoo, 1.12.2004 (2005), VTT Symposium 236. 117 s. ISBN 951-38-6297-6.

<http://www.vtt.fi/inf/pdf/symposiums/2005/S236.pdf>

Helle, A. Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka – tutkimushanke. Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka, vuosiseminaari 1.12.2004, Espoo. VTT Symposium 236, s. 7–14.

Komonen, K. Fyysisen käyttöomaisuuden hallinta – käynnissäpidon vaikutus yrityksen tuottavuuteen. Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka, vuosiseminaari 1.12.2004, Espoo. VTT Symposium 236, s. 15–26.

Kortelainen, H. Käyttövarmuusmallit. Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka, vuosiseminaari 1.12.2004, Espoo. VTT Symposium 236, s. 27–37.

Kunttu, S., Reunanen, M., Valkokari, P. Kunnossapidon kehityskohteiden tunnistaminen. Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka, vuosiseminaari 1.12.2004, Espoo. VTT Symposium 236, s. 99–105.

Parikka, R. Rasva- ja öljyvoideltujen kohteiden valvonta. Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka, vuosiseminaari 1.12.2004, Espoo. VTT Symposium 236, s. 107–117.

Muut kotimaiset julkaisut

Parikka, R., Sainio, H. Vierintälaakerien rasvavoitelun perusteet. Raportti BTUO43-041258, VTT Tuotteet ja tuotanto, Espoo 2004.

Helle, A., Andersson, P., Ahlroos, T., Kupiainen, V. Erosive wear of coatings and methods to monitor coating wear – A literature study. Research Report TUO43-BTUO43-041265, VTT Industrial Systems, Espoo 2004.

Helle, A. Bittivirtaa. Etävalvonta helpottaa laitteiden kunnossapitoa. Yle Radio 1, Toimittaja Veikko Hiiri haastattelee ohjelmassa Bittivirtaa 27.10.2004 klo 10.43 ja 23.45.

Ahonen, T. Järjestelmien käyttökokemustietojen yhdistäminen ja hyödyntäminen vikaantuvuuden ennustamisessa. Raportti BTUO42-051376, VTT Tuotteet ja tuotanto, Tampere 2005.

Parikka, R. Menetelmät ja tarpeet rasvavoideltujen vierintälaakerien voiteluvirheiden tunnistamiseksi ja korjaamiseksi. Tutkimusraportti BTUO43-051355. VTT Tuotteet ja tuotanto, Espoo 2005.

Halme, J., Parikka, R. AC-servomoottori – rakenne, vikaantuminen ja havainnointimenetelmät. Tutkimusraportti BTUO43-051348, VTT Tuotteet ja tuotanto, Espoo 2005. 32 s.

Halme, J. Planeettavaihteet – rakenne, vikaantuminen ja havainnointimenetelmät. Raportti BTUO43-051349, VTT Tuotteet ja tuotanto, Espoo 2005.

Tekijä(t) Helle, Aino (toim.)			
Nimeke Kunnossapito ja prognostiikka Prognos-vuosiseminaari 2005			
Tiivistelmä Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka (Prognos) -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. Hankkeessa on mukana kolme VTT:n tutkimusyksikköä, kolme teknillistä yliopistoa sekä 13 yritystä. Marraskuussa 2005 pidetyssä toisessa vuosiseminaarissa Kunnossapito ja prognostiikka esiteltiin toisen projektivuoden aikana saatuja tuloksia ja tehtyjä selvityksiä. Esitelmistä kirjoitetut artikkelit on koottu tähän seminaarijulkaisuun. Tutkimuksissa on selvitetty eri lähteistä saatavien tietojen yhdistämistä ja hyödyntämistä kunnossapidon ja päätöksenteon tukena pureutuen mm. bayeslaisiin menetelmiin ja sumeiden kognitiivisten karttojen hyödyntämiseen. Vaativien säätösovellusten käyttövarmuutta on tutkittu käyttäen esimerkki-kohteina paperikoneiden laatusäätöjä. Piirreanalyysin käyttöä on selvitetty koneen tai prosessin toimintatilan määrittämiseksi. Öljyanalytiikkaa on tutkittu panostusnosturin kunnonvalvonnan yhteydessä. Robottien vikaantumisen ennakointiin soveltuvan järjestelmän kehittämiseksi on tutkittu robotin kriittisimpien komponenttien valvontaan soveltuvia menetelmiä kunnonvalvontamittausten avulla etämonitorointia hyödyntäen. Lisäksi on selvitetty kolmiulotteisen käyttöliittymän tärkeimpiä vaatimuksia ja toimintoja sekä mahdollisia toteuttamistapoja prognostiikkajärjestelmän tulosten, laitosmallin ja huolto-ohjeiden visualisointiin.			
Avainsanat prognostics, maintenance, reliability, condition monitoring, diagnostics, service life, operational reliability, modelling, fuzzy cognitive maps, robots			
Toimintayksikkö VTT Tuotteet ja tuotanto, Metallimiehenkuja 6, PL 1702, 02044 VTT			
ISBN 951-38-6301-8 (nid.) 951-38-6302-6 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Projektin numero	
Julkaisuaika Lokakuu 2005	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 79 s. + liitt. 7 s.	Hinta B
Projektin nimi Prognos		Toimeksiantaja(t)	
Avainnimeke ja ISSN VTT Symposium 0357-9387 (soft back ed.) 1455-0873 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Myynti 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 239
VTT-SYMP-239

Author(s) Helle, Aino (ed.)			
Title Maintenance and prognostics Prognos-seminar 2005			
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 second annual seminar held in November 2005 presented results and studies made during the second project year. The research includes studies into combining and utilising data and information from different sources for maintenance and decision making support. Dependability of demanding control systems, particularly in paper machines, forms one part of the research. Feature selection for diagnosing the operational state of a machine or process has been studied. In addition, oil analysis has been used for condition monitoring of cranes. In order to develop fault prediction for robots, the possibilities of various condition monitoring methods have been studied utilising remote monitoring of the most critical components of a robot in industrial use. The most important requirements and functions as well as possible ways of implementation of a three dimensional user interface for visualisation of the results of a prognostic system, plant model and service instructions have also been studied.			
Keywords prognostics, maintenance, reliability, condition monitoring, diagnostics, service life, operational reliability, modelling, fuzzy cognitive maps, robots			
Activity unit VTT Industrial Systems, Metallimiehenkuja 6, P.O.Box 1702, FI-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-6301-8 (soft back ed.) 951-38-6302-6 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Project number	
Date October 2005	Language Finnish, engl. abstr.	Pages 79 p. + app. 7 p.	Price B
Name of project Prognos		Commissioned by	
Series title and ISSN VTT Symposium 0357-9387 (soft back ed.) 1455-0873 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FI-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 asettavat niiden käyttövarmuuden hallinnalle entistä suurempia haasteita. Samalla ta-loudellisten 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. 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 suunnittelemattomien seisokkien välttämiseksi. Tähän seminaarijulkaisuun on koottu marraskuussa 2005 pidetyn vuosiseminaarin esitelmät, joissa esiteltiin toisen projektivuoden aikana saatuja tuloksia ja tehtyjä selvityksiä.

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

Denna publikation säljs av
VTT INFORMATIONSTJÄNST
PB 2000
02044 VTT
Tel. 020 722 4404
Fax 020 722 4374

This publication is available from
VTT INFORMATION SERVICE
P.O.Box 2000
FI-02044 VTT, Finland
Phone internat. +358 20 722 4404
Fax +358 20 722 4374
