

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta. Sähkötekniikan osasto
Tutkimusraportti 25

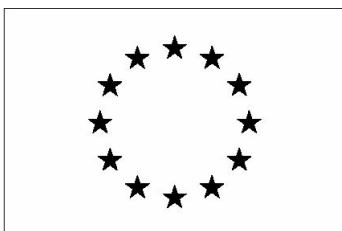
Jero Ahola, Tero Ahonen, Antti Kosonen, Ville Särkimäki, Risto Tiainen

Metsäklusterin tutkimusverkosto:
Sähkötekniisten laitteiden diagnostiikan tutkimustoiminta

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta. Sähkötekniikan osasto
PL 20
53851 LAPPEENRANTA

ISBN 978-952-214-459-1
ISBN 978-952-214-460-7 (PDF)
ISSN 1459-3122

Lappeenranta 2007



TIIVISTELMÄ

Jero Ahola, Tero Ahonen, Antti Kosonen, Ville Särkimäki, Risto Tiainen
Metsäklusterin tutkimusverkosto: Sähkötekniisten laitteiden diagnostiikan tutkimustoiminta

Lappeenranta 2007

51 s.

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta. Sähkötekniikan osasto

Tutkimusraportti 25

ISBN 978-952-214-459-1

ISBN 978-952-214-460-7 (PDF)

ISSN 1459-3122

Tämä raportti on laadittu Euroopan sosiaalirahaston (ESR) rahoittaman hankkeen *Metsäklusterin tutkimusverkosto* puitteissa vuoden 2007 aikana Lappeenrannan teknillisen yliopiston Sähkötekniikan osastolla. Varsinainen raporttiosuus koostuu neljästä pääkappaleesta. Ensimmäisessä pyritään hahmottamaan laitediagnostiikan kehitysnäkymiä. Toisessa tehdään lyhyt kartoitus sähkötekniikkaan liittyvästä kunnossapidon yliopistotutkimuksesta, jota tehdään suomalaisissa yliopistoissa. Neljännessä kappaleessa keskitytään sähkökäyttöjen diagnostiikan kansainvälisen tutkimuksen kartoitukseen. Viimeisessä kappaleessa käsitellään yleisesti ottaen laitediagnostiikassa hyödynnettävien menetelmien ja tekniikoiden tutkimusta. Pääasiallisina tutkimusmenetelminä tässä raportissa hyödynnetään tieteellisiä julkaisuja ja eri organisaatioiden [www-sivuja](#).

Asiasanat: diagnostiikka, sähkökäytöt, kunnonvalvonta, metsäteollisuus

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET.....	3
1. JOHDANTO	5
2. LAITEDIAGNOSTIIKAN KEHITYSNÄKYMÄ	6
2.1. Mikroprosessorien ja sulautetun laskennan kehityksestä	6
2.2. Tietoverkkojen ja tiedonsiirtotekniikoiden kehityksestä	7
2.3. ICT-alan kehityksen vaikutus laitediagnostiikkaan ja teollisuuselektroniikkaan..	10
2.4. Metsäteollisuuden kunnossapidon kehitysnäkymiä	11
2.4.1. Konsepti.....	11
2.4.2. Tekniikoita.....	12
3. SÄHKÖTEKNIikkaAN LIITTYVÄ KUNNOSSAPIDON YLIOPISTOTUTKIMUS SUOMESSA	15
3.1. Johdanto.....	15
3.2. Lappeenrannan teknillisen yliopiston Sähkötekniikan osasto	15
3.3. Tampereen teknillisen yliopiston Sähkötekniikan osasto.....	15
3.4. TKK:n Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto.....	16
3.5. TKK:n Automaatio- ja systeemitekniikan osasto	16
4. SÄHKÖKÄYTTÖJEN DIAGNOSTIIKAN TUTKIMUS KANSAINVÄLISESTI.	17
4.1. Sähkökoneet	17
4.1.1. Induktiokoneet ja -käytöt.....	17
4.1.2. Muut koneet.....	19
4.2. Tiedonkeruu ja diagnostiikkakonseptit.....	20
4.3. Hankkeita.....	20
5. LAITEDIAGNOSTIIKKAAN LIITTYVIEN MENETELMIEN TUTKIMUS KANSAINVÄLISESTI	21
5.1. Lyhyen kantaman radiotekniikat ja verkot	21
5.1.1. Langaton Ethernet (IEEE 802.11)	22
5.1.2. Bluetooth (IEEE 802.15.1)	22
5.1.3. ZigBee (IEEE 802.15.4).....	22
5.1.4. UWB (Ultrawideband)	23
5.1.5. Muut lyhyen kantaman tekniikat	23
5.1.6. Alan tutkimus ja tulevaisuus	23
5.2. Tehon louhinta ympäristöstä	23
5.3. Älykkäät anturit ja algoritmien sulauttaminen	24
5.4. Mittausmenetelmät	26
5.4.1. Akustinen emissio	26
5.4.2. Kiihtyvyyden mittaaminen	27
5.4.3. Mikroanturit.....	28
5.4.4. Konenäkö.....	29
5.5. Luokittelumenetelmät ja algoritmit	30
5.5.1. Tulevaisuuden näkymiä.....	31
5.6. Semanttiset webit.....	31
5.6.1. Historia	32

5.6.2.	Teknologia	32
5.6.3.	Tutkimus	32
5.6.4.	SW laitediagnostiikassa	33
5.7.	RFID ja visuaaliset koodit.....	33
5.7.1.	Visuaalinen tunnistus	33
5.7.2.	Radiotaajuinen etätunnistus	34
5.7.3.	Objektin ja siihen liittyvän tiedon yhdistäminen	36
5.8.	RFID-anturit.....	36
5.9.	Katsaus alan kaupalliseen toimintaan	37
LÄHTEET	38

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

AE	Acoustic Emission
AEWG	Acoustic Emission Working Group
ASWC	Asian Semantic Web Conference
BMVA	British Machine Vision Association
CAN	Controller Area Network
CMD	Condition Monitoring and Diagnosis
DC	Direct Current
DNS	Domain Name Service
DSP	Digital Signal Processor
DTC	Direct Torque Control
EAN	European Article Number
ENSIEG	l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Electriciens de Grenoble
EPC	Electronic Product Code
EPVA	Extended Park's Vector Approach
ESSI	European Semantic Systems Initiative
ESR	Euroopan sosiaalirahasto
EST	European Semantic Technology Conference
ESWC	European Semantic Web Conference
EWGAE	European Working Group on Acoustic Emission
GA	Genetic Algorithm
GP	Genetic Programming
GSM	Global System for Mobile (Communications)
GPS	Global Positioning System
HF	High Frequency
IAPR	International Association for Pattern Recognition
ICOVP	International Conference on Vibration Problems
ICT	Information and Communications Technology
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
ISO	International Standards Organisation
ISWC	International Semantic Web Conference

KEPCO	Korea Electric Power Company
KEPRI	Korea Electric Power Research Institute
KTH	Kungliga tekniska högskolan
LAN	Local Area Network
LEEI	Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle
LTU	Lappeenranta teknillinen yliopisto
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System
MUSIC	Multiple Signal Classification
NFC	Near Field Communication
ONS	Object Name Service
OWL	Web Ontology Language
PAN	Personal Area Network
PUCRS	Pontificia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
PWM	Pulse Width Modulation
QoS	Quality of Service
RDF	Resource Definition Framework
RFID	Radio Frequency Identification
SEIG	Self-Excited Induction Generator
SR	Switched Reluctance
SW	Semantic Web
SWSA	Semantic Web Science Association
TKK	Teknillinen korkeakoulu
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
UHF	Ultra High Frequency
UPC	Universal Product Code
UWB	Ultra Wide Band
VSI	Voltage Source Inverter
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus
WWW	World Wide Web
W3C	World Wide Web Consortium
XML	Extensible Markup Language

1. JOHDANTO

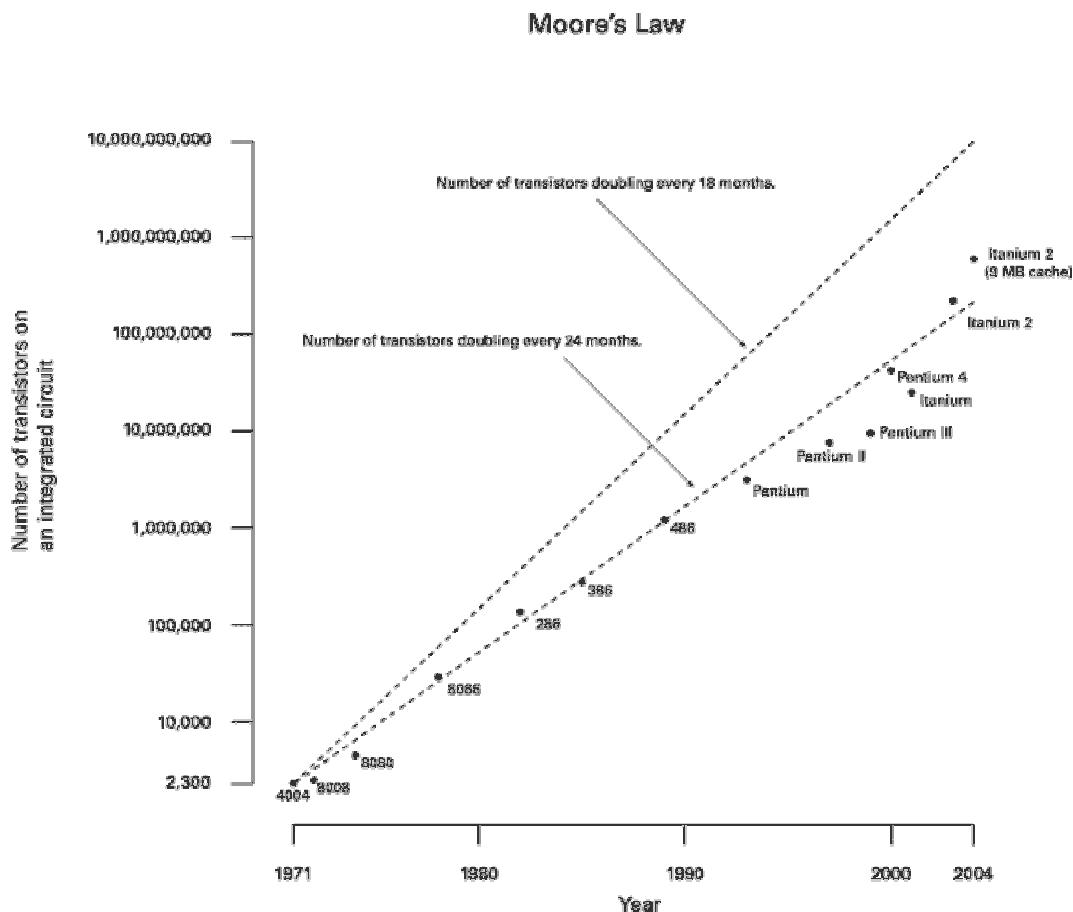
Metsäteollisuuden kunnossapito on muutosvaiheessa. Metsäteollisuusyritykset pyrkivät keskittymään entistä selvemmin ydinosamisalueisiinsa tukitoimintoja ulkoistaen ja keskittäen konsernin sisällä. Todennäköisesti jokaisella teollisuuslaitoksella ei tulevaisuudessa enää ole henkilökuntaa hoitamaan kyseisen laitoksen kunnossapitoa, vaan kunnossapitohenkilökunta työskentelee useilla laitoksilla. Kunnossapito muuttuu yhä suuremmissa määrin liiketoiminnaksi, joten kustannustehokkuus (turhien toimenpiteiden minimointi luotettavuuden kärsimättä) on perusvaatimus. Tehokas kunnossapitotoiminta vaatii tällaisten muutosten jälkeen laaja-alaista osaamista.

Tämän raportin tavoitteena on kuvata metsäklusterin näkökulmasta käynnissä olevaa laitediagnostiikan tutkimusta ja tulevaisuudennäkymiä. Raportti on laadittu Euroopan sosiaalirahaston (ESR) rahoittaman hankkeen *Metsäklusterin tutkimusverkosto* puitteissa vuoden 2007 aikana Lappeenrannan teknillisen yliopiston Sähkötekniikan osastolla. Varsinainen raporttiosuus koostuu neljästä pääkappaleesta. Ensimmäisessä pyritään hahmottamaan laitediagnostiikan kehitysnäkymiä. Toisessa tehdään lyhyt kartoitusta sähkötekniikkaan liittyvästä kunnossapidon yliopistotutkimuksesta, jota tehdään suomalaisissa yliopistoissa. Neljännessä kappaleessa keskitytään sähkökäyttöjen diagnostiikan kansainvälisen tutkimuksen kartoitukseen. Viimeisessä kappaleessa käsitellään yleisesti ottaen laitediagnostiikassa hyödynnettävien menetelmien ja teknikoiden tutkimusta. Pääasiallisina tutkimusmenetelminä tässä raportissa hyödynnetään tieteellisiä julkaisuja ja eri organisaatioiden www-sivuja.

2. LAITEDIAGNOSTIIKAN KEHITYSNÄKYMÄ

2.1. Mikroprosessorien ja sulautetun laskennan kehityksestä

Puolijohdeisiin perustuvat elektroniikan ja sulautetun laskentatehon kehitys on ollut eksponentiaalista 60-luvulta lähtien. Yleisesti kehityksestä puhuttaessa viitataan Mooren lakiin. Vuonna 1965 Gordon Moore julkaisi artikkelin [1] jossa hän esitti että minimihintaisten puolijohdekomponenttien kompleksisuus kaksinkertaistuu kerran kahdessa vuodessa ja lyhyellä tähtämellä tämä kehitys on jopa nopeampaa. Sitten kaksinkertaistumiseen aikana kuluvana on yleisesti pidetty 18 kuukautta. Mooren mainitsemalla kompleksisuuden kasvulla on puolestaan tarkoitettu mikropiirien transistoritiheyden kasvua, mikä korreloi suoraan mikropiirillä olevien digitaalikomponenttien määrän kanssa. Historian valossa Mooren lakia on kuvannut mennyttä kehitystä jo neljäkymmentä vuotta (kuva 2.1). Käytännössä tämä on tarkoittanut sitä, että samalla hinnalla saa jatkuvasti enemmän aiempaa vähemmän tehoa/laskutoimitus kuluttavaa laskentatehoa. Vaihtoehtoisesti saman laskentatehon hinta ja vaatima tilavuus on tippunut eksponentiaalisesti.



Kuva 2.1. Mooren lain ennustama transistorimäärä mikropiirillä ajan funktiona. Kuvaan on merkitty pisteinä mikroprosesseja niiden lanseerausvuoden ja transistorimäärän perusteella (kuva wikipedia).

Mikroprosessorien kehitystä kuvaa hyvin se, että nykyisissä sulautetuissa järjestelmissä, esimerkiksi matkapuhelimet, käytetty prosessorityyppi ARM11 vastaa laskentateholtaan karkeasti 1990-luvun lopun Pentium III -mikroprosessoria, joka puolestaan vastaa laskentateholtaan 1980-luvun puolivälin supertietokonetta Cray-II (Kuva 2.2).

Kärjistetysti sanottuna nykyisen modernin matkapuhelimen omistajalla on taskussaan 1980-luvun puolivälin supertietokoneen laskentateho. Matkapuhelimen tehonkulutus on arviolta 1/100 000 supertietokoneen tehonkulutuksesta, koko 1/1000 supertietokoneen koosta ja hinta 1/10 000 supertietokoneen hinnasta. Muistikapasiteetit ovat molemmissa laitteissa suurin piirtein toisiaan vastaavat.



Kuva 2.2. Nestejäähdytetyn Cray-II-supertietokoneen keskusyksikkö vastaa laskentateholtaan nykyistä modernia matkapuhelinta (kuva wikipedia).

Jos oletetaan nykyisin kehityksen jatkuvan ja Mooren lain olevan edelleen voimassa, on nykyisten PC-työasemien laskentateho saatavissa edullisesti sulautettuihin ja pienivirtaisiin järjestelmiin arviolta 5-10 vuoden sisällä. Sitä, mitä tämä mahdollistaa esimerkiksi laitediagnostiikassa, voi pohtia esimerkiksi siltä pohjalta, millaisia mahdollisuuksia laskentatehon suhteen nykyiset työasemat tarjoavat. Mikroprosessorien teknistä kehitystä eteenpäin vievänä voimana on jatkossakin kulutuselektronikka ja erityisesti digitaalinen viihde. Erityisesti korostuu laskentateho suhteessa käytettyyn energiaan. Pientä tehonkulutusta tarvitaan kannettavissa laitteissa. Tarve on akuutti myös verkkosyöttöisissä laitteissa, koska nykyisellään syntyvän lämpötehon poistaminen prosessorin pinnasta tuottaa ongelmia.

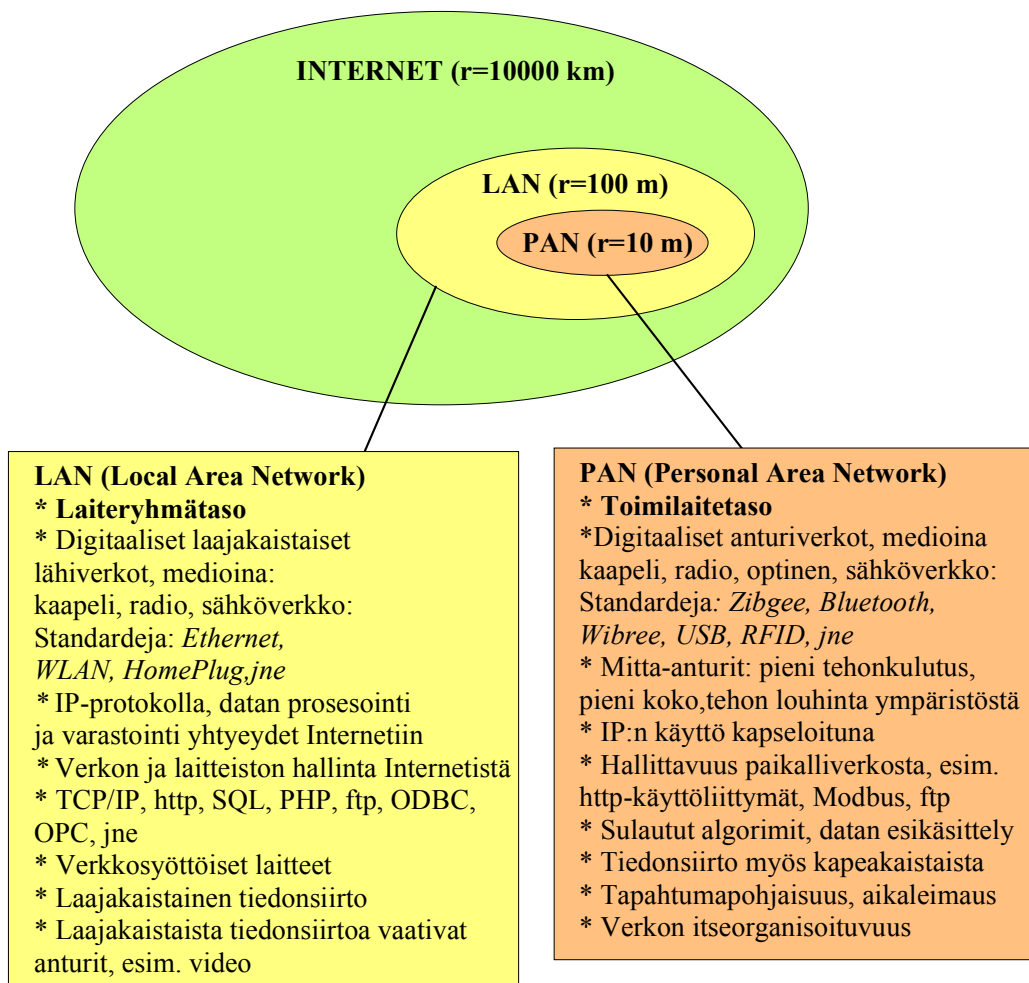
2.2. Tietoverkkojen ja tiedonsiirtotekniikoiden kehityksestä

Mikroprosessorien ja digitaalisen signaalinkäsittelyalgoritmien kehityksen ansiosta myös tiedonsiirtotekniikat ja tietoverkot ovat kehittyneet voimakkaasti. Yksittäiset laitteet ja järjestelmät verkottuvat eri tasoilla. Näitä järjestelmiä yhdistää Internet. Siitä on muodostunut

kymmenen viimeisen vuoden aikana kaikille avoin verkko, joka yhdistää eri mantereet ja tarjoaa ympäristön erilaisille palveluille. Yhtenä esimerkkinä tästä kehityksestä ovat suomalaiset verkkopankkipalvelut. Vielä 1990-luvun alkupuolella suurin osa suomalaisista asioi pankkitiskillä ja pankkihenkilökuntaa oli n. 50 000 ja konttoreita n. 3000 (tilastokeskus). Tällä hetkellä asiointi on pitkälti siirtynyt Internetiin ja verkkopankkipalveluihin. Samaan aikaan pankkien henkilökunta ja konttoreiden määrä on puolittunut ja yritysten tehokkuus on parantunut. Henkilöstön ja konttoreiden määrän väheneminen olisi ollut dramaattisempaa, mikäli samanaikaisesti pankit eivät olisi lisänneet henkilöstöä sijoitus-, vakuutus-, ja lainanmyyntipalveluissa.

Internet on synnyttänyt myös täysin uutta liiketoimintaa, joka perustuu pelkästään tähän avoimeen verkkoympäristöön. Esimerkkinä tällaisista ovat hakukoneet, verkkopelit, itsepalveluun perustuvat matkatoimistot, tallennustilan vuokraajat, käyttäjän tunnistuspalvelut, sijoituspalvelut, verkkokaupat, logistiikkajärjestelmät, nettipuhelut, tiedostonjakopalvelut, navigointi- ja karttapalvelut, tietokantapalvelut, jne. Tämä kaiken on mahdollistanut standardi ja avoin IP-pohjainen (Internet Protocol) tietoliikenne, jonka päällä pystytään siirtämään standardimenettelyin mitä tahansa tietoa Internetin solmujen välillä. Massamarkkinoiden ansiosta myös laitteistot, joita tähän verkkoon liittymiseen tarvitaan, ovat edullisia. Ilmaisia avoimen lähdekoodin ohjelmistoja on saatavilla sekä verkkoon liittyvien laitteiden ohjelmistokehitykseen, käyttöjärjestelmäksi ja verkon hallintaan. Lyhyellä tähtäimellä ei ole mitään syytä olettaa, että kehitys pysähtyisi ja Internetin rooli tiedonvälityksessä ja markkinapaikkana vähenisi. Pikemminkin on odotettavissa kehitysvauhdin kiihtymistä. Ilmiön voi ajatella olevan lumipalloeftin kaltainen. Kymmenen vuoden päästä taas monesta nykyisin ”hypenä” pidetystä asiasta ajatellaan, että näinhän sen pitikin mennä.

Kehityksen seuraavassa vaiheessa verkkoon liittyvät merkittävässä määrin ihmisten työasemien lisäksi erilaiset sulautetut laitteet. Näistä yhtenä ensimmäisistä ovat matkapuhelimet (henkilökohtainen taskutietokone). Laitteiden liittyminen Internetiin mahdollistaa myös erilaiset laitteisiin liittyvät palvelut, joista yksi esimerkki ovat laitediagnostiikkaan liittyvät asiantuntija-, analyysi- ja tiedonkeruupalvelut. Teollisuustoimilaitteissa ainakin laitediagnostiikan osalta IP tunkeutuu yhä lähemmäs toimilaitetta ja anturitasoa. Myös teollisuusautomaatiossa Ethernet-verkkoja tuodaan kenttäväyläksi, missä useat sovellukset vaativat determinististä tiedonsiirtoa ja sovelluksilla on millisekuntiluokkaa olevat latenssivaatimukset. Tästä esimerkkeinä ovat standardit Profinet ja EtherCat [18]. Vaikka IP-protokollan hyödyntäminen ulottuisikin anturitasolle asti ja anturitasoa voitaisiin hallita Internetin kautta, käytetään anturitasolla eri tiedonsiirtomenetelmiä kuin paikallisverkkotasolla. Tämä johtuu yksinkertaisesti siitä, että ympäristöolosuhteet ja teknistaloudelliset kysymykset määräävät lopulta sen, millaiseksi esimerkiksi laitediagnostiikassa hyödynnettävä järjestelmä muodostuu (Kuva 2.3). Teknistä kehitystä tapahtuu menetelmissä ja laitteissa kaikilla tasoilla. Erityisen voimasta kehitys on lähiverkkojen tekniikassa (LAN) sekä henkilökohtaisten verkkojen tekniikassa (PAN). Näihin liittyvillä laitteistoilla on suuri käyttäjäkunta. Lisäksi tätä laitteistoa kuluttajat ja teollisuus tyypillisesti tarvitsevat hyödyntääkseen Internetiä ja sen mahdollistamia palveluita.



Kuva 2.3. Laitediagnostiikassa verkot rakentuvat hierarkkisesti. Erilaisia tiedonsiirtomenetelmiä käytetään eri verkkojen tasoilla. Tästä huolimatta IP-protokolla ja sen mahdollistamat palvelut voidaan ulottaa tarvittaessa toimilaitetasolle asti.

Laitediagnostiikassa merkittävä ongelma on ollut tiedonsiirron järjestäminen toimilaitetasolle ja toimilaitetasolla. Ongelma on vastaava kuin kuluttajilla, jotka haluavat hyödyntää Internetin mahdollistamia palveluita. Valitettavasti teollisuusympäristö eroaa monilta osin tyypillisestä asuinkiinteistöstä ja myös tiedonsiirtoa koskevat vaatimukset ovat pääosin erilaisia. Johtopäätöksenä tähän on ollut, että toimilaitetasolla tarvitaan langattomia tiedonsiirtomenetelmiä ja tehon louhinta ympäristöstä. Yksi vaihtoehto on hyödyntää esimerkiksi sähkökäyttöjen tapauksessa moottorikaapeleita tiedonsiirrossa ja tehon louhinnassa. Näiden vaatimusten lisäksi samanaikaisesti toimintaympäristö saattaa olla hankala tiedonsiirron, elektroniikan sekä tehon louhinnan kannalta. Tämän takia tehosyöttöön tulisikin olla useita vaihtoehtoja ja verkkojen tulisi olla itsestään organisoituvia sekä verkkoja pitäisi pystyä yksinkertaisin menettelyin koostamaan eri tiedonsiirtomenetelmiä hyödyntävistä tekniikoista. Todennäköisesti nämä ongelmat ratkeavat lähitulevaisuudessa. Yhteys Internetiin ja sitä kautta diagnostiikkajärjestelmään toimilaitetasolta pystytään toteuttamaan missä tahansa standardimenettelyin ja edullisesti.

2.3. ICT-alan kehityksen vaikutus laitediagnostiikkaan ja teollisuuselektroniikkaan

Sulautettu laskenta ja tietoliikennetekniikka vaikuttavat voimakkaasti kehitykseen sekä teollisuuselektroniikkaan että siihen liittyvään laitediagnostiikkaan. Kehityksen moottorina toimii kulutuselektroniikka. Puolijohdepiirien lyhyttä elinkaarta (saatavuus tässä tapauksessa) kompensoidaan hyödyntämällä standardeja ohjelmisto- ja laitteistorajapintoja. Tässä mielessä esimerkkejä edelläkävijöitä ovat esim. tietoliikennejärjestelmien komponentit, autoelektroniikka, PC-tekniikka, viihde-elektroniikka, jne. Täten myös kulutuselektroniikassa käytettävät standardit implementoidaan soveltuvien osien teollisuuselektroniikan sovelluksiin. Laitediagnostiikassa tämä voisi tarkoittaa esimerkiksi seuraavia asioita:

- Digitaalinen signaalikäsitteily siirtyy yhä lähemmäs ja anturia, laskentateho ja muistikapasiteetti kasvavat
- Yhä useampi toiminto on järkevää toteuttaa digitaalisesti analogisen tekniikan sijasta
- Anturien toimintaa pystytään muuttamaan ja säätämään ohjelmallisesti. Piipohjaiset MEMS-tekniikkaan perustuvat anturit yleistyvät.
- Digitaaliseen tiedonsiirtoon pohjautuvat anturiväylät yleistyvät kaikissa sovelluksissa
- Itseorganisoituvat ja energiaa ympäristöstä keräävät langattomat verkot yleistyvät
- Teollisuuselektroniikassa keskitytään yhä enemmän sovellustasoon. Kehitys on analogista siihen, mikä on havaittavissa matkapuhelimissa. Yhä suurempi osa myydyistä puhelimista on paljon muutakin kuin pelkkää puhumista varten. Itsed diagnostiikka on yksi sovellus muiden joukossa.
- IP-protokollan soveltaminen yleistyy teollisuustoimilaitteissa. Laitediagnostiikan osalta tämä helpottaa asiantuntijapalveluiden toteuttamista ja eri laitevalmistajien toimittamien järjestelmien integrointia.
- Teollisuuselektroniikka toteutetaan ylipäättänsä yhä enemmän perustuen ilmaisiin ja avoimiin käyttöjärjestelmiin ja avoimeen lähdekoodiin. Tämä kehitys on jo nyt nähtävissä autoteollisuudessa, tietoliikennejärjestelmissä ja digitaalisissa viihdelaitteissa.
- Algoritmien ja ohjelmiston merkitys kasvaa ja niiden suorituskyky paranee kun diagnostiikkapalveluja tarjoavat yrityksen saavat kerättyä tietomassaa suuresta joukosta toimilaitteita
- Analysoitua vikaantumisdataa pystytään hyödyntämään yhä paremmin laitteiden tuotekehityksessä.
- Energian käytön tehokkuus korostuu energian hinnan noustessa (elinkaarikustannusanalyysit). Tästä tulee keskeinen kriteeri, jolla perustellaan investointia laitediagnostiikkapalveluihin.

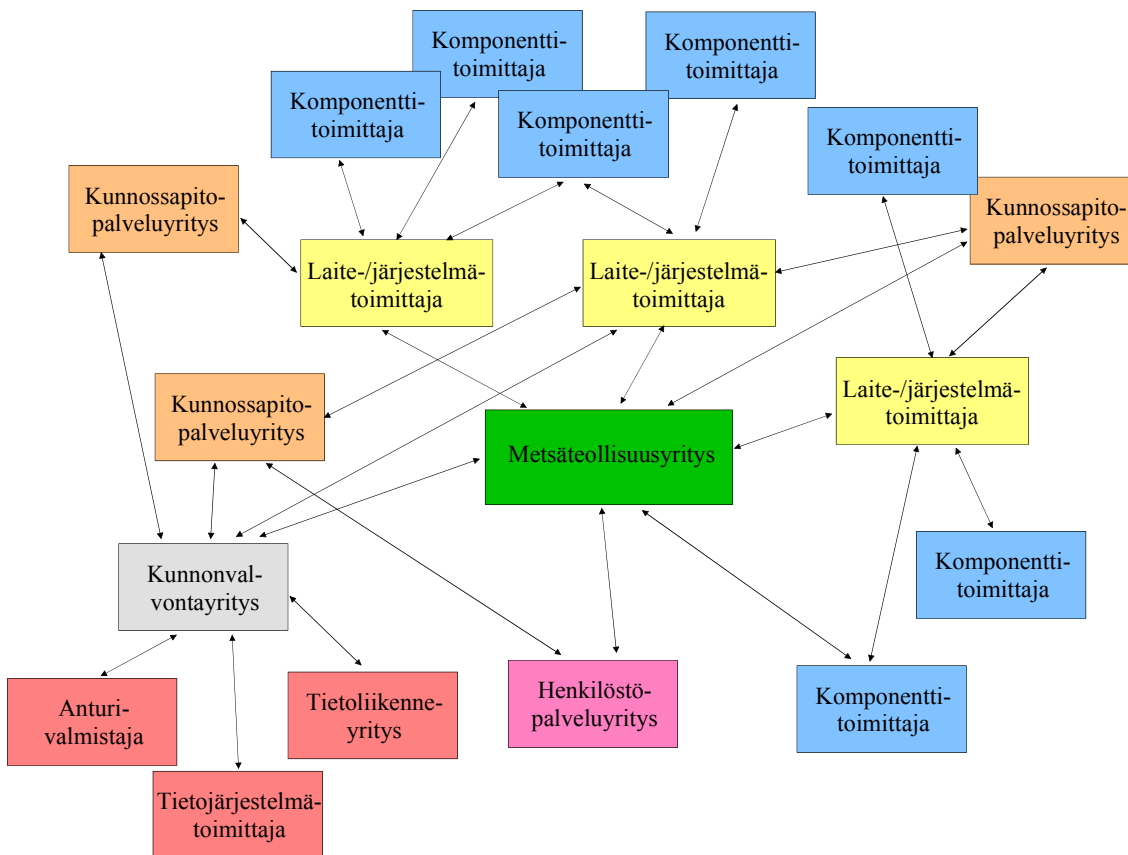
2.4. Metsäteollisuuden kunnossapidon kehitysnäkymiä

Metsäteollisuuden kunnossapitotoimintaa on viime vuosina ulkoistettu ja keskitetty konsernin sisällä useissa metsäteollisuusyrityksissä. Ulkoistettua kunnossapitoa Suomessa hoitavia yrityksiä ovat mm. ABB Service, YIT ja Metso (Scandinavian Mill Services) [1],[3]. Metsäyhtiöistä ainakin Stora-Enso on perustanut omia tytäryhtiöitä hoitamaan tuotantolaitostensa kunnossapitoa eri paikkakunnilla. Näitä tytäryhtiöitä ovat Fortek (mm. Oulu, Pohjois-Karjala), Kymenso (Kymenlaakso), Saimaa Services (Etelä-Karjala), Varenso (Varkaus) ja Botnia Mill Service (Metsä-Botnian laitokset). Metsäteollisuudessa kunnossapidon ulkoistaminen ei ole ollut kovin laajamittaista eräisiin muihin aloihin verrattuna. Merkittävänä syynä tähän on ollut ammattiyhdistysliikkeen vastustus [1],[4]. Paperialan nykyinen työehtosopimus mahdollistaa paikallisen sopimisen ulkopuolisen työvoiman käytöstä. Toisaalta sopimukseen on myös kirjattu pyrkimys ulkopuolisen työvoiman käytön vähentämiseksi kunnossapidossa työvoiman liikkuvuutta lisäämällä ([5], sivu 170). Toistaiseksi laajamittaista ulkoistusta metsäteollisuudessa on tehty lähinnä siivouspalvelujen osalta [6]. ABB arvioi paperitehtaan kunnossapitokuluiksi 4-6 prosenttia tehtaan liikevaihdosta, ja ulkoistamisen tuottamiksi säästöiksi noin kymmenen prosenttia [1]. Säästön arviointi tarkasti on etukäteen vaikeaa, mutta kyse lienee joka tapauksessa niin merkittävistä summista, että kunnossapitotoiminnan voidaan olettaa siirtyvän tulevaisuudessa lähes kokonaan ulkopuolisten yritysten tai konsernin sisäisten kunnossapitoyritysten hoidettavaksi. Lisäksi kunnossapidossa käyttöön otettava moderni teknologia vaatii yhä erikoistuneempaa osaamista, jota on järkevää keskittää erikoistuneille toimijoille.

Seuraavassa kappaleessa esitellään mahdollinen lähitulevaisuuden kunnossapitomalli. Esitetyt ideat ovat tarkoituksella äärimmilleen vietyjä; on todennäköistä, että vanhoja toimintatapoja säilytetään uusien rinnalla tai ainoinkin toimintatapoina vielä hyvinkin pitkään.

2.4.1. Konsepti

Tuotantolaitokset pyrkivät keskittymään ydinliiketoimintaansa (paperin, sellun, vanerin jne. valmistukseen). Toimilaite-, järjestelmä- ja automaatiotoimittajien kanssa tehtäviin sopimuksiin kuuluu vaatimus/takuu kyseisen laitteen tai järjestelmän käytettävyyden alarajasta, jonka alittamisesta toimittaja joutuu maksamaan jotakin sakkoa. Toimittajayritys vastaa laitteen tai järjestelmän kunnossapidosta valitsemallaan tavalla kuitenkin siten, että kaikkien kulujen jälkeen sille jää kaupasta *riittävällä todennäköisyydellä* voittoa. Kyse on "toimilaite-leasingista". Esimerkki voisi olla vaikkapa pumppukäyttö. Metsäteollisuusyritys ostaa käyttöjä toimittavalta yritykseltä q kuutiometriä tilavuusvirtaa sekunnissa käytettävyydellä p. Toimittava yritys ostaa pumpun, moottorin, moottoriohjaimen ja tarvittavan instrumentoinnin (osa voi olla yrityksen omaa tuotantoa), ja asentaa kokonaisuuden paikalleen. Yritys pyrkii minimoimaan kunnossapitokustannukset, kuitenkin siten, että sopimuksessa määritelty minimikäytettävyys ylitetään riittävällä todennäköisyydellä. Yritys voi hoitaa huoltopalvelut itse, tai käyttää jonkin kunnossapitoyrityksen palveluita. Koska ylläpidettävät pumppukäytöt on todennäköisesti sijoitettu maantieteellisesti etäälle, on etäkunnonvalvonta, -diagnostiikka ja -prognostiikka tarpeen. Kunnossapitoa hoitava yritys voi tuottaa nämä toiminnot itse tai ostaa ulkopuoliselta kunnonvalvontayritykseltä. Edelleen, kunnonvalvonnassa tarvittavat laitteistot (mittalaitteet, tietojärjestelmät) ostetaan todennäköisimmin ulkopuoliselta yritykseltä, samoin tarvittavat tietoliikennepalvelut. Kuvassa 2.4 on esitetty joitakin metsäteollisuusyrityksen kunnossapitoon liittyviä toimijoita.



Kuva 2.4. Metsäteollisuusyrityksen kunnossapitotoimintaan liittyviä toimijoita.

Osan laitteistaan ja järjestelmistään metsäteollisuusyritys ostaa laite-/järjestelmätoimittajilta kuvatus kaltaisella leasing-sopimuksella, jolloin laite-/järjestelmätoimittaja hoitaa tarvittavan kunnossapidon. Joidenkin laitteidensa ja järjestelmiensä kunnossapidon yritys sen sijaan ostaa suoraan kunnossapitopalveluyrityksiltä, ja osan hoitaa itse. Itse hoidettavaa kunnossapitoa varten metsäteollisuusyritys voi käyttää henkilöstövuokrausyritysten palveluita. Kuntoon perustuvan kunnossapidon tueksi tarvitaan kunnonvalvontaa, ja tämän vaatiman erikoisosaamisen vuoksi on luontevaa ajatella, että tätä toimintaa tarjoaa palveluna erillinen kunnonvalvontayritys. Kunnonvalvontayrityksen palveluita ostavat kunnossapitoyritykset sekä metsäteollisuusyritys itse (kunnossapidon tueksi ja laitteiden/järjestelmien suorituskyvyn mittauksiin). Kunnonvalvontayrityksen täytyy järjestää anturointi, tiedonsiirto, tiedon prosessointi ja tiedon varastointi. Osan näistä se toteuttaa itse, osan ostaa ulkopuolisilta toimijoilta.

2.4.2. Tekniikoita

Kunnossapitotoiminnassa tarvittava tekniikka rakentuu todennäköisesti suurelta osin avointen standardien varaan (Internet-maailman protokollat ja tekniikat). Edellä kuvatussa konseptissa toimijoita on useita, mikä osaltaan edellyttää tiedon jakamista ja siten avointen standardien käyttöä. Tarkastellaan esimerkkinä käyttötapausta, jossa pumppukäyttövalmistaja hoitaa metsäteollisuusyritykselle toimittamiensa käyttöjen kunnossapidon, ja kunnossapitoyrityksen palveluksessa oleva huoltomies tekee metsäteollisuusyrityksessä pumppujen tarkastuskierröksen pumppukäyttövalmistajan toimeksiannosta.

- 1) Kunnossapitoyrityksen tietokanta sisältää tiedot kaikista ylläpidettävistä kohteista, niiden sijainnista, huoltoväleistä jne. Pumppukäyttövalmistaja on toteuttanut yhteistyössä komponenttitoimittajiensa kanssa pumppukäyttöön kunnonvalvontajärjestelmän, joka koostuu antureista, tiedonkeruusta ja tiedon käsittelystä. Tiedonkäsittely tehdään taajuusmuuttajassa, tieto antureilta siirretään moottorin syöttökaapelia pitkin. Taajuusmuuttajassa on Ethernet-liityntä, jonka kautta tietoihin ja analyysituloksiin pääsee käsiksi useilla protokollilla. Diagnostiikka raportoi käytön tilan metsäteollisuusyrityksen kunnonvalvontapalvelimelle. Kunnossapitoyritys hyödyntää tätä järjestelmää. Kunnossapitoyritys soveltaa periodisen ja kuntoon perustuvan kunnossapidon yhdistelmää, jossa tasaisesti kuluvat osat vaihdetaan määräajoin ja ennakoimattomat kunnossapitotoimet tehdään kunnonvalvonnan perusteella tarvittaessa. Esimerkin tapauksessa erään metsäteollisuuslaitoksen pumppukäytöstä yksi on ilmoittanut havainneensa todennäköisesti viikon kuluessa kriittiseksi kehittyvän vian. Tieto siirtyy teollisuuslaitoksen diagnostiikkapalvelimelta pumppukäyttövalmistajan diagnostiikkapalvelimelle ja sieltä edelleen kunnossapitoyrityksen tietokantaan.
- 2) Kunnossapitoyrityksen insinööri havaitsee varoituksen lähestyvistä kriittisestä viasta. Insinööri analysoi antureiden tuottamaa raakadataa, mutta ei kykene tarkasti yksilöimään vikaa. Hän päättää lähettää huoltomiehen tutkimaan tilanteen tarkemmin, ja merkitsee työn suoritettavien töiden listaan kiireellisenä. Kunnossapitoyrityksen työntekijöille annetaan työlista, joka sisältää tarkastuskäynnin kyseisen pumppukäytön luo. Työlista on sähköinen, ja se ladataan kunkin työntekijän henkilökohtaiseen matkapuhelimeen.
- 3) Huoltomies saa työlistan ja lähtee tarkastuskäynnille. Hän tietää suurin piirtein, missä kyseinen käyttö sijaitsee. Matkapuhelimestaan hän näkee tehtaan pohjapiirustuksen ja käytön sijainnin, ja jos GPS-satelliittipaikannusjärjestelmä sattuu toimimaan teollisuuslaitoksessa sisätiloissa, puhelin osaa antaa kulkuohjeet.
- 4) Huoltomies saapuu käytön luo. Lukemalla matkapuhelimellaan käyttöön kiinnitetyn RFID-tagin (Radio Frequency Identification) tai viivakoodin hän voi varmistaa kyseessä olevan oikean käytön. Luetun tunnisteen tai työlistassa olevan tunnisteen perusteella hän voi hakea haluamansa käyttöön liittyvät tiedot eri tietokannoista, mukaan lukien käyttöön kuuluvien anturien mittadatan. Matkapuhelin liittyy tietoverkkoon langattoman lähiverkon (WLAN) tai matkapuhelinverkon välityksellä.
- 5) Huoltomies tutkii käytön ja raportoi tulokset käyttäen puhelintaan. Raportti välittyy kunnossapitoyrityksen tietokantaan. Puhelimessa oleva sovellus sisältää tyypillisimmät käyttötyypit ja tavallisimmat niille tehtävät huollot ja tarkistukset, jolloin raportin kirjoittamisessa voidaan hyödyntää valmiita vaihtoehtoja.
- 6) Huoltomies siirtyy suorittamaan seuraavaa tehtävää, ja kunnossapitoyrityksen insinööri päättää kyseisen käytön osalta jatkotoimenpiteistä.

Edellä oleva kuvitteellinen huoltotapaus sisältää useiden tieto- ja viestintätekniisten laitteiden ja tekniikoiden käyttöä. Henkilökohtainen kannettava tietokone (matkapuhelin) on merkittävässä osassa, samoin avoimet tietoliikenneverkot (WLAN, puhelinverkko, Internet) ja identifiointiin käytettävät tekniikat (1- ja 2-ulotteiset viivakoodit, RFID). GPS-paikannusta voidaan käyttää teollisuuslaitosten sisällä todennäköisesti melko rajoitetusti, sillä teollisuushallien paksut betoniset ja teräksiset seinä- ja kattorakenteet vaimentavat signaalia tehokkaasti.

Merkittävässä osassa edellä kuvatun kaltaista järjestelmää toteutettaessa ovat myös tietokannat ja erityisesti niiden välinen kommunikaatio ja käyttöoikeudet. Esimerkin huoltomiehen on päästävä käsiksi kaikkiin tarpeellisiin tietoihin, mutta metsäteollisuusyritys ei varmastikaan halua hänen pääsevän käsiksi tarpeettomiin tietoihin. Tilannetta mutkistaa se, että metsäteollisuusyritys ei ole suoraan tekemisissä huoltoyrityksen kanssa, vaan se ostaa palvelun toimilaitte-leasingin mukana pumppukäyttövalmistajalta. Tällaisen järjestelmän toteuttaminen vaatii tutkimusta ja menettelytapojen ja rajapintojen standardointia.

Kun kunnossapitoa hoitavat alaan keskittyvät toimijat, on valvottavien laitteiden lukumäärä kullakin yrityksellä todennäköisesti niin suuri, ettei kunkin laitteen kunnonvalvontaan liittyvää diagnostiikkaa voida täysin tehdä ihmisvoimin, vaan tarvitaan automaattisia diagnostiikka-algoritmeja. Näiden algoritmien on oltava yksinkertaisesti parametrisoitavissa erilaisille valvottaville koneille. Algoritmitutkimusta ja -kehitystä tarvitaan tämän saavuttamiseksi vielä runsaasti.

Kaiken kaikkiaan metsäteollisuuden kunnossapidon perusteellinen kehittäminen vaatii laajaa poikkitieteellistä osaamista. Useat tekniikat (päätelaitte, tiedonsiirto, tietokannat, tunnistustekniikat) ovat jo olemassa, mutta niiden hyödyntäminen kunnossapidon järjestelmissä vaatii käytännön insinööriä ja jossain määrin tutkimustakin. Erityisesti diagnostiikka-algoritmit vaativat kuitenkin vielä runsaasti tutkimustyötä, ennen kuin ne ovat käyttökelpoisia. Seuraavassa luvussa tarkastellaan esimerkkinä tarkemmin sähkökäyttöjen diagnostiikkaan liittyvää tutkimustoimintaa.

3. SÄHKÖTEKNIikkaan LIITTYVÄ KUNNOSSAPIDON YLIOPISTOTUTKIMUS SUOMESSA

3.1. Johdanto

Tämä selvitys keskittyy suomalaisten teknillisten yliopistojen yksiköiden kartoitukseen, joissa tehdään sähkötekniikkaan liittyvää kunnossapidon tutkimusta. Selvityksessä pääasiallisena menetelmänä käytetään eri organisaatioiden www-sivuja, toteutettuja tutkimushankkeita sekä julkaisuja. Lopputulos on suuntaa-antava, ja siinä on varmasti puutteita.

3.2. Lappeenrannan teknillisen yliopiston Sähkötekniikan osasto

Lappeenrannan teknillisen yliopiston (LTY) Sähkötekniikan osastolla kunnossapitoon liittyvää tutkimusta tehdään Sääto- ja digitaalitekniikan laboratoriossa sekä Sähkömarkkinalaboratoriossa [7].

Sääto- ja digitaalitekniikan laboratoriossa kunnossapitoon liittyvä tutkimus on keskittynyt pääasiallisesti sähkökäyttöihin. Aihealueeseen liittyen on muun muassa tutkittu konsepteja, anturointia, algoritmeja, tiedonsiirtoa ja mittaustekniikoita. Tutkimusta on toteutettu useissa TEKES:n ja yritysten rahoittamissa hankkeissa. Yhteistyökumppaneina ovat olleet muut Suomen teknilliset yliopistot ja tutkimuslaitokset.

Sähkömarkkinalaboratoriossa kunnossapitotutkimusta on tehty sähköverkko-omaisuuden hallintaan liittyen. Tutkimusta on myös tehty useissa Tekes:n ja yritysten rahoittamissa hankkeissa. Tutkimuksen yhteistyökumppaneina ovat olleet muut Suomen teknilliset yliopistot ja tutkimuslaitokset.

3.3. Tampereen teknillisen yliopiston Sähkötekniikan osasto

Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Sähkötekniikan osasto koostuu 12 laitoksesta. Seuraavaksi tarkastellaan, mitä kunnossapitoon liittyvää tutkimusta on tehty milläkin laitoksella.

Tampereen teknillisen yliopiston **Sähkövoimatekniikan laitoksen** [8] kunnossapitoon liittyviä tutkimusaiheita ovat sähkönsiirtoverkkojen käyttövarmuus ja siihen liittyvät dnaamiset ilmiöt sekä sähköverkon komponenttien kunnonvalvonta- ja diagnostiikkamenetelmät.

Automaatio- ja säätoitekniikan laitoksella on tehty pitkään kunnossapitoon liittyvää tutkimusta [9]. Kunnossapidon tutkimus on liittynyt erityisesti automaation tietotekniikkaan. Tutkimushankkeissa ovat olleet pääasiallisina yhteistyökumppaneina muut Suomen teknilliset yliopistot ja VTT:n yksiköt. Tutkimusta ovat pääasiallisesti rahoittaneet TEKES ja yritykset.

Mittaus- ja informaatiotekniikan laitoksella on puolestaan tutkittu menetelmiä, joilla tuetaan mittaustiedon perusteella tehtäviä päätöksiä [10]. Yhtenä sovelluskohteena näille menetelmille on teollisuuden kunnossapito.

3.4. TKK:n Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Teknillisen korkeakoulun Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto koostuu 18 laboratoriosta. Seuraavaksi käsitellään lyhyesti, mitä kunnossapitoon liittyvää tutkimusta osastolla tehdään.

Sähköverkkojen ja suurjännitetekniikan laboratoriossa on tutkittu suurjännitteisten sähkölaitteiden kunnonvalvontaa ja diagnostiikkaa [11]. Tutkimus painottuu keskijännitekaapeleihin ja jakelumuintajiin.

Sähkömekaniikan laboratoriossa tutkitaan sähkökoneiden vikadiagnostiikkaa [12]. Tutkimus perustuu sähkökoneiden simulointimallien hyödyntämiseen vikaantumisen mallinnuksessa. Vikadiagnostiikan tutkimusta on tehty yhteistyössä TKK:n Systeemitekniikan laboratorion kanssa.

Valaistustekniikan laboratoriossa on toteutettu useita hankkeita, joissa on kunnossapitoteemoja liittyen valaistukseen [13]. Esimerkkinä tällaisesta on toteutettu tutkimushanke: ”An Instrument and Method for Determining the Lifetime of Fluorescent Lamp (HETEKA)”.

3.5. TKK:n Automaatio- ja systeemitekniikan osasto

Automaatio- ja systeemitekniikan osasto koostuu neljästä laboratoriosta. Näistä erityisesti Automaation tietotekniikan laboratorio ja systeemitekniikan laboratorio ovat tehneet kunnossapitoon liittyvää tutkimusta.

Automaation tietotekniikan laboratorion kunnossapitotutkimus liittyy pääasiallisesti teollisuustietojärjestelmien suunnitteluun ja hallintaan liittyviin kysymyksiin [14]. Laboratorio on muun muassa mukana kansallisessa TEKES-rahoitteisessa tutkimushankkeessa Tuotanto 2010 [15].

Systeemitekniikan laboratoriossa on toteutettu useita kunnossapitoon liittyviä tutkimushankkeita [17]. Laboratorion tutkimusalueita ovat muun muassa teollisten koneiden ja laitteiden suorituskyvyn seuranta sekä vikadiagnostiikka. Tämän lisäksi laboratorio on toteuttanut sähkömekaniikan laboratorion kanssa yhteistyössä sähkökoneiden diagnostiikkaan liittyvää tutkimusta.

4. SÄHKÖKÄYTTÖJEN DIAGNOSTIIKAN TUTKIMUS KANSAINVÄLISESTI

Tässä luvussa selvitetään sähkökäyttöjen diagnostiikkaan liittyvää tutkimustoimintaa maailmanlaajuisesti. Alan tutkimuskysymyksiä ja –suuntauksia ovat muutama vuosi sitten selvittäneet mm. Singh ja Saleh Al'Kazzaz [19] (induktiomooottoreille), Benbouzid [20] (induktiomooottoreille) sekä Nandi ja Toliyat [21] (yleisesti sähkömooottoreille). Jännitevälipiiritaajuusmuuttajan (VSI, Voltage Source Inverter) vikaantumismenetelmiä ovat yleisesti kuvanneet Kastha ja Bose [22], sekä joitakin sille soveltuvia diagnostiikkamenetelmiä Fuchs [23]. Tähän lukuun on pyritty kokoamaan viitteitä sähkökäyttöjen diagnostiikkaan liittyviin julkaisuihin, jotka on tehty muutamien viime vuosien aikana (2000-luvulla). Julkaisujen sisältöä ei kuvata tarkasti, vaan painopiste on enemmänkin sen selvittämisessä, missä julkaisuissa esitelty tutkimus on tehty.

4.1. Sähkökoneet

Sähkökoneiden kunnonvalvonta on ollut tutkimuksen kohteena jo kauan. Keskeisimmät periaatteet esitellään esimerkiksi Tavnerin ja Penmanin kirjassa vuodelta 1987 [24]. Tässä kappaleessa tarkastellaan sähkökoneiden viimeaikaisen kunnonvalvontatutkimuksen painopistealueita.

4.1.1. Induktiokoneet ja -käytöt

Häkkikäämityn induktiokoneen pääasialliset vauriot ovat laakerivauriot, staattorikäämityksen vauriot ja roottorivauriot (katkenneet sauvat, rikkoontuneet päätyrenkaat) [24],[25]. Induktiokoneiden diagnostiikan piirteiden irrotusta ja luokittelua on tutkittu Lyonin yliopistossa Ranskassa [26]. LEEI:ssä (Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle) Toulouse'issa on tutkittu induktiomooottorin mekaanisten vikojen havaitsemista maximum likelihood –menetelmällä [27]. Vikojen luokittelua on tutkittu Suomessa Lappeenrannan teknillisellä yliopistolla (LTY) [28] ja Teknillisellä korkeakoululla (TKK) Espoossa [29]. TKK:lla on myös mallinnettu yhdessä VTT:n kanssa FEM-menetelmällä (Finite Element Method) sähkökoneiden vikoja (esim. [30]) ja neuroverkkojen hyödyntämistä induktiokoneiden diagnostiikassa [31].

Laakeridiagnostiikkaa on tutkittu laajalti. Manchesterin yliopistossa Englannissa on tutkittu laakerikunnonvalvontaa akustisen emission (AE) avulla [32]. Liverpoolin yliopistossa puolestaan on tutkittu geneettistä ohjelmointia (GP, genetic programming) luokittelussa ja piirteiden valinnassa käyttäen laakereiden kunnan luokittelua esimerkkinä [33]. Geneettinen ohjelmointi on evoluutioalgoritmityyppi, joka perustuu geneettisiin algoritmeihin (GA). Roannen yliopistollisessa teknologiainstituutissa (Institut universitaire de technologie de Roanne) Ranskassa on tutkittu epätahtikoneen laakerivaurioiden havaitsemista virtamittauksen perusteella hyödyntäen Wiener-suodatinta pienentämään verkkotaajuisen signaalin dynamiikkaa [34]. Georgia Institute of Technologyn (Atlanta, USA) tutkijat yhdessä Yhdysvaltain laivaston tutkijoiden kanssa ovat selvittäneet laakerivaurioiden aikaansaamista keinotekoisesti laakerivirtojen avulla [35]. Kyseisessä yliopistossa on tutkittu myös laakerivaurioiden havaitsemiseen staattorivirran spektrianalyysin perusteella [36]. Lappeenrannan teknillisellä yliopistolla on niin ikään tutkittu laakerivaurioiden havaitsemista staattorivirran perusteella hyödyntäen Gabor-suodattimia ja tilastollista luokittelua [37].

Roottorivaurioiden aiheuttamien virran taajuuskomponenttien käyttäytymistä kuormituksen funktiona sekä teoriassa että laboratoriokokein on selvitetty Modenan (Reggio Emilia) ja Parman yliopistoissa Italiassa [38]. Mainituissa yliopistoissa on myös selvitetty roottorivaurioiden vaikutuksia virran lisäksi värähtely- ja hajavuomittauksin [39]. Rio Grande do Sulin paavillisen katolisen yliopiston (PUCRS, Pontificia Universidade Católica do Rio Grande do Sul) tutkijat ovat vertailleet ei-parametristen, parametristen ja MUSIC-menetelmien (Multiple Signal Classification) suorituskykyä [40]. Tunisin luonnontieteellisen teknisen yliopiston (Ecole Supérieure des Sciences et Techniques de Tunis, Tunisia) ja Picardien yliopiston (Amiens, Ranska) tutkijat ovat vertailleet käytännön kokein roottorivaurioiden ja jännite-epätasapainon havaitsemiseen käytettäviä menetelmiä, kun mitataan staattorijännitettä, staattorivirtaa ja hajavuota [41]. Cruz ja Cardoso Coimbran yliopistosta Portugalista ovat selvittäneet roottorivaurioiden havaitsemista jännitevälipiiri-invertterillä syötetystä oikosulkukoneesta [42]. Santa Catarinan yliopiston (Universidade Federal de Santa Catarina) tutkijat Florianopoliksessa, Brasiliassa, ovat mallintaneet roottorisauvojen välisiä virtoja ja tutkineet niiden havaitsemista [43]. Pohjois-Carolinan yliopiston (USA) ja Sunchonin yliopiston (Etelä-Korea) tutkijat ovat puolestaan selvittäneet roottorisauvarikkojen havaitsemista induktiomoottorin virrasta PSD-menetelmällä (Power Spectral Density) tilastollisesti eri kuormitustilanteissa [44].

Staattorin tyypilliset vauriot ovat käämikierrosten väliset oikosulut ja vaiheiden väliset oikosulut. Staattorin käämikierrosten välisiä oikosulkuja ovat mallintaneet mm. Biskran yliopiston (Algeria) ja Henri Poincaré -yliopiston (Nancy, Ranska) [45], Texas A&M -yliopiston [46] sekä Marquette-yliopiston (Milwaukee, USA) [47] tutkijat. Nantesin yliopistossa Ranskassa on tutkittu induktiokoneiden staattorin eristysten kunnon valvontaa parametrien identifiointiin perustuen [48]. Staattori- ja roottorivaurioiden havaitsemista staattorivirran kulman vaihtelun perusteella on tutkittu Sussexin yliopistossa, Brightonissa, Englannissa [49]. Induktiomoottorin toimintaa kierrosten välisen oikosulun aikana ovat selvittäneet ja eri menetelmiä tämän tilanteen havaitsemiseksi vertailleet Oviedon yliopiston tutkijat Espanjassa [50]. Induktiokoneen staattorioikosulkuja ovat mallintaneet myös Napolin Federico II:n yliopiston ja l'Aquilan yliopiston tutkijat Italiassa [51]. Keskijännitealueen induktiokoneiden eristysten kuntoa valvovaa, ultralaajakaistaista (UWB, ultra-wide band) osittaispurkausmittausmenetelmää on tutkittu Instituto de Investigaciones Eléctricas – instituutissa Cuernavacassa Meksikossa [52].

Induktiomoottoreiden diagnostiikkaa on pääasiassa tutkittu suorien käyttöjen tapauksessa. Kun moottoria syötetään taajuusmuuttajalla, vaikeutena signaalianalyysissä ovat muuttajan tuottamat taajuuskomponentit virroissa ja jännitteissä. Lyonin Sähkötekniikan osaamiskeskuksessa (Centre de génie électrique de Lyon) on tutkittu moottorin kuormitustilan vaikutuksen eliminointia spektrianalyysissä [53]. Kuormitusmuutosten havainnointia ja mittausten validointia taajuusmuuttajasta saatavien mittatietojen perusteella on tutkittu Lappeenrannan teknillisellä yliopistolla [54]. Kuorman vaikutusta vikojen havaitsemiseen on analysoitu myös Georgia Institute of Technologyssa (Atlanta, USA), mutta suorien (taajuusmuuttajattomien) käyttöjen tapauksessa [55]. Taajuusmuuttajan hyödyntämistä moottorin parametrien (esim. staattoriresistanssi) arvioinnissa on tutkittu Natalin yliopiston (Durban, Etelä-Afrikan tasavalta) ja Georgia Institute of Technologyn yhteistyönä [56]. VSI-muuttajalla syötetyn induktiokoneen roottorin epäkeskisyyden aiheuttamien ilmväliepäsymmetrioiden havaitsemista välipiirin virta- ja jännitemittauksiin perustuen ovat tutkineet Wienin teknillisen yliopiston tutkijat (Technische Universität Wien) Itävallassa [57]. Samassa yliopistossa on myös tutkittu VSI-muuttajan tehoelektronikan diagnostiikkaa [58]. Ilmväliepäsymmetrioiden havaitsemista PI-säädetyssä induktiomoottorikäytössä

staattorijännitteen ja –virran perusteella on tutkittu Georgia Institute of Technologyssa [59]. Staattorikäämityksen vaurioiden havaitsemista PWM-invertterillä (Pulse Width Modulation) syötetystä induktiokoneesta on tutkittu Antioquian yliopistossa Kolumbiassa [60]. Coimbran yliopiston (Portugali) ja Texas A&M -yliopiston tutkijat ovat implementoineet DTC-muuttajalla (Direct Torque Control) syötetyn induktiomootorin staattorivaurioiden havaitsemiseen soveltuvan algoritmin muuttajan DSP-prosessorille (Digital Signal Processor) [61].

Eteläkorealaiset tutkijat KEPRI:stä (Korea Electric Power Research Institute) ja verkkoyhtiö KEPCO:sta (Korea Electric Power Company) ovat mallintaneet ja analysoineet tuulivoimakäytössä itsemagnetoivan induktiogeneraattorin (self-excited induction generator, SEIG) vikoja, ja erityisesti magnetointikondensaattorin kapasitanssin arvon vaikutusta verkon häviämisen tai vian aiheuttaman ylijännitteen suuruuteen [62]. Tuulivoimakäytössä (ja esimerkiksi pienvesivoimakäytössä) yleisten pienjänniteinduktiogeneraattoreiden staattorivaurioiden diagnostiikkaa on tutkittu Baskimaan yliopiston (Bilbao ja Donostia) ja Cadizin yliopiston yhteistyönä Espanjassa [63].

4.1.2. Muut koneet

Tahtikoneiden diagnostiikalla on pitkä historia. Diagnostiikkaan on kannattanut panostaa, koska tahtikoneet ovat teholtaan tyypillisesti suuria ja niiden käyttökätkot aiheuttavat suuria taloudellisia menetyksiä niin moottori- kuin generaattorikäytöissäänkin. Diagnostiikkamenetelmät ovat pääasiassa samoja kuin edellä läpikäytyjen epätahtikoneidenkin tapauksessa, mutta staattorivaurioiden havaitsemiseen etenkin keski- ja suurjännitekoneissa käytettävät osittaispurkausmittaukset ovat merkittävämmässä asemassa.

Georgia Institute of Technologyn tutkijat yhdessä Etelä-Afrikan tasavallan rautatieyhtiön (Spoornet) tutkijoiden kanssa ovat selvittäneet roottorivaurioiden havaitsemista kestomagneettitahtikoneissa [64]. Kestomagneettitahtikoneita hybridi-autokäytössä on tutkittu Arkansas'n yliopistossa Fayettevillessä, Yhdysvalloissa [65]. Kestomagneettitahtikoneiden staattorivikoja on mallinnettu LEEI:ssä Toulouse'issa yhteistyössä Alstom Transport:n kanssa [66]. Kestomagneettitahtimoottorien diagnostiikkaa on selvitetty myös Floridan yliopistossa (Florida State University) tarkastetussa väitöstudiumuksessa [67].

Harjattoman tahtigeneraattorin kenttäkäämityksen ja pyörivän suuntaajan diagnostiikkaa ovat tutkineet Pennsylvanian yliopiston (Penn. State University) tutkijat Yhdysvalloissa [68]. ENSIEG:ssä (l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Electriciens de Grenoble) Grenoblessa, Ranskassa, on tutkittu tahtigeneraattoreiden roottorivaurioiden havaitsemista matalataajuisen hajavuon mittaukseen perustuen [69]. Coimbran yliopistossa Portugalissa on tutkittu tahti- ja epätahtikoneiden staattorivaurioiden havaitsemista EPVA-menetelmällä (Extended Park's Vector Approach) erityisesti suuritehoisilla tahtigeneraattorikäyttöillä [70].

Reluktanssimoottorit (SR-moottori, switched reluctance motor) ovat tyypillisesti hyvin luotettavia, eivät kuitenkaan täysin vikaantumattomia. Käämitysoikosulkujen havainnointia ja vioista selviämistä ovat tutkineet Delphi Research Labsin tutkijat Michiganissa Yhdysvalloissa [71].

Tasavirtakoneita ja –käyttöjä on viime vuosina tutkittu huomattavasti vähemmän kuin tahtikoneita ja etenkin induktiokoneita. Rensselaerin polyteknisen instituutin (NY, USA) yhteistyössä General Electricin ja Power Technologies Inc.:n tekemässä tutkimuksessa on selvitetty kipinöinnin havaitsemista harjallisesta DC-koneesta ankkurivirran wavelet-analyysin perusteella [72]. Harjattomat DC-koneet muistuttavat läheisesti

kestomagneettitahtikoneita, mutta niiden ilmvälivuontiheys ei ole sinimuotoisesti jakautunut. Harjallisessa DC-koneessa kommutointi tehdään harjoilla ja harjattomassa tehoelektronikalla. Harjattomien DC-koneiden diagnostiikkaa roottorivaurioiden osalta on tutkittu Georgia Institute of Technologyssa [73].

4.2. Tiedonkeruu ja diagnostiikkakonseptit

Varsinaisiin diagnostiikkakonsepteihin liittyvä tutkimus on ollut diagnostiikkamenetelmiin ja -algoritmeihin liittyvään tutkimukseen verrattuna vähäistä.

Politecnico di Milanon (Milano, Italia) ja Etelä-Carolinan yliopiston (Columbia, USA) tutkijat ovat kuvanneet järjestelmää, jossa voidaan yhdistää mitattuun dataan simuloitu data, jota voidaan hyödyntää erityisesti diagnostiikkajärjestelmän opetusvaiheessa [73]. Signaalipohjaisten ja mallipohjaisten vikadiagnostiikkajärjestelmien kompleksisuutta ja suorituskykyä ovat vertailleet Texas A&M -yliopiston tutkijat yhdessä Honeywellin teknologiakeskuksen (Honeywell Technology Center) kanssa [74]. Bolognan (Italia) ja Picardien (Ranska) yliopistojen tutkijat ovat esittäneet modulaarisen virtuaalialustan sähkökäyttöjen etädiagnostiikan toteuttamiseksi ja algoritmien testaamiseksi [75],[76].

4.3. Hankkeita

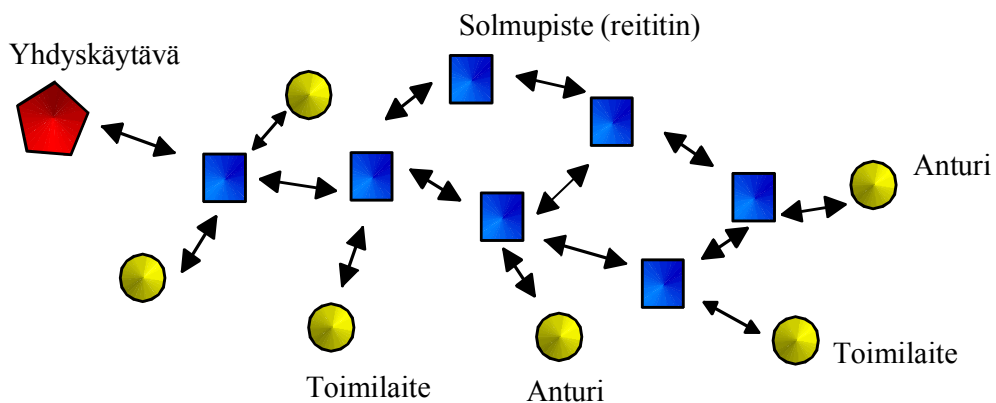
Esimerkkinä tämänhetkisestä tutkimushankkeesta mainittakoon Kungliga tekniska högskolanin (KTH) sähkövoimatekniikan osaamiskeskuksessa (Centre of Excellence in Electric Power Engineering) Tukholmassa käynnissä oleva, vuodet 2006-2009 kattava tutkimushanke "Diagnostics of electrical machine and drive for condition based maintenance" [77]. Tutkimuksen tavoitteena on kehittää menetelmiä sähkökäytön kunnan diagnostisointiin saatavilla olevien mittatietojen perusteella. Hanke liittyy läheisesti saman laitoksen projektiin "Maintenance management", joka jakautuu edelleen useisiin alitehtäviin [78]. Nämä osatehtävät käsittelevät mm. sähkönjakelujärjestelmien luotettavuuden mallintamista (muuntajat, verkot), sähkökoneiden eristysten diagnostiikkaa, osittaispurkausten mallintamista, kunnossapitostrategioita sekä tietojärjestelmiä ja datan abstraktointia luotettavuustietojen yhteydessä. Teollisia yhteistyökumppaneita ovat mm. Bombardier (lentokoneet, junat), ITT Flygt (uppopumput), ABB ja Vattenfall.

5. LAITEDIAGNOSTIIKKAAN LIITTYVIEN MENETELMIEN TUTKIMUS KANSAINVÄLISESTI

Tässä luvussa tarkastellaan joidenkin diagnostiikkaan liittyvien (esim. algoritmit) tai sitä tukevien (esim. tiedonsiirto) menetelmien tutkimusta kansainvälisesti.

5.1. Lyhyen kantaman radiotekniikat ja verkot

Langattoman tiedonsiirron potentiaaliset sovellukset teollisuudessa voidaan jakaa kolmeen ryhmään: laitteen tai järjestelmän konfigurointi, tiedon siirtäminen antureilta (monitorointi) ja laitteen tai järjestelmän ohjaus. Kahdessa ensimmäisessä muutaman sadan millisekunnin viiveet tiedonsiirrossa eivät ole ongelmallisia, ja ne ovat usein myös käyttäjän kannalta täysin huomaamattomia. Sen sijaan ohjaussovelluksissa tiedonsiirrolta vaaditaan suurempaa luotettavuutta ja pieniä tai ainakin tasaisia viiveitä. Tämän lisäksi langattomaan tiedonsiirtoon liittyviä ongelmia ovat muun muassa yhteyden toimivuus, tietoturva-asiat ja laitteiden tehonsyöttöön liittyvät kysymykset [79]. Langattomien tekniikoiden etuja ovat muun muassa liikkuvuus, skaalautuvuus ja helpompi asennettavuus vaikeissa olosuhteissa, joissa kaapelien asentaminen tulisi kalliiksi (jopa 6000 dollaria/metri) [80]. Kuvassa 5.1 on esimerkki langattomasta verkosta, jossa on antureita, toimilaitteita, reitittimiä ja yhdyskäytävä esimerkiksi kenttäväylään. Laitteiden määrää voidaan yksinkertaisesti lisätä tai vähentää, ja yhteyksien toimivuuden varmistamiseksi tieto voidaan reitittää useaa eri reittiä pitkin vastaanottajalle.



Kuva 5.1 Esimerkki langattomasta verkosta.

Teollisuudessa tiedonsiirtoon on laajalti käytetty erilaisia kenttäväyliä, esimerkkeinä Profibus, WorldFIP ja CAN (Controller Area Network), joissa tieto siirretään johtimia pitkin. Tärkeimpänä ominaisuutena on taata luotettava reaaliaikainen yhteys, jossa viiveet tiedonsiirrossa ovat ennustettavia. Näistä syistä kenttäväylien korvaaminen tai osittainkin korvaaminen langattomilla tekniikoilla ei ole yksinkertaista, eikä nykyisellään aina täysin mahdollistakaan. Langattomilla tekniikoilla on kuitenkin kiistattomia etuja teollisuuden tiedonsiirrossa, ja tästä johtuen on syntynyt useita erilaisia langattomia tekniikoita, jotka poikkeavat esimerkiksi tehontarpeen, tiedonsiirtonopeuden, luotettavuuden ja verkon koon perusteella toisistaan. Lähteessä [81] on erinomainen pohjustus langattomien tekniikoiden ongelmiin teollisuusympäristössä ja niiden soveltumiseen esimerkiksi kenttäväylän

korvaamiseen. Muutamien langattomien tekniikoiden soveltumista Profibus-kenttäväylän korvaamiseksi on tarkasteltu lähteessä [82]. Alla on lyhyesti esitetty näistä langattomista tekniikoista yleisimpiä:

5.1.1. Langaton Ethernet (IEEE 802.11)

Langattoman Ethernetin käyttöönotto teollisuudessa on nykyisellään samassa tilanteessa kuin langallisen Ethernetin käyttöönotto muutama vuosi sitten. Monet niistä huolista, jotka liittyivät Ethernetin käyttöön teollisuudessa aiemmin, ovat nyt huolenaiheena langattoman Ethernetin käyttöönotossa. Erityisen ongelmallista on ei-reaaliaikaisuus tiedonsiirrossa, mutta tähänkin on saatu parannusta standardin IEEE 802.11e myötä, joka lisää QoS-mekanismien (Quality of Service) [79]. IEEE 802.11:n käyttämisestä teollisuuden anturoinnissa on tutkittu lähteissä [83] ja [84]. Lähteessä [85] on tutkittu tekniikan toimivuutta teollisuusympäristössä. Langattomia Ethernet-laitteita on saatavilla useilta eri valmistajilta, lisäksi se on nykyään integroitu usein kannettaviin mobiililaitteisiin, kuten tietokoneisiin ja puhelimiin.

5.1.2. Bluetooth (IEEE 802.15.1)

Bluetooth on alun perin tarkoitettu korvaamaan tiedonsiirtokaapelit kahden laitteen välillä. Bluetoothin standardoinnista ja kehittämisestä vastaa Bluetooth Special Interest Group (SIG), joka julkaisi spesifikaation version 1.0 vuonna 1999 [86]. Uusin versio 2.0 julkaistiin vuonna 2004. Bluetooth-laitteet voidaan jakaa lähetystehon perusteella kolmeen eri luokkaan, ja kantama avoimessa tilassa vaihtelee vastaavasti noin 1-100 metrin välillä. Tiedonsiirtonopeus versiossa 1.2 on jopa 1 Mbps, versiossa 2.0 jopa 3 Mbps [87]. Bluetooth-yhteys on nykyään integroituna useimpiin matkapuhelimiin ja tietokoneisiin. Lisäksi sitä käytetään tiedonsiirtoon monissa muissakin kuluttajaelektronikan laitteissa kuten kameroissa, musiikkisoittimissa ja peliohjaimissa. Bluetoothin käyttöä teollisuudessa on tutkittu lähteissä [88],[89] ja [90].

5.1.3. ZigBee (IEEE 802.15.4)

ZigBee on suunnattu erityisesti kotiautomaatioon ja teollisuuden anturointiin. Se pohjautuu IEEE-standardiin 802.15.4 ja mahdollistaa pienitehoisten ja edullisten langattomien laitteiden tekemisen. ZigBeen spesifikaatio 1.0 julkaistiin vuonna 2004, joten se on huomattavasti nuorempi tekniikkana kuin Bluetooth [91]. Se ei kuitenkaan suoranaisesti kilpaile Bluetoothin kanssa, vaan pyrkii tarjoamaan vaihtoehdon erityisesti laitteisiin, joilta vaaditaan erittäin pientä tehonkulutusta tai suuria verkkokokoja. Vertailua Bluetoothin ja ZigBeen ominaisuuksista teollisuudessa löytyy lähteestä [92]. ZigBee-laitteet on jaettu kolmeen eri tyyppiin niiden ominaisuuksien perusteella. Tehon säästämiseksi ZigBee tarjoaa useita mahdollisuuksia, esimerkiksi laitteiden asettamisen lepotilaan halutuksi ajaksi. ZigBee käyttää taajuusalueita 868 MHz, 915 MHz ja 2,4 GHz, ja vastaavat tiedonsiirtonopeudet ovat 20, 40 ja 250 kbps. Tekniikka mahdollistaa suurten, useiden satojen ZigBee-laitteiden muodostaman verkon, jossa laitteet voivat kommunikoida keskenään [93]. Tekniikan läpilyöntiä odotettiin jo viime vuodelle, ja usea valmistaja toikin markkinoille ZigBee-radioita ja -protokollia. Varsinaiset hyödyntävät sovellukset ovat vielä kuitenkin lukumäärältään vähäisiä, mutta on oletettavaa, että niitä nähdään runsaasti kuluvan vuoden aikana. ZigBeen käyttöä teollisuudessa on tutkittu muun muassa lähteessä [94], jossa on tehty ZigBeetä käyttävä 4-20 mA -instrumenteilta tietoa siirtävä verkko ja testattu sitä teollisuuslaitoksissa. Lähteessä [95] on mitattu teollisuuslaitoksessa IEEE 802.15.4 -standardin mukaisia radioita.

5.1.4. UWB (Ultrawideband)

UWB-tekniikoilla tarkoitetaan yleensä tiedon lähettämistä käyttäen hyvin laajaa kaistaa (>500 MHz). Teollisuudessa tämä tekniikka mahdollistaa spektrin tehokkaamman hyödyntämisen ja jakamisen muiden tekniikoiden kanssa, paremman tiedon monitie-etenemisen aiheuttamia ongelmia vastaan ja suuremmat tiedonsiirtonopeudet (jopa >1 Gbps). Tekniikka on kuitenkin vielä kehitteillä, ja monissa maissa on menossa vasta määrätykset, millä taajuusalueella ja millä lähetystehoilla tekniikkaa voidaan käyttää. Prototyypilaitteita on kuitenkin jo ollut saatavilla valmistajilta [96].

5.1.5. Muut lyhyen kantaman tekniikat

Yllä mainittujen tekniikoiden lisäksi markkinoilta löytyy useita erilaisia valmistajakohtaisia ja muita pienemmän suosion saavuttaneita langattomia tekniikoita. Osa tekniikoista hyödyntää esimerkiksi standardia 802.15.4 protokollan alimpina tasoina, mutta ylemmän tason kerrokset ovat valmistajakohtaisia. Markkinoilla on myös lukuisia erilaisia langattomia kenttävyölyratkaisuja. Mielenkiintoisena tulevana tekniikkana voidaan pitää WirelessHART:ia, joka julkaistaan vuoden 2007 aikana, ja ensimmäisiä sitä tukevia tekniikoita odotetaan vuoden 2008 aikana [97]. Muutamia muita potentiaalisia tulevia tekniikoita ovat muun muassa Bluetoothia tukeva ja osittain samaa tekniikkaa hyödyntävä Wibree [98], langallisen USB-yhteyden (Universal Serial Bus) langaton vastine WirelessUSB [99] ja WirelessHD [100], joka on tarkoitettu nopeaan tiedonsiirtoon kuluttajalaitteiden välillä.

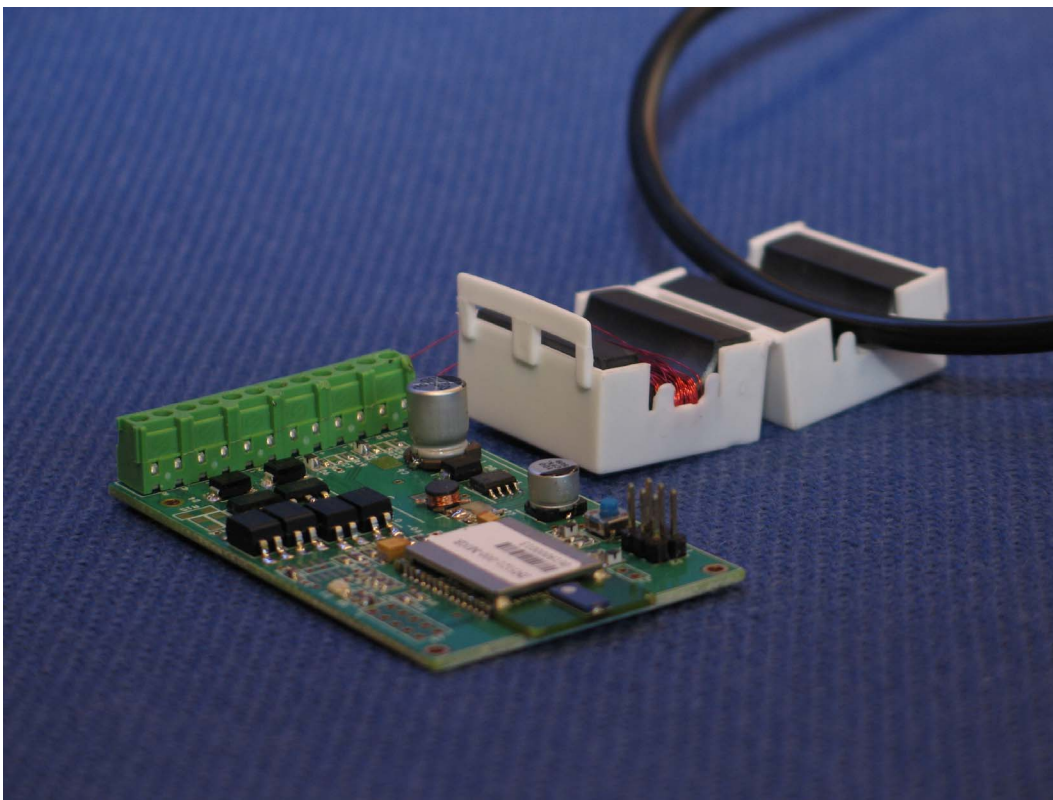
5.1.6. Alan tutkimus ja tulevaisuus

Lyhyen kantaman radiotekniikat ovat yksi erittäin laajasti ja aktiivisesti tutkituista osa-alueista nykyään. Alaan liittyvää tutkimusta on maailmanlaajuisesti useissa eri yliopistoissa, ja tekniikkaa valmistavia ja hyödyntäviä yrityksiä on satoja. Esimerkkinä mainittakoon ZigBee Alliance, jossa jäseniksi on rekisteröitynyt jo yli kaksisataa yritystä [91]. Kehitys tulee oletettavasti olemaan hyvin voimakasta edelleen tällä osa-alueella.

5.2. Tehon louhinta ympäristöstä

Teollisuudessa tiedonsiirtoon on pääasiassa käytetty langallisia tiedonsiirtoyhteyksiä. Tällöin on samassa kaapelissa usein signaalijohtimien lisäksi myös tehonsyöttöjohtimet. Esimerkiksi anturilta siirrettävä mittaustieto kulkee samassa kaapelissa kuin sen tarvitsema teho. Tiedonsiirron muuttuessa langattomaksi tehonsyöttö on muodostunut ongelmaksi. Ei ole järkevää tai välttämättä mahdollistakaan asentaa laitteelle erillistä tehonsyöttökaapelointia. Tästä johtuen tehonhallinta on muodostunut tärkeäksi osa-alueeksi, joka voidaan edelleen jakaa kolmeen osa-alueeseen: laitteen tarvitseman tehonkulutuksen pienentäminen, tehollisten (esimerkiksi paristojen) kapasiteetin parantaminen ja tehon louhinta ympäristöstä [101]. Laitteen tarvitsemaa tehoa voidaan pienentää esimerkiksi sammuttamalla laite tai osa laitteesta, kun sitä ei tarvita. Esimerkiksi langattomassa tiedonsiirrossa vastaanotin voidaan aktivoida aina tietyin aikaväleihin vastaanottamaan dataa, jolloin se voi olla suurimman osan ajasta pois päältä. Tehollisten kapasiteetin kasvattaminen on toinen mahdollinen ratkaisu, mutta usein koko ja paino asettavat rajoituksia. Kehitystä tälläkin osa-alueella on tapahtunut, ja esimerkiksi polttokennot ovat yksi ratkaisu tarvittaessa suurempia tehotehyyksiä [102].

Teollisuudessa paristokäyttöiset laitteet eivät välttämättä tule kysymykseen niiden tarvitseman säännöllisen huollon takia. Ympäristössä on usein kuitenkin erilaisia energialähteitä, joista tehoa voidaan louhia eli muuntaa langattomalle toimilaitteelle sopivaksi. Tehoa saadaan ympäristöstä suuriakin määriä tuuliturbiineilla tai aurinkopaneeleilla. Nämä ovat käytännöllisiä esimerkiksi jossain syrjäisessä kohteessa, mutta eivät välttämättä sovellu pienitehoisten teollisuudessa käytettävien langattomien laitteiden teholähteeksi [103]. Yksi yleisesti käytössä olevista tehonsiirtoa tai -louhintaa hyödyntävistä teollisuudessa jo laajalti käytössä olevista tekniikoista on RFID-tekniikka (Radio Frequency Identification), jossa tehoa siirretään langattomasti joko induktiivisella kytkennällä tai radioaaltoina [104]. Eräs ratkaisu tehon louhimiseksi induktiivisesti sähkömoottorin syöttökaapeleista on esitetty lähteessä [105]. Kuvassa 5.2 on esitetty tällainen langaton anturi, joka saa tehonsa induktiivisella kytkennällä.



Kuva 5.2 Induktiivisesti tehon ympäristöstä sieppaava langaton anturi.

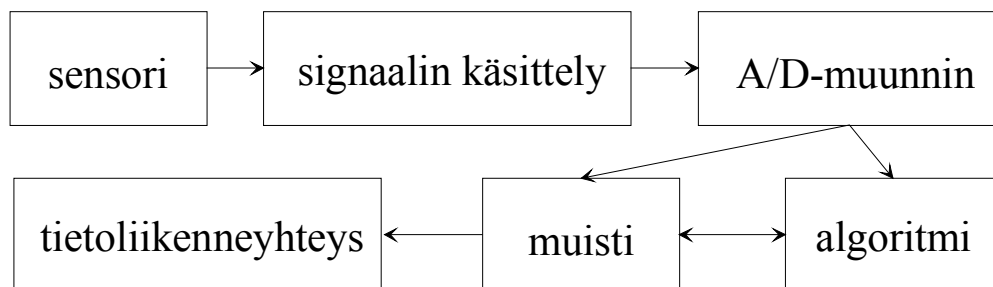
Teollisuudessa esiintyy myös useita muita energialähteitä, joita voidaan hyödyntää energian louhimiseen. Esimerkiksi lämpötilaeroja ja värinää voidaan hyödyntää. Värinän ja liikkeen hyödyntämiseen liittyviä tekniikoita on esitelty lähteessä [106] ja [102]. Jälkimmäisessä on esitelty myös lämpöpareja, joilla voidaan kappaleiden välinen lämpötilaero muuttaa soveltuvaksi energialähteeksi langattomalle laitteelle.

5.3. Älykkäät anturit ja algoritmien sulauttaminen

Ei-älykkäänä anturina voidaan pitää mitä tahansa anturia, josta mittaustieto saadaan käsittelemättömänä analogiasignaalinä. Analogisen signaalin digitointi ja jatkokäsittely

tapahuu esimerkiksi mittalaitteessa, johon on kytketty useita tällaisia analogisen mittasignaalin antavia ei-älykkäitä antureita. Älykkääksi anturiksi voidaan taas luokitella sellainen anturi, jossa mittaussignaali digitoidaan ja mahdollisesti analysoidaan itse anturissa. Tällaisen älykkään anturin lähtönä voi esimerkiksi olla digitaalinen viesti mitattavan laitteen tilasta ja mahdollisesti arvio ajasta ennen laitteen vikaantumista, mikäli anturi esimerkiksi valvoo laitteen kuntoa. Älykkääseen anturiin, jollainen on esitetty lohkokaaaviona kuvassa 5.3, voidaan ajatella kuuluvan seuraavat osa-alueet [107]:

- Sensori mitattavan suureen mittaamiseksi.
- Signaalin käsittelyyn liittyvä elektroniikka, esimerkiksi signaalin vahvistaminen tai suodatus.
- A/D-muunnin analogisen signaalin digitoimiseksi
- Muisti digitaalisen signaalin tallentamiseksi jatkokäsittelyä tai tiedonsiirtoa varten.
- Sovelluskohtaiset algoritmit mitatun signaalin käsittelemiseksi. Näitä voidaan ajatella varsinaisesti anturin ”älynä”.
- Tietoliikenneyhteys esimerkiksi kenttäväylään anturin tuloksen välittämistä varten. Voi olla myös yksinkertainen käyttöliittymä, esimerkiksi valo joka ilmaisee anturin mittaaman laitteen tilan.



Kuva 5.3 Älykkääseen anturiin liittyvät osa-alueet.

Älykkäät anturit ovat tulleet mahdollisiksi edullisten ja nopeiden A/D-muuntimien sekä lisääntyneen laskentatehon ansiosta. Tämä mahdollistaa digitaalisen signaalinkäsittelyn jo anturissa, jolloin anturin ominaisuuksia voidaan ohjelmallisesti muokata. Esimerkiksi automaattikalibrointi, itsediagnostiikka ja algoritmien vaihtaminen käyttökohteen mukaan voidaan sisällyttää anturiin [108]. Lähteessä [109] on esitetty ja käytännössä kokeiltu yleiskäyttöistä langatonta älyanturia, mikä on tarkoitettu teollisuuden monitorointi- ja ohjaustoimintoihin. Kaupallisestikin on jo saatavilla eriaisteisia älyantureita, jotka sisältävät osan tai kaikki yllämainituista ominaisuuksista.

Tulevaisuutta ovat kuitenkin varsinaiset langattomat älyanturiverkot, joissa yhdistyvät kappaleessa 4.1 mainitut langattomat tiedonsiirtotekniikat ja mahdollisesti kappaleessa 4.2 mainittu tehon louhinta ympäristöstä. Tällainen useista kymmenistä tai sadoista toisiinsa yhteydessä olevista älyantureista muodostuva verkko voi kerätä tietoa laajalta alueelta, suorittaa tiedon prosessointia ja muodostaa tämän perusteella huomattavasti aiempaa tarkempaa mittaustulosta tai pidemmälle analysoidun tuloksen [110]. Trendinä on kehittää antureista yhä pienempiä ja sellaisia, jotka pystyvät kaappaamaan tarvitsemansa energian ympäristöstä ja muodostamaan automaattisesti langattoman yhteyden lähistöllä sijaitsevien

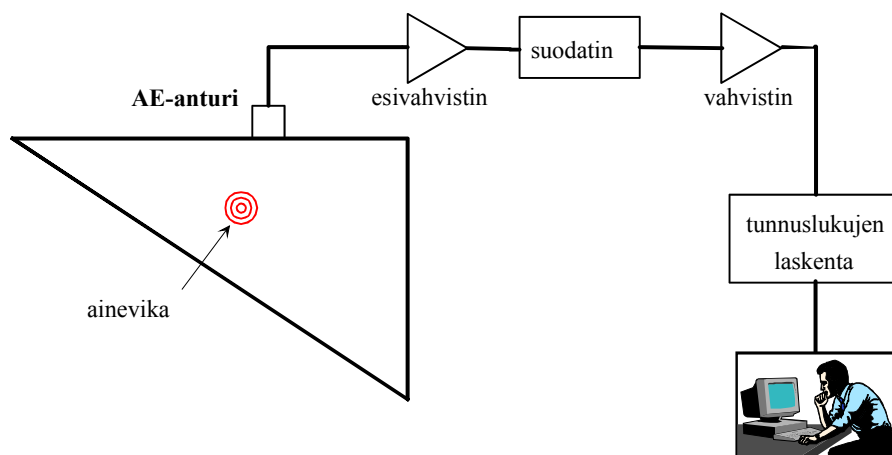
muiden antureiden kanssa. Tästä käytetään usein termiä älypöly (smart dust) kuvaamaan mahdollista tulevaisuuden visiota, missä antureita voitaisiin heittää ympäristöön ja ne automaattisesti alkaisivat toimia halutulla tavalla [111].

5.4. Mittausmenetelmät

Erilaiset mittaukset ovat välttämätön osa laitediagnostiikkaa, sillä ne antavat informaatiota tarkkailtavan laitteen ominaisuuksista ja toiminnasta. Tässä luvussa tutustutaan joihinkin laitediagnostiikkaan soveltuviin mittausmenetelmiin ja niihin liittyvään tutkimustoimintaan. Kunkin menetelmän osalta perehdytään sen toimintaan, tutkimustyöhön sekä kaupallisesti saatavissa oleviin tuotteisiin. Lisäksi luvussa arvioidaan tulevaisuuden haasteita kunkin menetelmän osalta.

5.4.1. Akustinen emissio

Akustisella emissiolla (AE) tarkoitetaan suuritaajuisia (25 kHz - 1 MHz) stressiaaltoja, joita muodostuu esimerkiksi höyrykuplien hajoamisen tai tarkkailtavassa kohteessa olevien ainevikojen (korroosio, särönkasvu) johdosta [112] [113]. Viat tulevat aktiivisiksi kuormituksen alaisina, jolloin ne ovat havaittavissa akustista emissiota kuvaavien tunnuslukujen kasvuna pietsosähköisellä anturilla mitatussa signaalissa [114]. Tyypillinen AE:n mittauslaitteisto koostuu anturin ohella suodatukseen ja tunnuslukujen laskemiseen käytettävästä elektroniikasta kuvan 5.4 mukaisesti.



Kuva 5.4 Akustisen emissioon mittaamiseen käytettävä laitteisto. Pietsosähköisen anturin mitaama signaali suodatetaan ja vahvistetaan tunnuslukujen laskemista varten. [114]

Akustisen emission suuruutta kuvataan muun muassa AE-aallon sisältämän energian, amplitudin sekä kynnyksen ylittävien pulssien lukumäärän avulla. Nykyisin parametreista käytetään tavallisimmin energiaa kuvaamaan AE:n yleistä aktiivisuutta. [114]

Akustisen emission etuihin kuuluu muun muassa sen soveltuvuus alkavien vikojen havaitsemiseen sekä laakereiden voitelutarpeen määrittelyyn [112] [115] [116]. Akustisen emission huonoja puolia ovat AE-signaalin vaimeneminen sekä heijastumiset, jotka lisäävät menetelmän alttiutta ulkoisille häiriöille. AE:n käyttöön laitteiden kunnonvalvonnassa on perehdytty muun muassa lähteissä [117] [118].

Konferenssit ja tutkimustyö. Akustiseen emissioon liittyviä konferensseja ovat muun muassa Euroopassa neljän vuoden välein järjestettävä EWGAE (European Working Group on Acoustic Emission) ja yhdysvaltalaisen järjestämä AEWG (Acoustic Emission Working Group) [119] [120]. Tämän ohella akustiseen emissioon liittyvää tutkimusta esitellään kunnonvalvontaan sekä tribologiaan liittyvissä konferensseissa [121] [122]. Lisäksi emissioon liittyviä tutkimustuloksia esitellään esimerkiksi lehdissä ”Journal of Acoustic Emission” sekä ”International Journal of COMADEM” (Condition Monitoring and Diagnostics Engineering Management) [121]. Julkaisutoiminnan ohella akustista emissiota tutkitaan laajalti eri yliopistoissa sekä yrityksissä ([116], [124]..[126]).

Kaupalliset tuotteet. Markkinoilla olevien AE-laitteistojen lukumäärä on värähtelymittauslaitteistoihin verrattuna vielä varsin vähäinen. Tunnettuja antureiden ja analysointilaitteiston valmistajia ovat yhdysvaltalainen Physics Acoustic Corporation [126], saksalainen Vallen [127] sekä englantilainen Holroyd [128]. Lisäksi saatavilla on pienempien sekä kunnonvalvontaan erikoistuneiden yritysten, kuten AV Technologyn [129], laitteistoja.

Tulevaisuuden näkymät. Tutkimustulosten perusteella akustisen emission hyödyntämisen laitediagnostiikassa voisi olettaa jatkossa lisääntyvän. Koska AE mahdollistaa joidenkin vikojen havaitsemisen värähtelymittauksia aikaisemmassa vaiheessa ja esimerkiksi kavitoinnin havaitsemisen, tullaan sitä käyttämään enemmän kohteissa, joissa antureiden hinta ei ole kriittinen tekijä. Vielä tällä hetkellä tavallisten värähtelyantureiden halvempi hinta sekä standardoidut mittausmenetelmät (esim. tärinärasitus raja-arvoineen) pitävät AE-mittaukset ”altavastajaan” roolissa. Yhtenä mahdollisena näkymänä onkin kannettavien mittalaitteiden yleistyminen, jolla voitaisiin mitata sekä värähtelyä että akustista emissiota. Pidemmällä ajanjaksolla AE:n yleistyminen osana etäkunnonvalvontaa vaatii luotettavia luokittelumenetelmiä vikatilanteiden havaitsemiseen.

5.4.2. Kiihtyvyyden mittaaminen

Kiihtyvyys on yksi värähtelyn voimakkuuden kuvaamiseen käytettävistä suureista. Kiihtyvyydsmittauksia käytetään laajalti laitediagnostiikassa, sillä niiden avulla voidaan huomata alkavassa vaiheessa olevat viat sekä huoltoa vaativat kohteet [130]. Kiihtyvyyden mittaaminen yhdistettynä esimerkiksi verhoikäyrämenetelmään mahdollistaa muun muassa laakerivikojen havaitsemisen [131].

Kiihtyvyydsanturit ovat tyypillisesti pietsosähköisiä tai mikrotyöstettyjä kiihtyvyydsantureita [132], joihin perehdytään luvussa 5.4.3. Pietsosähköisten antureiden toiminta perustuu anturissa olevaan massaan, johon on kiinnitetty pietsosähköinen kide. Massan kiteeseen vaikuttava voima on verrannollinen anturiin kohdistuvaan. Tällöin kiteeseen muodostuva varaus tai jännite vastaa anturin kiihtyvyyden arvoa. [133]

Kiihtyvyydsmittausten tunnuslukuina käytetään muun muassa kiihtyvyyden tehollis- ja huippuarvoja sekä huippukerrointa. Aikatason analyysien ohella kiihtyvyydsmittauksille tehdään tavallisesti erilaisia taajuustason analyyseja, joista tyypillinen esimerkki taajuusspektrin ohella on kiihtyvyyssignaalin verhoikäyräspektrin määrittäminen [133].

Verhoikäyrämenetelmä soveltuu muun muassa laakereiden sekä sähkömoottoreiden kunnonvalvontaan. Menetelmässä mitatusta kiihtyvyyssignaalista kaistanpäästösuodatetaan laitteen resonanssitaajuutta vastaava kaista, joka tasasuunnataan pieniamplitudisten komponenttien esille saamiseksi. Tämä onkin verhoikäyrämenetelmän eduista, sillä laakereiden vikataajuuksien erottaminen kiihtyvyyssignaalin taajuusspektristä voi muutoin olla mahdotonta. [131] [133]

Yleisesti kiihtyvyyssmittausten etuina voidaan pitää antureiden halvempaa hintaa AE-laitteistoihin verrattuna. Lisäksi kiihtyvyyssmittausten analysointiin on käytettävissä erilaisia luokittelumenetelmiä sekä algoritmeja hyödyntäviä ohjelmistoja [136]. Menetelmiin perehdytään tarkemmin luvussa 5.5.

Konferenssit ja tutkimustyö. Kiihtyvyyden mittaamiseen liittyviä tutkimustuloksia esitetään usein erilaisissa kunnonvalvontaan ja värähtelyilmiöihin liittyvissä konferensseissa, joista esimerkkeinä mainittakoon CMD (Condition Monitoring and Diagnosis) [137], COMADEM [121] sekä ICOVP (International Conference on Vibration Problems) [138]. Tämän ohella kiihtyvyyssmittausten käyttöön on perehdytty mm. lehdissä ”International Journal of COMADEM” sekä ”Journal of Sound and Vibration” [139].

Kiihtyvyyssmittauksiin ja kunnonvalvontaan liittyvää tutkimusta tehdään Suomessa muun muassa Lappeenrannan teknillisellä [140] ja Oulun yliopistolla [141] sekä VTT:llä. Maailmanlaajuisesti kiihtyvyyssmittauksia käyttävää tutkimusta tehdään muun muassa Manchesterin [142] ja Nottinghamin [143] yliopistoissa.

Kaupalliset tuotteet. Kiihtyvyyssmittausten yleisyys on havaittavissa markkinoilla olevien tuotteiden lukumäärästä. Yksistään pietsosähköisiä antureita on tarjolla useilta valmistajilta. Esimerkkeinä mainittakoon SKF [144], Wilcoxon [145], Kistler [146] sekä Metra [147]. Lisäksi ko. valmistajilta löytyy erilaisia monitorointi- sekä analysointilaitteita sekä ohjelmistoja, jotka mahdollistavat laitteiden etäkunnonvalvonnan.

Tulevaisuuden näkymät. Kiihtyvyyssmittauksia tullaan jatkossakin käyttämään kunnonvalvonnassa, sillä niiden avulla voidaan havaita useita erilaisia vikatyyppejä. Etäkunnonvalvonnan yleistymisen myötä kiihtyvyyssmittausten rooli kasvaa mahdollisesti entisestään. Erityisesti mikroantureiden halpenemisella sekä koneiden lisääntyvällä älykkyydellä voi olla kiihtyvyyssmittausten määrää kasvattava vaikutus. Kiihtyvyyssmittausten suurimmaksi ongelmaksi voi tällöin muodostua sellaisten automaattisten luokittelu- ja asiantuntijajärjestelmien puute, jotka osaisivat määritellä laitteen kunnan riittävän luotettavasti. Luokittelumenetelmiin sekä –algoritmeihin perehdytään tarkemmin luvussa 5.5.

5.4.3. Mikroanturit

Mikroantureilla tarkoitetaan MEMS-teknologiaan (Micro-Electro-Mechanical System) perustuvia, mikropiirille toteutettuja mitta-antureita [148]. Mikroantureilla on lukuisia etuja, minkä vuoksi ne ovat yleistyneet erilaisissa mittaussovelluksissa [149] [150]. Antureiden edullinen hinta, helppo integroitavuus osaksi elektroniikkajärjestelmää sekä yksinkertainen käyttö ovat edistäneet mikroantureiden käyttöä muun muassa autoissa sekä rannetietokoneissa [151]. Koska mikroanturit perustuvat puolijohteen työstämiseen lasersäteellä, voivat anturit olla hyvinkin pieniä [149] [152].

Mikrotyöstetyt anturit voivat mitata niin painetta, värähtelyä kuin lämpötilaakin. Tämän vuoksi mikroantureita käytetään nykyisin erilaisissa kunnonvalvontajärjestelmissä [153].

Konferenssit ja tutkimustyö. Mikroantureihin liittyvä tutkimus voidaan jakaa itse anturitekniikan kehitykseen sekä anturisovellusten kehittämiseen. Anturitekniikkaan keskittyviä konferensseja sekä lehtiä ovat muun muassa IEEE MEMS [154], IEEE Sensors [155], ”Journal of Microelectromechanical Systems” sekä ”Journal of Micromechanics and Microengineering” [156]. Mikroantureita tutkitaan julkaisujen perusteella aktiivisesti mm. Nanyangin teknillisessä yliopistossa [156] sekä Coloradon yliopistossa [157].

Kaupalliset tuotteet. Mikroantureita on saatavissa erillisinä tuotteina muun muassa Analog Devices:lta [152], STMicroelectronicsilta [158] sekä VTI Technologiesilta [151]. Tämän ohella anturit ovat yhä useammin osana jotain kulutuselektronikka- (esim. rannetietokonetta) tai muuta toimilaitetta [159].

Tulevaisuuden näkymät. Mikroantureiden tulevaisuudennäkymät näyttävät varsin mielenkiintoisilta. Niitä käytetään yhä useammin ”sulautettuna” osana jotain laitetta. Tulevaisuudessa voikin olla mahdollista, että esimerkiksi sähkömoottoreihin on voitu integroida mikroanturi kunnonvalvontamittauksia varten. Mikroanturien integroitua yhä enemmän osaksi muita laitteita nousevat kysymyksiksi mm. anturin tehonkulutus sekä kommunikointi muiden laitteiden kanssa. Toisena kysymyksenä esille nousee antureiden suorituskyky, joka ei vielä ole kiihtyvyyssmittausten osalta pietsosähköisten anturien tasolla [150]. Tulevaisuudessa voi olla mahdollista, että yhä useampi kiihtyvyyssmittaus toteutetaan (sovelluksesta riippuen) mikroantureilla.

5.4.4. Konenäkö

Konenäöllä tarkoitetaan yleisesti kamerasta, tietokoneesta sekä kuvankäsittelyohjelmasta muodostuvaa kokonaisuutta, jolla voidaan korvata ihmisen tekemä silmämääräinen tarkastelu tai jokin muu visuaalista tietoa vaativa prosessi [153]. Konenäkö mahdollistaa nykyisin esimerkiksi liukuhihnalla tapahtuvan laadunvalvonnan, lajittelun automatisoinnin sekä erilaisten säätöjärjestelmien toteuttamisen [161] [162].

Laitediagnostiikassa konenäköä voidaan käyttää monin tavoin. Ottamalla huomioon infrapuna- sekä röntgenkamerat, konenäkö tarjoaa useita mahdollisuuksia rakenteessa tapahtuvien muutosten tai vikaantumisten havaitsemiseen [130] [163]. Hyvä esimerkki konenäön hyödyntämisestä laitediagnostiikassa on työkalujen (esim. terien) kunnonvalvonta [164].

Konferenssit ja tutkimustyö. Konenäköön liittyviä konferensseja ovat sovelluksiin keskittyvä IAPR Conference on Machine Vision Applications [165] ja BMVA (British Machine Vision Association) [166]. Konferenssien ohella tutkimustuloksia esitellään lukuisissa julkaisussa, joista mainittakoon ”Pattern Recognition” sekä ”Robotics and Computer-Integrated Manufacturing” [167]. Käytännössä konenäköön liittyviä artikkeleita voi löytää niin tieto-, kone- kuin valmistustekniikkaankin keskittyvistä julkaisuista. Konenäköä tutkivista yliopistoista mainittakoon Edinburghin [168] sekä Ljubljanan yliopistot [169].

Kaupalliset tuotteet. Konenäköön perustuvien sovellusten yleistymisen on havaittavissa tuotteita tarjoavien yritysten lukumäärästä. Suomessa konenäköjärjestelmiä tarjoavia yrityksiä ovat muun muassa Euroelektro Oy [161], Beijer Electronics [170], Atostek Oy [171] sekä Oy TC-Plan Ab [172].

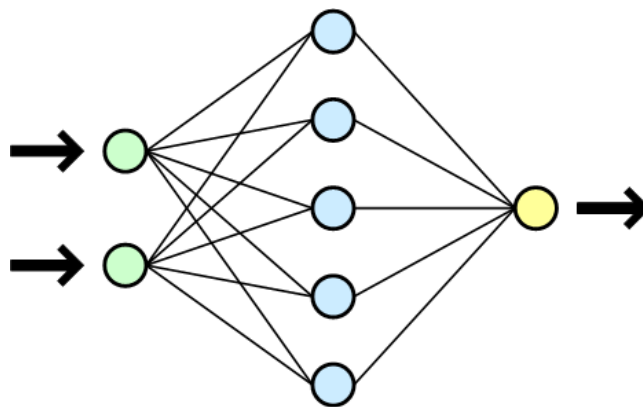
Tulevaisuuden näkymät. Konenäön käyttö jatkossa kasvaa todennäköisesti prosessien automatisoinnin myötä. Tietokoneiden kasvava suorituskyky mahdollistaa tehokkaampien kuvantunnistusalgoritmien toteuttamisen. Lisäksi kameratekniikan kehittymisen voisi olettaa alentavan konenäköjärjestelmien hintoja. Konenäön uusista sovelluksista voidaan mainita paperin karheuden määrittäminen. Jatkossa konenäön tutkimuksen voisi olettaa painottuvan algoritmien kehittämiseen.

5.5. Luokittelumenetelmät ja algoritmit

Mittausten ohella laitediagnostiikkaan tarvitaan menetelmiä laitteen kunnan määrittämiseksi mittaustulosten perusteella. Mittaustuloksista voidaan etsiä esimerkiksi laakerivikaan liittyviä piirteitä verhoikäryäanalyysin ja siihen liittyvän luokittelun avulla [131]. Toisaalta laitteen kunnan määrittäminen voi perustua lämpötilan raja-arvon kaltaisiin deterministisiin menetelmiin [173]. Tässä luvussa perehdytään yleisesti laitediagnostiikassa käytettävissä oleviin luokittelumenetelmiin ja algoritmeihin sekä niihin liittyvään tutkimustyöhön.

Älykkäiden luokittelumenetelmien sekä algoritmien tarve korostuu mittausdatan määrän lisääntyessä muun muassa online-kunnonvalvonnan vuoksi [174]. Tämän ohella erilaiset luokittelumenetelmät sekä algoritmit voivat mahdollistaa laitteiden nykyistä paremman toiminnan, mikäli niiden avulla voidaan havaita laitteen kunnossa tapahtuvat muutokset riittävän aikaisessa vaiheessa. Luokittelumenetelmien tarve on ilmeisintä kiihtyvyyssmittausten analysoinnissa, jossa käytetään sekä aika- että taajuustason suureita [133]. Esimerkkejä laitediagnostiikassa käytettävissä olevista luokittelumenetelmistä ja algoritmeista ovat neuroverkot [175] [176] [177], tukivektorikoneet [178] [179], erilaiset päätöspuut [180], tilastolliset (korrelaatio)menetelmät [131] sekä sumea logiikka [181].

Neuroverkoilla tarkoitetaan aivojen toimintaa jäljittelevää systeemiä, jota voidaan opettaa esimerkkien avulla. Neuroverkko koostuu joukosta yksinkertaisia tiedonkäsittely-yksiköitä, jotka opetetaan tarkastelemaan jotain yksittäistä piirrettä (kuva 5.5). Neuroverkkojen hyödyntämistä kunnanvalvonnassa on tutkittu ainakin vaihdelaatikoiden [182] sekä porien osalta [181] [183].



Kuva 5.5 Neuroverkkojärjestelmän yksinkertaistettu rakenne. Verkko koostuu yksittäisistä tiedonkäsittely-yksiköistä, jotka käsittelevät dataa omalta osaltaan siirtäen sen seuraavalle yksikölle. Koska neuroverkolle voidaan opettaa eri mittausten väliset riippuvuudet (esim. tämä mittaustulos on viallisesta laitteesta), käytetään sitä usein tiedon lajittelussa. [183]

Sumealla logiikalla tarkoitetaan reaalisten totuusarvojen käyttöä diskreetin kyllä tai ei periaatteen sijaan [185]. Sumean logiikan soveltumista luokitteluun tutkitaan maailmanlaajuisesti ja siihen liittyviä tutkimustuloksia on esitetty julkaisuissa mm. ”Mechanical Systems and Signal Processing” sekä ”IEEE Transactions on Fuzzy Systems” [186].

Edellä luetelluista menetelmistä tukivektorikone on kaikkein uusin [178]. Menetelmä perustuu piirreavaruuden (opetusjoukon) jakamiseen kahteen tai useampaan osajoukkoon reuna-alueita määrittävien tukivektorien avulla. Menetelmän yhtenä etuna on se, että samaan luokkaan kuuluvat pisteet voivat olla ripoteltuna mielivaltaisesti piirreavaruudessa. Lisäksi tukivektoreiden ansiosta menetelmä osaa suodattaa epäoleellisen opetustiedon pois, mikä parantaa tukivektorikoneen suorituskykyä. [187]

Edellä esitellyt luokittelumenetelmät vaativat toimiakseen opetusjoukon, jonka perusteella menetelmät osaavat päätellä laitteen viallisuuden mittausdatassa olevien piirteiden perusteella. Luokittelumenetelmien suorituskyky onkin tämän takia vahvasti riippuvainen opetusjoukon laadusta sekä luokitteluun käytettävien piirteiden yleisestä soveltuvuudesta vikaantumisen määrittelyyn.

Luokittelumenetelmistä tehtyjä tutkimustuloksia esitellään mm. sovellettuun matematiikkaan liittyvissä julkaisuissa [186] [188] sekä kunnonvalvontaan ja neuroverkkoihin liittyvissä konferensseissa [121] [189]. Laitediagnostiikan ja kunnonvalvonnan alueella luokittelumenetelmistä tehdään tutkimusta muun muassa Teknillisessä korkeakoulussa [178].

5.5.1. Tulevaisuuden näkymiä

Automaattisten luokittelumenetelmien tarve on kasvamassa asiantuntijajärjestelmien sekä etäkunnonvalvonnan myötä. Luokittelumenetelmät voivat mahdollistaa olennaisen tiedon louhimisen käyttäjän puolesta, millä on pienentävä vaikutus mittaustietojen analysoimiseen tarvittavaan työvoimaan. Luokittelumenetelmien käytöstä on jo tehty lukuisia tutkimuksia, mutta niiden käytöstä kunnonvalvontaan liittyvissä kaupallisissa ohjelmistoissa on ollut vaikeaa löytää tietoja.

Yhtenä syynä analysointiohjelmien sekä asiantuntijajärjestelmien vähäisyyteen tällä hetkellä voidaan pitää niiden kalleutta sekä puutteellista suorituskykyä verrattuna ihmisen tekemään analysointiin. Toisaalta laitteiden kunnonvalvonta perustuu vielä monilta osin asentajien tekemiin kierroksiin erillisten mittausten sijasta. Luokittelumenetelmien jatkekehityksen haasteina voidaankin pitää algoritmien toiminnan parantamista siten, että niiden voidaan todeta antavan todellista hyötyä laitteiden kunnossapitoon. Lisäksi laitteiden kunnonvalvonnassa tulisi tapahtua selvempi siirtymä kunnonvalvontamittausten käyttöön, jotta luokittelumenetelmille olisi suurempaa tarvetta.

5.6. Semanttiset webit

Artikkelissa [190] semanttinen web (SW) on määritelty seuraavasti: *"The semantic web is an extension of the current web in which information is given well-defined meaning, better enabling computers and people to work in cooperation"*. SW on siis seuraavan sukupolven älykäs WWW (World Wide Web), jonka käyttäjinä ovat ihmisten ohella myös koneet [191]. Nykyinen WWW on kehitetty ainoastaan ihmistä varten ja tämän takia koneet eivät ymmärrä verkon sisältöä juuri lainkaan. Verkosta löytyy valtava määrä tietoa, mutta ainoastaan ihminen voi tulkita sen sisältöä. Nykyisen verkon ongelmina ovat epäyhtenäisyys, kommunikointikuilut, epäluotettavuus, sisällön kuvauksen ja merkityksen ymmärrettävyys koneiden kannalta [192]. Näiden lisäksi Internet-teknologia rakennettiin alun perin rajatulle yhteisölle, eikä sitä suunniteltu kaikkien ihmisten globaaliksi kommunikointitekniikaksi. SW tarjoaa ratkaisuja, joiden avulla tieto voidaan ilmaista koneiden käsittämässä muodossa [193].

5.6.1. Historia

SW:n kehitys alkoi vuonna 1996 heti, kun tunnustettiin Internetin puutteellisuus koneiden kannalta [194]. Internetin ongelmana on tiedon määrä, jota ei voida hallita manuaalisesti, vaan se täytyisi pystyä automatisoimaan. Ongelman ratkaisuksi tarjottiin *metadattaa* kuvaamaan datan sisältöä Internetissä. Metadata on dataa, joka sisältää tietoa datan sisällöstä, esimerkiksi kirjaston tietokannassa erilaiset julkaisut on kuvattu tähän tapaan. Metadataan kuvaamiseen tarkoitettu RDF (Resource Definition Framework) –kielen hahmotelma hyväksyttiin W3C:n (World Wide Web Consortium) [195] toimesta vuonna 1999. W3C toimii kehityksen koordinaattorina. Vuonna 1998 Internetin kehittäjä Tim Berners-Lee julkaisi tulevaisuuden suunnitelman SW:lle [196]. SW:n kehitys on kuitenkin ollut varsin hidasta alkuperäisen Internetin kehitykseen verrattuna, sillä alkuperäinen Internet kehittyi vuosien 1989–1995 aikana maailmanlaajuisesti tietoväyläksi.

5.6.2. Teknologia

SW:n arkkitehtuurimalli (kerrospyramidi) esiteltiin vuonna 2001 [190]. Kerrosmaisessa arkkitehtuurissa jokaisella ylemmällä kerroksella ratkaistaan uusi ja haasteellisempi ongelma kuin alemmalla kerroksella. SW:ssä tieto esitetään XML (Extensible Markup Language) –formaattissa, kun taas metadata ja kommentit RDF –formaattissa. Kommentteja käsitellään kohteina ja niihin pystytään viittaamaan ja niitä pystyy myös joku toinen kommentoimaan edelleen [194]. SW:n turvallisuus taataan digitaalisten allekirjoitusten avulla. Metadataan kuvauksessa käytetään RDF:n lisäksi ontologiaa (OWL, Web Ontology Language), jonka avulla pystytään kuvaamaan datan ominaisuuksia ja luokkia.

SW tarjoaa useita houkuttelevia mahdollisuuksia. Yhteistyötä voidaan vahvistaa eri ohjelmistojen ja ihmisten välillä sekä näiden välistä kommunikointia. Internetistä voidaan tehdä joustavampi ja tietoja voidaan yhdistellä sekä paikallisesti että globaalisti. Luottamusta voidaan lisätä ja tietojen tuottaja voi määrittellä käyttöoikeudet erilaisille kuluttajille (ihminen tai ohjelmisto) ja myös saada tietoa, mihin hänen tietojensa käytetään. Tietojen kuluttaja voi varmistaa tiedon alkuperän ja sisällön sekä sen luotettavuuden. [192]

SW tarjoaa vastaavasti monia haasteita, jotka täytyy pystyä ratkaisemaan. Teknologia on olemassa SW:n rakentamiseen, mutta standardointityö on erittäin haastavaa. Metadataan standardoiminen on ongelmallista ja se vaatii paljon työtä ja yhteistyökykyä. Käsitteistä ja niiden välisistä suhteista sopiminen on erittäin työlästä. Ontologioiden pysyvyys ja niiden ylläpito eivät välttämättä ole yhdenmukaisia käyttäjien käsitteistöjen kanssa. Luottamukseen ja tietoturvaan liittyvät ongelmat ovat vaikeita ratkaista. [192] Ongelmana on myös tarvittavien työkalujen ja välineiden puuttuminen. Esimerkiksi nykyisenlaisen verkon voi pystyttää varsin helposti hyödyntämällä teknologiaa, jota löytyy lähes jokaisen kaupan hyllyltä [197].

5.6.3. Tutkimus

SW:iä tutkitaan maailmanlaajuisesti. SW:n osalta on perustettu kansainvälinen järjestö *Semantic Web Science Association (SWSA)* [198], jonka tehtävänä on edistää ja välittää tutkimustietoutta ympäri maailmaa. Euroopassa vastaavaa virkaa hoitaa järjestö *European Semantic Systems Initiative (ESSI)* [199], jonka tehtävänä on toimia yhdessä Eurooppalaisen tutkimuksen ja teollisuuden sekä kansainvälisen standardoinnin kanssa. Vuosittain järjestettäviä konferensseja on olemassa useita, kuten esimerkiksi *International Semantic Web Conference (ISWC)* [200], joka on järjestetty vuodesta 2001 lähtien, *European Semantic Web*

Conference (ESWC), European Semantic Technology Conference (EST) ja Asian Semantic Web Conference (ASWC).

5.6.4. SW laitediagnostiikassa

Kuten jo aiemmin on mainittu, SW:n huomattavana etuna on se, että myös koneet voivat etsiä itsenäisesti tietoa sieltä ja erityisesti tulkita sen sisältöä. Tätä ominaisuutta olisi mahdollista hyödyntää myös laitediagnostiikassa siinä mielessä, että laitteet voisivat itsenäisesti etsiä vastauksia ongelmiinsa. Jos laitteet havaitsevat jonkin ongelman, niin ne voisivat itse etsiä siihen ratkaisun ja mahdollisuuksien rajoissa korjata sen tai antaa korjauspyynnön (fyysisesti vioittuneet osat) eteenpäin.

Laitteiden sisältämät osat voisi myös kuvata metadatan avulla, jolloin laitteet itse voisivat kertoa vaihdettavan osan tarkan kuvauksen ja sen mallimerkinnän. Tämä nopeuttaisi laitteen korjausaikaa, sillä korjaaja voisi varata ko. osan jo valmiiksi tullessaan korjaamaan laitetta, eikä turhaa aikaa kuluisi vioittuneen osan määrittämiseen ja etsimiseen.

5.7. RFID ja visuaaliset koodit

5.7.1. Visuaalinen tunnistus

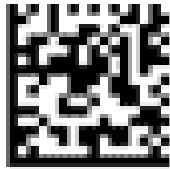
Visuaaliset koodit ovat koodeja, joita voidaan lukea optisesti. Yleisimmin tunnettu visuaalinen koodi on viivakoodi. Viivakoodi esiintyy tuotteissa ja sen tarkoituksena on yksilöidä tuote. Yleisin viivakoodin standardi on UPC (Universal Product Code). UPC-viivakoodissa erilevyisillä viivoilla kuvataan 12-numeroinen numerosarja, joka yleensä on esitetty viivakoodin alapuolella (kuva 5.6). Viivakoodia voidaan lukea siihen tarkoitettun skannerin avulla, joka tulkitsee viivat numerokoodiksi. Numerokoodin avulla voidaan identifioida vastaava tuote, koska kaikilla tuotteilla on yksilöllinen numerosarja. [201] EAN-viivakoodijärjestelmä (European Article Number) on eurooppalainen artikkelinumerointistandardi. Se on maailmanlaajuinen GS1-kieli, jolla jakeluketjun eri vaiheissa teollisuudelta kuluttajalle ja erityisesti vähittäiskaupassa tuote voidaan yksiselitteisesti tunnistaa. [202] Siinä tuotteen identifiointi tehdään 13-numeroisena [201] (kuva 5.6). GS1 on maailmanlaajuinen organisaatio, joka suunnittelee ja toteuttaa maailmanlaajuisia standardeja ja ratkaisuja parantamaan tehokkuutta ja näkyvyyttä eri osissa tuotantoketjua [203].



Kuva 5.6 Esimerkki UPC- ja EAN-viivakoodista. Vasemmalla on UPC-standardin ja oikealla EAN-standardin mukainen viivakoodi. [203]

Kehittyneempi versio viivakoodista, joka on yksiulotteinen, on kaksiulotteinen matriisikoodi (kuva 5.7). Yksi versio tällaisesta on ECC 200, joka on kapasiteetiltaan huomattavasti parempi kuin tavallinen viivakoodi. Erona viivakoodiin on se, että kaksiulotteista matriisikoodia pystyy lukemaan ainoastaan kamerapohjaisilla skannereilla. [203] Tämä ei

tietysti ole kynnyskysymys nykypäivänä, koska kamera on esimerkiksi vakiovarusteena lähes kaikissa matkapuhelimissakin.



(01) 00012345678905

Kuva 5.7 Esimerkki matriisikoodista. [203]

5.7.2. Radiotaajuinen etätunnistus

Visuaalisten koodien korvaajiksi on kaavailtu RFID:ta (Radio Frequency Identification) eli radiotaajuisia etätunnistusta. Yksinkertainen RFID-tunniste sisältää antennin, kondensaattorin ja mikrosirun, joka sisältää yksilöllisen ID:n. RFID:lla on useita etuja verrattuna visuaalisiin koodeihin [204]. Ensinnäkään RFID ei tarvitse näköyhteyttä tunnisteseeseen. Toiseksi RFID tarjoaa suuremman datan pakkaustiheyden verrattuna visuaalisiin koodeihin, joka mahdollistaa yksilöllisen koodin jokaiselle tunnisteele, kun sitä vastoin viivakoodit ovat rajoittuneet yhteen koodiin tuotetta kohden. Tämä mahdollistaa myös tuotteen paikantamisen sen liikkua paikasta toiseen. Kolmanneksi RFID:n langaton yhteys mahdollistaa tunnisteen lähes vapaan sijoittelun. Neljänneksi RFID tarjoaa paremman autentikoinnin kuin visuaaliset koodit.

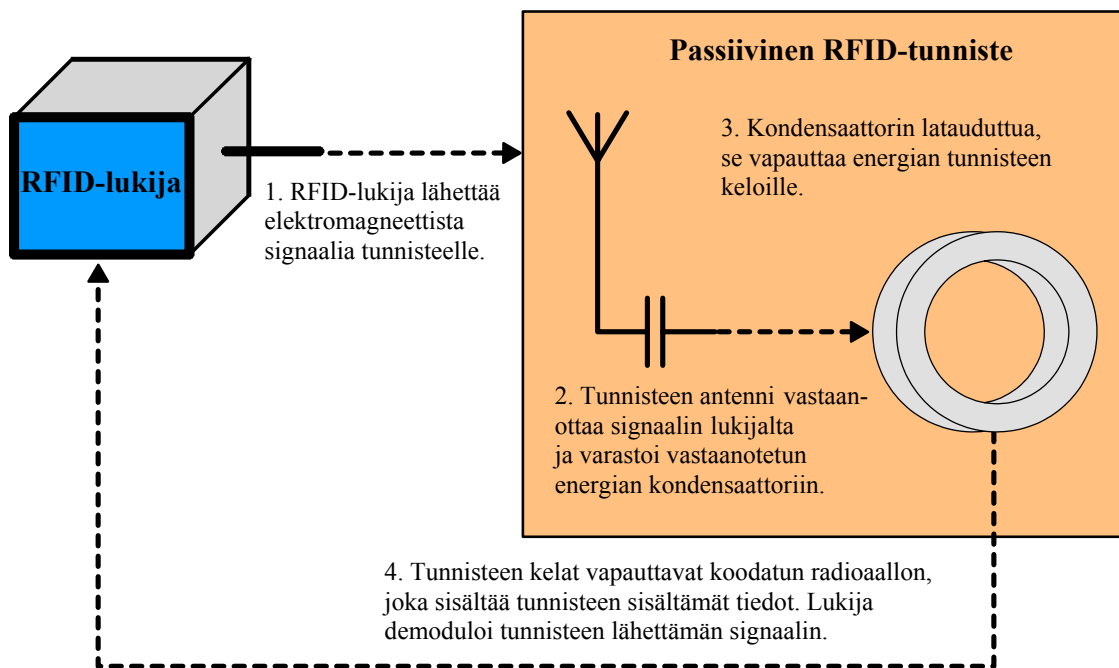
RFID-systeemissä perusedellytys on, että tunnistettavaan esineeseen kiinnitetään RFID-tunnistin. RFID-tunnisteet voidaan jakaa kahteen kategoriaan, aktiivisiin ja passiivisiin, riippuen niiden käyttämästä tehonlähteestä [205]. Aktiiviset tunnistet sisältävät oman tehonlähteen, kun taas passiiviset versiot saavat tehonsa ulkopuolisen lukijalaitteen signaalista. RFID-tunnisteihin tallennetaan jokin koodinumero, jota se lähettää aina lukijalaitteen sitä halutessa. RFID-tunnisteet voivat myös sisältää kirjoitettavaa muistia, johon voidaan tallentaa informaatiota erilaisille lukijalaitteille eri paikoissa.

Oman tehonlähteen ansiosta aktiiviset tunnistet voivat lähettää voimakkaampaa signaalia kuin passiiviset vastaavat, joka täten mahdollistaa myös pidemmät lukuetaisyydet. Sisäisen tehonlähteen takia aktiiviset tunnistet ovat myös passiivisiin versioihin nähden kookkaampia ja kalliimpia, jonka takia ne soveltuvat parhaiten systeemeihin joissa liikutellaan suuria kappalemääriä pitkällä etäisyyksillä. Aktiiviset tunnistet toimivat suuremmilla taajuuskaistoilla, yleisesti 455 MHz, 2,45 GHz tai 5,8 GHz –taajuuksilla. Käytettävä taajuus riippuu sovelluksessa tarvittavasta lukuetaisyydestä ja vaadittavasta muistikapasiteetista. Aktiivisia RFID-tunnisteita voidaan käyttää 20–100 m etäisyyksillä. [205]

Passiiviset tunnistet ovat vastaavasti taas hyvin edullisia ja pienikokoisia. Hintansa ja kokonsa puolesta ne mahdollistavat RFID-etätunnistuksen käytön useissa sovelluksissa. Passiivisten tunnistetien kokoa rajoittavana tekijänä on niiden antenni. Antennin koko on yleensä verrannollinen lukuetaisyyden pituuteen. Passiivisen tunnistetien toiminta perustuu lukijan lähettämään elektromagneettiseen signaaliin, jonka se kaappaa antenninsa avulla. Tämän jälkeen anturi varastoi saadun energian kondensaattoriin, joka on implementoitu tunnisteseeseen. Tunniste voi lähettää vastauksen lukijalaitteelle, kunnes kondensaattoriin on

latautunut riittävästi energiaa. Vastaus sisältää tunnisteiden muistiin tallennetun informaation. [205]

Kommunikointi lukijan ja passiivisen tunnisteiden välillä tapahtuu kahdella eri tavalla käytettävästä taajuudesta riippuen. Alle 100 MHz taajuuksilla tunniste lähettää informaatiota vapauttamalla energiaa kondensaattorista keloille eri voimakkuuksilla ajan suhteen, joka vaikuttaa emittoitaviin radiotaajuuksiin (kuva 5.8). Yli 100 MHz taajuuksilla tunniste lähettää signaalia vaihtelemalla antenninsa resistanssia, joka vaikuttaa myös lähetettäviin radiotaajuuksiin. Passiiviset tunnisteet toimivat tyypillisesti 128 kHz, 13,6 MHz, 915 MHz tai 2,45 GHz –taajuuksilla. Käytettävät taajuudet riippuvat RFID-systeemin ympäristöstä ja erityisesti siitä mitä materiaaleja signaalin täytyy edetessään läpäistä. [205]



Kuva 5.8 Passiivisen RFID-tunnisteiden toiminta alle 100 MHz taajuuksilla.

RFID:sta on ISO (International Standards Organisation) –standardeja, kuten esimerkiksi ISO 14443 (kontaktittomille systeemeille), ISO 15693 (lähekkäisille systeemeille) ja ISO 18000 (määrittämään ilmarajapinta erilaisille RFID sovelluksille) [205]. Teollisuuspainotteisten standardien kehitystä sähköiselle tuotekoodille EPC (Electronic Product Code) johtaa EPCglobal [206]. EPC tukee RFID –tekniikkaa ja se on elektroninen vastine UPC/EAN –viivakoodijärjestelmille. EPCglobalin määrittelemät standardit on koottu yhteen dokumenttiin [207]. Dokumentissa on kuvattu muun muassa ONS (Object Name Service) –systeemi, joka toimii samaan tapaan kuin DNS (Domain Name Service) Internetissä.

RFID-tekniikan ongelmaksi mainitaan lähes kaikissa sitä käsittelevissä julkaisuissa turvallisuus. Tämä johtuu siitä, että RFID-tunnistimia voidaan lukea myös erittäin edullisilla lukulaitteilla ja tämän lisäksi niiden salaus on myös helposti purettavissa [208]. RFID-laitteisiin on ehdotettu tietynlaista ”tappokytintä”, joka tarkoittaa sitä, että RFID-tunnistin disabloi itsensä saatuaan käskyn lukulaitteelta [209]. Salauksen tarpeellisuus riippuu täysin sovelluksesta, koska esimerkiksi kaupasta ostettavien tuotteiden RFID-tunnisteiden disabloiminen riittää kaupasta poistuttaessa, mutta älykorttien lähtökohtana turvallisuus on etusijalla [208]. Nopeasti liikkuvien kappaleiden tunnistaminen passiivisten anturien avulla on

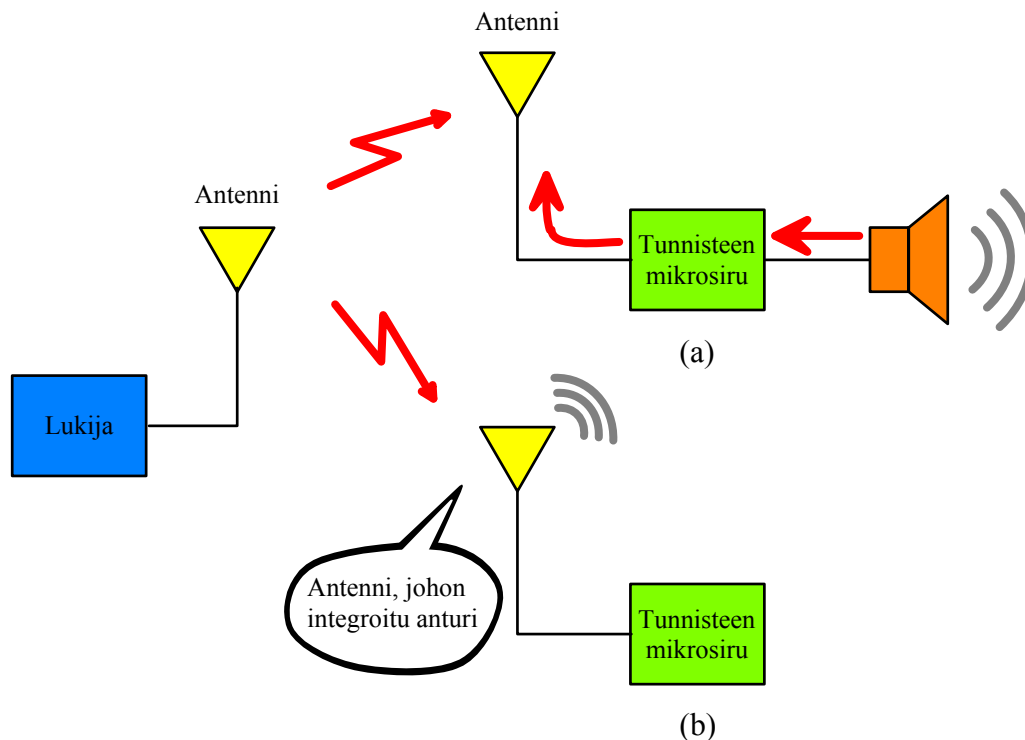
jo riittävän haastavaa ilman, että niihin lisättäisiin hyvä salausmekanismi. Ongelmaan on esitetty ratkaisu myös ilman monimutkaisia salausmekanismeja [210]. Erilaisia RFID-tekniikan uhkia ja ongelmia, joita voi tulevaisuudessa esiintyä tekniikan yleistyessä, on käsitelty artikkelissa [211].

5.7.3. Objektin ja siihen liittyvän tiedon yhdistäminen

Yksi merkittävimmistä tulevaisuuden käyttöliittymistä ja rajapinnoista voi hyvin tulla olemaan älypuhelin, joka tarjoaa käyttöliittymän ja useita eri rajapintoja tietolähteisiin. Esimerkiksi puhelinta voidaan käyttää lukemaan optinen koodi, RFID-tunniste tai tieto voidaan syöttää näppäimistöllä. Tämän informaation avulla voidaan hakea siihen liittyvää tietoa tietokannoista esimerkiksi radioyhteyden avulla [212]. Lähteessä [213] esitelty ratkaisu, missä puhelimen vieminen lähelle passiivista tunnistetta, aktivoi nopeamman tiedonsiirtoyhteyden puhelimen ja laitteen välillä, jossa tunniste on.

5.8. RFID-anturit

RFID-tunnistetta voidaan hyödyntää myös erilaisten mittaussuureiden mittaamisessa ja keräilyssä [214], kuten lämpötila, kosteus, kiihtyvyys tms. Anturielementin lisääminen RFID-tunnisteeseen on varsin suoraviivainen prosessi, mutta anturin suunnittelussa on otettava muutama asia huomioon [215]. Ensinnäkään passiivisissa versioissa anturi ei voi käyttää tehoa, kun tunnistin ei kommunikoi lukijan kanssa. Toiseksi saatavilla oleva energia on mitättömän pientä, joka rajoittaa mittaustekniikkaa. RFID-antureita voidaan hyödyntää esimerkiksi ympäristön muutosten tarkkailussa, joille löytyy sovelluksia lukematon määrä. Anturin lisääminen RFID-tunnisteeseen lisää luonnollisesti sen kokoa ja hintaa. Toisaalta antettiin voidaan myös integroida anturi (kuva 5.9), jonka avulla RFID-anturin kokoa ja kustannustehokkuutta saadaan parannettua [214].



Kuva 5.9 (a) Tavallinen RFID-anturi. (b) RFID-anturi, jonka antettiin on integroitu anturi.

RFID-anturiverkkoja voitaisiin hyödyntää ennakoivassa kunnonvalvonnassa erilaisten ympäristössä/laitteessa tapahtuvien muutosten tarkkailussa. Anturiverkon etuna olisi se, että antureita voisi laittaa useaan eri paikkaan ja vika olisi mahdollista havaita ja paikallistaa nopeasti ja mahdollisesti korjata ennen vakavampia vaurioita. Antureiden pieni koko mahdollistaa niiden lähes vapaan sijoittelun. Antureiden luenta voisi tapahtua kannettavan tai keskitetyn lukulaitteen avulla.

5.9. Katsaus alan kaupalliseen toimintaan

RFID-tekniikkaa hyödyntävät sovellukset ovat vahvassa myötätulessa sen luomien mahdollisuuksien takia. Esimerkiksi elintarviketeollisuudessa RFID-etätunnistuksen arvioidaan korvaavan viivakoodin ja terveydenhuoltosektorilla etätunnistus helpottaisi välineiden ja laitteiden identifiointia ja jäljitystä. Kaikkien uusien sovellusten tarkoituksena on tehostaa toimintaa ja lisätä turvallisuutta.

Vuonna 2007 RFID-markkinoiden arvioidaan olevan noin 4,96 miljardia dollaria. Puolestaan vuoteen 2017 mennessä markkinoiden arvioidaan kasvavan 26,88 miljardiin dollariin, joka tarkoittaa noin 440 % kasvua 10 vuoden aikana. Tärkeimpien sovellusten ennustetaan olevan älykortit, kulutustavaratuotteet ja logistiikka. Tällä hetkellä USA on kuitenkin johtava RFID-tekniikan hyödyntäjä Euroopan tullessa jäljessä. [216]

RFID:ssä tarvittavia mikropiirejä valmistavat esimerkiksi Philips [217], Texas Instruments [218], Motorola [219], Atmel Corporation [220] ja STMicroelectronics [221], Ulkomaalaisia RFID-laitevalmistajia, joiden laitteita myydään Suomessa ovat mm. FEIG ELECTRONIC GmbH [222], AWID Inc. [223], CAEN S.p.A [224] ja TagMaster AB [225]. [226]

UPM Raflatac on maailmanlaajuisesti johtava yritys liimattavien tarrojen ja RFID-tunnisteiden valmistuksessa. RFID-tuotteet kantavat tuotenimeä UPM Rafsec. UPM Raflatacin valmistamat RFID-tunnisteet ovat passiivisia. Tuotteet kattavat HF (High Frequency) (13,56 MHz) ja UHF (Ultra High Frequency) (868 MHz, Eurooppa ja 915 MHz, USA) taajuuksia hyödyntävät RFID-tunnisteet. [227] Muita Suomessa toimivia RFID-alan yrityksiä on useita. Pitkänkantaman RFID-kulunvalvontajärjestelmiä myy Elcoplast Oy [228]. Henkilökortteja toimittaa Feedback Oy [229]. RFID-lukijoita, -lukijamoduuleita, -tunnisteita ja -kortteja kehittää/valmistaa/markkinoi Idesko Oy [230]. RFID-käsilukijoita valmistaa Nordic ID Oy [231]. RFID-järjestelmiä ja ohjelmistokomponentteja kirjastoille ja vähittäiskaupoille toimittaa P.V.Supa Oy [232]. RFID-ohjelmistoalustoja kehittää Trackway Oy [233]. RFID-tekniikkaan perustuvaa tiedonkeruujärjestelmää kehittää Tamtron Solution Oy [234]. RFID-järjestelmiä valmistaa Omron Electronics Oy [235]. RFID-järjestelmiä toimittaa Toptunniste Oy [236] ja Wavin-Labko Oy [237]. Viivakoodi Optiscan Oy edustaa useita RFID-järjestelmätoimittajia [238]. RFID-järjestelmäintegraattoreita omaisuuden merkinnän ja logistiikan sovelluksiin toimittaa Vilant Systems Oy [239].

Nokia on myös sulauttanut RFID-teknologiaa puhelimeensa. Se julkaisi ensimmäisen GSM puhelimen, johon voitiin liittää RFID-varustepaketti, CeBIT2004 –messuilla Saksassa [240]. Tekniikkaa hyödynnetään sovelluksessa, jossa osana käytetään Nokia 5140-, 5140i- ja 3220 -puhelinien RFID-luku- ja kirjoitusominaisuudella varustettuja NFC (Near Field Communication) -kuoria. Kentällä työskentelevien henkilöiden tarvitsee vain koskettaa RFID-tunnisteita ja ratkaisu suorittaa toimenpiteen ja lähettää ja vastaanottaa automaattisesti tietoja tai pyytää käyttäjää antamaan tiedot puhelimen asiakassovelluksessa. [241] Kyseistä tekniikkaa olisi mahdollista hyödyntää edellä mainitussa anturiverkossa kannettavana lukulaitteena.

LÄHTEET

- [1] Moore, Gordon E. (1965). Cramming more components onto integrated circuits, Electronics Magazine, Retrieved on November 11, 2006.
- [2] "Teollisuus ulkoistaa kunnossapitoaan vauhdilla", Tekniikka ja Talous, 4.5.2006
- [3] Scandinavian Mill Services, www-sivu, saatavissa: <http://scandinavianmillservices.com>, viitattu 24.8.2007
- [4] Työtuomioistuimen tuomio nro 56, 2007 (TT:2007-56), Paperiliitto ry vs. Metsäteollisuus ry, UPM-Kymmene Oyj. Saatavissa: <http://www.oikeus.fi/tyotuomioistuin/39447.htm>, viitattu 24.8.2007
- [5] Metsäteollisuus ry:n ja Paperiliitto ry:n välinen työehtosopimus n:o 43, voimassa 1.7.2005-31.5.2008. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/pdf/tes/stes642-TT57Papetyt0507.pdf>, viitattu 24.8.2007.
- [6] "Paperiteollisuus ulkoista siivouspalveluitaan vauhdilla", Etelä-Saimaa, 13.2.2007, saatavissa: <http://www2.lappeenranta.fi/lehtitietokanta/artikkeli.php?id=7062>, Viitattu 24.8.2007
- [7] Saatavissa: <http://www.ee.lut.fi/>, viitattu 2.5.2007.
- [8] Saatavissa: <http://svtf43.ee.tut.fi/>, viitattu 2.5.2007.
- [9] Saatavissa, <http://www.ac.tut.fi/aci/>, viitattu 2.5.2007.
- [10] Saatavissa, <http://www.mit.tut.fi/>, viitattu 2.5.2007.
- [11] Saatavissa: <http://powersystems.tkk.fi/>, viitattu 2.5.2007
- [12] Saatavissa: <http://www.tkk.fi/Yksikot/Sahkomekaniikka/>, viitattu 2.5.2007.
- [13] Saatavissa: <http://www.lightinglab.fi/>, viitattu 2.5.2007.
- [14] Saatavissa: [http://www.automationit.hut.fi/index.php?group=Labra&target=etusivu&Labra\[\]=19](http://www.automationit.hut.fi/index.php?group=Labra&target=etusivu&Labra[]=19), viitattu 2.5.2007.
- [15] Saatavissa: <http://tuotanto2010.vtt.fi/>, viitattu 2.5.2007.
- [16] Saatavissa: <http://www.control.hut.fi/Research/>, viitattu 2.5.2007.
- [17] Saatavissa, <http://www.control.hut.fi/default.asp>, viitattu 2.5.2007.
- [18] Arndt Luder, Kai Lorentz, IAONA Handbook, Industrial Ethernet, 3rd Edition, Magdeburg, July 15th 2005, ISBN 3-00-016934-2.
- [19] G. K. Singh, Sa'ad Ahmed Saleh Al Kazzaz, "Induction Machine Drive Condition Monitoring and Diagnostic Research – A Survey", Elsevier Electric Power Systems Research Journal 64, pp. 145-158, Elsevier Science B.V., 2003.
- [20] M. E. H. Benbouzid, "Bibliography on Induction Motors Faults Detection and Diagnosis", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, pp. 1065-1074, Dec 1999
- [21] Subhasis Nandi, Hamid A. Toliyat, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machines – A Review", Conf. Rec. of the 1999 IEEE Industry Applications Conference, pp. 197-204, Phoenix, Arizona, USA, Oct. 1999.
- [22] Dabaprasad Kastha, Bimal K. Bose, "Investigation of Fault Modes of Voltage-Fed Inverter System for Induction Motor Drive", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 4, pp. 1028-1038, Jul/Aug 1994
- [23] Friedrich W. Fuchs, "Some Diagnosis Methods for Voltage Source Inverters in Variable Speed Drives with Induction Machines – A Survey", in the Proceedings of the 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'03), vol. 2, pp. 1378-1385, Roanoke, Virginia, USA, Nov. 2003
- [24] Peter J. Tavner, James Penman, *Condition Monitoring of Electrical Machines*, Research Studies Press, Ltd., England, 1987

- [25] P. F. Albrecht, R. M. McCoy, E. L. Owen, "Assessment of the Reliability of Motors in Utility Applications", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. EC-1, No. 1, Mar 1986
- [26] Abdesselam Lebaroud, Guy Clerc, "Time-Frequency Classification Applied to Induction Machine Faults Monitoring", Proceedings of the 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'06), Paris, France, Nov 2006.
- [27] Martin Blödt, Marie Chabert, Jérémie Regnier, Jean Faucher, "Current Based Mechanical Fault Detection in Induction Motors through Maximum Likelihood Estimation", Proceedings of the 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'06), Paris, France, Nov 2006.
- [28] Tuomo Lindh, *On the Condition Monitoring of Induction Machines*, D. Sc. Dissertation, Lappeenranta University of Technology, Dec 2003
- [29] Sanna Pöyhönen, *Support Vector Machine Based Classification in Condition Monitoring of Induction Motors*, D.Sc. Dissertation, Helsinki University of Technology, Jun 2004
- [30] A. Tenhunen, T Benedetti, T. P. Holopainen, A. Arkkio, "Electromagnetic forces in cage induction motors with rotor eccentricity", in the Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference 2003 (IEMDC'03), vol. 3, pp. 1616-1622, Madison, Wisconsin, USA, Jun 2003
- [31] Jarmo Lehtoranta, Heikki N. Koivo, "Fault Diagnosis of Induction Motors with Dynamical Neural Networks", in the Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, vol. 3, pp. 2979-2984, Hawaii, USA, Oct 2005
- [32] Yibo Edward Fan, Fengshou Gu, Andrew Ball, "Condition Monitoring of Rolling Element Bearings Using Advanced Acoustic Emission Signal Analysis Technique", Proceedings of the 18th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (COMADEM 2005), pp. 491-498, Cranfield, England, Aug/Sep 2005.
- [33] Asoke K. Nandi, "Genetic Programming – Classification and Feature Generation", Proceedings of the 18th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (COMADEM 2005), pp. 19-33, Cranfield, England, Aug/Sep 2005.
- [34] Ali Ibrahim, Mohamed El Badaoui, François Guillet, Widian Youssef, "Electrical signals analysis of an asynchronous motor for bearing fault detection", Proceedings of the 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'06), Paris, France, Nov 2006
- [35] Jason R. Stack, Thomas G. Habetler, Ronald G. Harley, "Experimentally Generating Faults in Rolling Element Bearings via Shaft Current", In the Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003), pp. 188-192, Atlanta, USA, Aug 2003
- [36] Ramzy R. Obaid, Thomas G. Habetler, Jason R. Stack, "Stator Current Analysis for Bearing Damage Detection in Induction Motors", In the Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003), pp. 182-187, Atlanta, USA, Aug 2003
- [37] T. Lindh, J. Ahola, J.-K. Kämäräinen, V. Kyrki, J. Partanen, "Bearing Damage Detection Based on Statistical Discrimination of Stator Current", In the Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003), pp. 177-181, Atlanta, USA, Aug 2003

- [38] A. Bellini, C. Concari, G. Franeschini, E. Lorenzani, C. Tassoni, A. Toscani, "Thorough Understanding and Experimental Validation of Current Sideband Components in Induction Machines Rotor Monitoring", Proceedings of the 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'06), Paris, France, Nov 2006
- [39] A. Bellini, C. Concari, G. Franeschini, C. Tassoni, A. Toscani, "Vibrations, currents and stray flux signals to asses induction motors rotor conditions", Proceedings of the 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'06), Paris, France, Nov 2006
- [40] Luís A. Pereira, Dênis Fernandes, Daniel S. Gazzana, Fausto B. Líbano, Sérgio Haffner, "Performance Evaluation of Nonparametric, Parametric, and the MUSIC Methods to Detection of Rotor Cage Faults of Induction Motors", Proceedings of the 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'06), Paris, France, Nov 2006.
- [41] Khmais Bacha, Moncef Gossa, Humberto Henao, Gérard-André Capolino, "Comparative Investigation of Diagnosis Media of Stator Voltage Asymmetry and Rotor Broken Bars in Induction Machines", Proceedings of the 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'06), Paris, France, Nov 2006.
- [42] S. M. A. Cruz, A. J. Marques Cardoso, "Rotor Cage Fault Diagnosis in Voltage Source Inverter-Fed Induction Motors, by the Extended Park's Vector Approach", Proceedings of the IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics, and Drives (SDEMPED 1999), pp. 537-543, Spain, 1999.
- [43] R. Carlson, "Inter-Bar Currents in the Rotor of Large Three-Phase Cage Induction Motors: Analysis and Detection", In the Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003), pp. 242-246, Atlanta, USA, Aug 2003
- [44] B. Ayhan, M.-Y. Chow, H. J. Trussell, M.-H. Song, E. S. Kang, H.-J. Woe, "Statistical Analysis on a Case Study of Load Effect on PSD Technique for Induction Motor Broken Rotor Bar Fault Detection", In the Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003), pp. 119-123, Atlanta, USA, Aug 2003
- [45] M. Sahraoui, A. Ghoggal, S. E. Zouzou, A. Aboubou, H. Razik, "Modelling and Detection of Inter-Turn Short Circuits in Stator Windings of Induction Motor", Proceedings of the 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'06), Paris, France, Nov 2006
- [46] Subhasis Nandi, Hamid A. Toliyat, "Novel frequency domain based technique to detect incipient stator inter-turn faults in induction machines", in the Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference, vol. 1, pp. 367-374, Rome, Italy, Oct 2000
- [47] B. Mirafzal, R. J. Povinelli, N. A. O. Demerdash, "Inter-Turn Fault Diagnosis in Induction Motors Using the Pendulous Oscillation Phenomenon", in IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, Issue 4, pp. 871-882, Dec 2006.
- [48] W. Liu, E. Schaeffer, D. Averty, L. Loron, "A New Approach for Electrical Machine Winding Insulation Monitoring by Means of High Frequency Parametric Modelling", Proceedings of the 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'06), Paris, France, Nov 2006

- [49] Dragica Kostić-Perović, Muslum Arkan, Peter Unsworth, "Induction Motor Fault Detection by Space Vector Angular Fluctuation", Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference, Vol. 1, pp. 388-394, Oct 2000
- [50] M. G. Melero, M. F. Cabanas, C. Rojas, G. A. Orcajo, J. M. Cano, J. Solares, "Study of an Induction Motor Working Under Stator Winding Inter-Turn Short Circuit Condition", In the Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003), pp. 52-57, Atlanta, USA, Aug 2003
- [51] G. Gentile, S. Meo, A. Ometto, "Induction Motor Current Signature Analysis to Diagnostics of Stator Short Circuits", In the Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003), pp. 47-51, Atlanta, USA, Aug 2003
- [52] A. Carvajal, V. R. Garcia-Colon, "High Capacity Motors On-line Diagnosis Based On Ultra Wide Band Partial Discharge Detection", In the Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003), pp. 168-170, Atlanta, USA, Aug 2003
- [53] O. Ondel, E. Boutleux, G. Clerc, "Use of data standardization to improve inverter – induction machine fault detection", Proceedings of the 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'06), Paris, France, Nov 2006.
- [54] Risto Tiainen, Ville Särkimäki, Jero Ahola, Tuomo Lindh, "Current Measurement-Based Detection of Load Torque Changes in a Variable Speed VSI Induction Motor Drive", to be published in the proceedings of the 12th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2007), Ålborg, Denmark, Sep 2007
- [55] Ramzy R. Obaid, Thomas G. Habetler, "Effect of Load on Detecting Mechanical Faults in Small Induction Motors", In the Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003), pp. 307-311, Atlanta, USA, Aug 2003
- [56] Lance C. Benn, Bruce Burton, Ron G. Harley, "Response Identification and Parameter Extraction using Pseudorandom Modified PWM", In the Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003), pp. 70-75, Atlanta, USA, Aug 2003
- [57] Thomas M. Wolbank, Peter Macheiner, Jürgen L. Machl, Hans Hauser, "Simulation and Observer Based Detection of Airgap Asymmetries Caused by Rotor Eccentricity in Inverter Fed AC Machines", In the Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003), pp. 327-332, Atlanta, USA, Aug 2003
- [58] C. Kral, K. Kafka, "Power Electronics Monitoring for a Controlled Voltage Source Inverter Drive with Induction Machines", in the Proceedings of the 2000 IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC 2000), vol. 1, pp. 213-217, Galway, Ireland, Jun 2000
- [59] Xianghui Huang, Thomas G. Habetler, "Detection of Mixed Air Gap Eccentricity in Closed-Loop Drive-Connected Induction Motors", In the Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003), pp. 312-316, Atlanta, USA, Aug 2003
- [60] Fernando Villada, Diego Cadavid, Nicolás Muñoz, Diego Valencia, Diego Parra, "Fault Diagnosis in Induction Motors Fed by PWM Inverters", In the Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003), pp. 229-234, Atlanta, USA, Aug 2003

- [61] S. M. A. Cruz, H. A. Toliyat, A. J. M. Cardoso, "DSP Implementation of the Multiple Reference Frames Theory for the Diagnosis of Stator Faults in a DTC Induction Motor Drive", In the Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003), pp. 223-228, Atlanta, USA, Aug 2003
- [62] Chan-Ki Kim, Young-Do Choy, Jin-Boo Choo, Seong-Joo Lim, "Modelling and Analysis of Faults in Wind Power", Proceedings of the 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'06), Paris, France, Nov 2006.
- [63] I Albizu, A. Tapia, J. R. Saenz, A. J. Mazón, I. Zamora, "On-Line Stator Winding Fault Diagnosis in Induction Generators for Renewable Generation", in the Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON 2004), vol. 3, pp. 1017-1020, Dubrovnik, Croatia, May 2004.
- [64] W. le Roux, R. G. Harley, T. G. Habetler, "Detecting Rotor Faults in Permanent Magnet Synchronous Machines", In the Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003), pp. 198-203, Atlanta, USA, Aug 2003
- [65] A. K. Gunda, R. McCann, "Sliding Mode Observer for Real Time Diagnosis of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor", in the Proceedings of the 2005 IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion, pp. 200-204, Chicago, USA, Sep 2005
- [66] A. A. Abdallah, V. Devanneaux, J. Faucher, B. Dagues, A. Randria, "Modelling of Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Machines with Stator Faults", in the Proceedings of the 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 3031-3036, Busan, South Korea, Nov 2004
- [67] Li Liu, *Robust Fault Detection and Diagnosis for Permanent Magnet Synchronous Motors*, Ph.D. dissertation, Florida State University, College of Engineering, Sep 2006.
- [68] Todd D. Batzel, David C. Swanson, John F. Defenbaugh, "Predictive Diagnostics for the Main Field Winding and Rotating Rectifier Assembly in the Brushless Synchronous Generator", In the Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003), pp. 349-354, Atlanta, USA, Aug 2003
- [69] Olivier Chadebec, Viet Phuong Bui, Pierre Granjon, Laure-Line Rouve, Nicolas le Bihan, Jean-Louis Coulomb, "Rotor fault detection of electrical machines by low frequency magnetic stray field analysis", In the Proceedings of the 5th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2005), Vienna, Austria, Sep 2005
- [70] Sérgio M. A. Cruz, A. J. Marques Cardoso, "Stator Winding Fault Diagnosis in Three-Phase Synchronous and Asynchronous Motors, by the Extended Park's Vector Approach", in IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, Iss. 5, pp. 1227-1233, Sep/Oct 2001
- [71] Bruno Lequesne, Suresh Gopalakrishnan, Avoki M. Omekanda, "Winding Short-Circuits in the Switched Reluctance Drive", In the Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003), pp. 7-12, Atlanta, USA, Aug 2003
- [72] Gerald B. Kliman, Donwoo Song, Rudolph A. Koegl, "Remote Monitorin of DC Motor Sparking by Wavelet Analysis of the Current", In the Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003), pp. 25-27, Atlanta, USA, Aug 2003

- [73] Loredana Cristaldi, Antonello Monti, Ferdinanda Ponci, "Integrated Development of Diagnostic Systems Based on Virtual Systems", In the Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003), pp. 283-288, Atlanta, USA, Aug 2003
- [74] Parasuram P. Harihara, Kyusung Kim, Alexander G. Parlos, "Signal-Based versus Model-Based Fault Diagnosis – A Trade-Off in Complexity and Performance", In the Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003), pp. 277-282, Atlanta, USA, Aug 2003
- [75] M. Artioli, G. A. Capolino, F. Filippetti, A. Yazidi, "A General Purpose Software for Distance Monitoring and Diagnosis of Electrical Machines", In the Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2003), pp. 272-276, Atlanta, USA, Aug 2003
- [76] M. Artioli, A. Yazidi, F. Filippetti, G.-A. Capolino, "A General Purpose Software for Signal Processing Oriented to the Diagnosis of Electrical Machines", in the Proceedings of the 2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, vol. 2, pp. 809-814, Ajaccio, France, May 2004.
- [77] KTH Centre of Excellence in Electric Power Engineering, Diagnostics of electrical machine and drive for condition based maintenance -hanke. Online, available at http://www.comp.ee.kth.se/research/hpd/hpd_diagnostics_of.php, accessed Apr 11, 2007
- [78] KTH Centre of Excellence in Electric Power Engineering, Maintenance management – hanke, Online, available at <http://www.comp.ee.kth.se/research/mm/mm.php>, accessed Apr 11, 2007
- [79] Brandt D.; Piggin R., "The right time and place [wireless LAN]", Computing & Control Engineering Journal Volume 17, Issue 4, Aug.-Sept. 2006 Page(s):40 – 45
- [80] Brooks, T.; "Wireless technology for industrial sensor and control networks" Sensor for Industry, 2001, Proceedings of the First ISA/IEEE Conference 5-7 Nov. 2001 Page(s): 73 - 77
- [81] Willig A.; Matheus, K.; Wolisz A., "Wireless technology in industrial networks", Proceedings of the IEEE, Volume 93, Issue 6, June 2005 Page(s):1130 – 1151
- [82] Koulamas, C.; Lekkas, A.; Papadopoulos, G.; Kalivas, G.; Koubias, S.; "Delay performance of radio physical layer technologies as candidates for wireless extensions to industrial networks". Emerging Technologies and Factory Automation, 2001. Proceedings. 2001 8th IEEE International Conference on 15-18 Oct. 2001 Page(s):133 - 142 vol.1
- [83] Ferrari, P.; Flammini, A.; Marioli, D.; Taroni, A.; "IEEE802.11 sensor networking", Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on Volume 55, Issue 2, April 2006 Page(s):615 – 619
- [84] Vitturi, S.; Miorandi, D.; "Hybrid Ethernet/IEEE 802.11 networks for real-time industrial communications". Emerging Technologies and Factory Automation, 2005. ETFA 2005. 10th IEEE Conference on Volume 2, 19-22 Sept. 2005 Page(s):7 pp.
- [85] Willig, A.; Kubisch, M.; Hoene, C.; Wolisz, A.; "Measurements of a wireless link in an industrial environment using an IEEE 802.11-compliant physical layer". Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume 49, Issue 6, Dec. 2002 Page(s):1265 – 1282
- [86] Sairam, K.V.S.S.S.S.; Gunasekaran, N.; Redd, S.R.; "Bluetooth in wireless communication", Communications Magazine, IEEE, Volume 40, Issue 6, June 2002 Page(s):90 – 96

- [87] Bluetooth SIG, www.bluetooth.com, viitattu 24.4.2007.
- [88] Castano, J.G.; Andreasson, J.; Ekstrom, M.; Wrzesniewski, A.; Ahlblom, H.; Backlund, Y.; “Wireless industrial sensor monitoring based on Bluetooth” Industrial Informatics, 2003. INDIN 2003. Proceedings. IEEE International Conference on 21-24 Aug. 2003 Page(s):65 – 72
- [89] Bilstrup, U.; Wiberg, P.-A.; “Bluetooth in industrial environment”, Factory Communication Systems, 2000. Proceedings. 2000 IEEE International Workshop on 6-8 Sept. 2000 Page(s):239 – 246
- [90] Capella, J.V.; Bonastre, A.; Ors, R.; “Industrial applications of wireless networks: a bridge crane distributed control system based on Bluetooth”, Industrial Technology, 2004. IEEE ICIT '04. 2004 IEEE International Conference on Volume 2, 8-10 Dec. 2004 Page(s):824 - 829 Vol. 2
- [91] ZigBee Alliance, www.zigbee.org, viitattu 24.4.2007.
- [92] Baker, N.; “ZigBee and Bluetooth strengths and weaknesses for industrial applications” Computing & Control Engineering Journal Volume 16, Issue 2, April-May 2005 Page(s):20 – 25
- [93] Egan, D.; “The emergence of ZigBee in building automation and industrial control” Computing & Control Engineering Journal Volume 16, Issue 2, April-May 2005 Page(s):14 - 19
- [94] Li Zheng; “ZigBee Wireless Sensor Network in Industrial Applications” SICE-ICASE, 2006. International Joint Conference Oct. 2006 Page(s):1067 – 1070
- [95] Sexton, D.; Mahony, M.; Lapinski, M.; Werb, J.; “Radio Channel Quality in Industrial Wireless Sensor Networks” Sensors for Industry Conference, 2005. Feb. 2005 Page(s):88 - 94
- [96] Hancke, G.P.; Allen, B.; “Ultrawideband as an Industrial Wireless Solutio”. Pervasive Computing, IEEE Volume 5, Issue 4, Oct.-Dec. 2006 Page(s):78 – 85
- [97] WirelessHart: www.hartcomm2.org/, viitattu 26.4.2007.
- [98] Wibree, www.wibree.com/, viitattu 24.4.2007.
- [99] WirelessUSB: www.usb.org/developers/wusb/, viitattu 24.4.2007.
- [100] WirelessHD: www.wirelesshd.org/, viitattu 24.4.2007.
- [101] Want, R.; Farkas, K.I.; Narayanaswami, C., “Guest Editors' Introduction: Energy Harvesting and Conservation”, Pervasive Computing, IEEE, Volume 4, Issue 1, Jan.-March 2005 Page(s):14 - 17
- [102] Paradiso, J.A.; Starner, T.; “Energy scavenging for mobile and wireless electronics” ,Pervasive Computing, IEEE Volume 4, Issue 1, Jan.-March 2005 Page(s):18 – 27
- [103] “Harvest for the world [energy harvesting techniques]”, Power Engineer, Volume 20, Issue 1, Feb.-March 2006 Page(s):34 - 37
- [104] Chevalerias, O.; O'Donnell, T.; Power, D.; O'Donovan, N.; Duffy, G.; Grant, G.; O'Mathuna, S.C.; “Inductive telemetry of multiple sensor modules”, Pervasive Computing, IEEE Volume 4, Issue 1, Jan.-March 2005 Page(s):46 – 52
- [105] V. Särkimäki, T. Ahonen, R. Tiainen, J. Ahola, T. Lindh, “Analysis of the Requirements for Inductively Coupled Power Supply for Wireless Sensor”. Norpie 2006, 12-14 June.
- [106] Yuen, S.C.L.; Lee, J.M.H.; Li, W.J.; Leong, P.H.W.; “An AA-Sized Vibration-Based Microgenerator for Wireless Sensors”. Pervasive Computing, IEEE Volume 6, Issue 1, Jan.-March 2007 Page(s):64 – 72
- [107] Yong Zhang; Yikang Gu; Vlatkovic, V.; Xiaojuan Wang; “Progress of smart sensor and smart sensor networks”, Intelligent Control and Automation, 2004. WCICA 2004. Fifth World Congress on Volume 4, 15-19 June 2004 Page(s):3600 - 3606 Vol.4

- [108] Kanoun, O.; Trankler, H.-R.; "Sensor technology advances and future trends", Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on Volume 53, Issue 6, Dec. 2004 Page(s):1497 – 1501
- [109] Ramamurthy, H.; Prabhu, B.S.; Gadh, R.; Madni, A.M.; "Smart sensor platform for industrial monitoring and control" Sensors, 2005 IEEE30 Oct.-3 Nov. 2005 Page(s):4 pp.
- [110] Culler, D.; Estrin, D.; Srivastava, M.; "Guest Editors' Introduction: Overview of Sensor Networks", Computer Volume 37, Issue 8, Aug. 2004 Page(s):41 – 49
- [111] Frost Gorder, P.; "Sizing up smart dust", Computing in Science & Engineering [see also IEEE Computational Science and Engineering] Volume 5, Issue 6, Nov.-Dec. 2003 Page(s):6 - 9
- [112] Trevor J. Holroyd, *Acoustic Emission & Ultrasonics*, Coxmoor Publishing Company, Oxford, 2000, ISBN 1-90189-207-7.
- [113] Jorma Järviö, *Kunnossapito*, KP-Media Oy, Rajamäki, 2004, ISBN 952-99458-0-9.
- [114] Miinshiou Huang, Liang Jiang, Peter K. Liaw, Charlie R. Brooks, Rodger Seeley, and Dwaine L. Klarstrom, "Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research," *JOM-e*, Available at <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/9811/Huang/Huang-9811.html#ToC1>, Accessed on Apr. 2007.
- [115] Yibo Edward Fan, Fengshou Gu and Andrew Ball, "Condition Monitoring of Rolling Element Bearings Using Advanced Acoustic Emission Signal Analysis Technique," in *Proc. of the 18th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (COMADEM 2005)*, Cranfield, UK, Aug/Sep. 2005, pp. 491-498.
- [116] Juha Miettinen, *Condition Monitoring of Grease Lubricated Rolling Bearings by Acoustic Emission Measurements*, Doctoral Dissertation, Tampere University of Technology, 2000, ISBN 952-15-0477-3.
- [117] D. Mba and Raj B.K.N. Rao, "Development of Acoustic Emission Technology for Condition Monitoring and Diagnosis of Rotating Machines; Bearings, Pumps, Gearboxes, Engines and Rotating Structures," *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 38, pp. 3-16. ISSN 0583-1024.
- [118] Matti Sarkimo, *Akustinen emissio prosessiteollisuuden kunnonvalvontamenetelmänä*, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo, 1990, ISBN 951-38-3676-2.
- [119] 27th European Conference on Acoustic Emission Testing, Available at <http://www.ewgae.com/>, Accessed on Apr. 2007.
- [120] The Fifth International Conference on Acoustic Emission, Available at <http://www.aewg.org/>, Accessed on Apr. 2007.
- [121] COMADEM International, Available at <http://www.comadem.com>, Accessed on Apr. 2007.
- [122] 3rd International Conference on Tribology in Manufacturing Processes (ICTMP2007), Available at <http://www.ictmp2007.jp/>, Accessed on Apr. 2007.
- [123] The e-journal of Nondestructive Testing, Available at <http://www.ndt.net/v07n09.htm>, Accessed on Apr. 2007.
- [124] Denver University – Marvin A. Hamstad, Available at <http://www.engr.du.edu/profile/Marvin.htm>, Accessed on Apr. 2007.
- [125] Professor Kanji Ono, UCLA, Available at <http://www.seas.ucla.edu/ms/faculty1/ono.html>, Accessed on Apr. 2007.

- [126] Physical Acoustics Corporation - Publications, Available at <http://www.pacndt.com/index.aspx?go=research&focus=Publications.htm>, Accessed Apr. 2007.
- [127] Acoustic Emission Instrumentation from Vallen-Systeme GmbH, The Acoustic Emission Company, Available at <http://www.vallen.de>, Accessed on Apr. 2007.
- [128] Holroyd Instruments, Available at <http://www.holroyd-instruments.com/>, Accessed on Apr. 2007.
- [129] AV Technology Acoustic emission sensors, Available at <http://www.aesensors.co.uk/>, Accessed on Apr. 2007.
- [130] Paresh Girdhar, *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*, Elsevier, Oxford, 2004, ISBN 0-7506-6275-1.
- [131] Tuomo Lindh, *On the Condition Monitoring of Induction Machines*, Doctoral dissertation, Lappeenranta University of Technology, 2003, ISBN 951-764-841-3.
- [132] Stephen Bowling and Rodger Richey, "Two approaches to Measuring Acceleration," *Sensors*, Available at <http://www.sensorsmag.com/sensors/article/articleDetail.jsp?id=360974>, Accessed on Apr. 2007.
- [133] Petri Nohynek ja Veli Erkki Lumme, *Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset*, KP-Media Oy, Rajamäki, 1996, ISBN 951-97101-1-6.
- [134] Kunnonvalvontamenetelmät –luentomoniste, Tampereen teknillinen yliopisto, saatavissa <http://ruuvi.me.tut.fi/toteutus/24860/5kvml.PDF>, viitattu huhtikuussa 2007.
- [135] Tuomo Lindh ja Jarmo Partanen, *Sähkökäyttöjen mittaavan kunnonvalvonnan menetelmiä*, tutkimusraportti, Lappeenranta teknillinen korkeakoulu, 1999, ISBN 951-764-315-2.
- [136] Christos Emmanouilidis, Erkki Jantunen and John MacIntyre, "Flexible software for condition monitoring, incorporating novelty detection and diagnostics", *Computers in Industry*, Vol. 57, 2006, pp. 516-527. ISSN 0166-3615.
- [137] CMD – International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Available at <http://www.cmd2006.com/>, Accessed on Apr. 2007.
- [138] ICOVP – International Conference on Vibration Problems, Available at <http://www.becs.ac.in/icovp/>, Accessed on Apr. 2007.
- [139] Journal of Sound and Vibration, Available at http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/622899/description#description, Accessed on Apr. 2007.
- [140] Ennakoivan kunnonvalvonnan ja etädiagnostiikan tutkimusryhmä, saatavissa <http://www.ee.lut.fi/fi/lab/digiele/tutkimus/sekt/index.html>, viitattu huhtikuussa 2007.
- [141] OY | TTK | Konetekniikan osasto: Konediagnostiikka, saatavissa <http://me.oulu.fi/index.php?id=65>, viitattu huhtikuussa 2007.
- [142] School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering – The University of Manchester, Available at <http://www.mace.manchester.ac.uk/aboutus/staff/academic/profile/index.html?staffId=276>, Accessed on Apr. 2007.
- [143] Machining and Condition Monitoring Research Group, Available at <http://mcm.nottingham.ac.uk/>, Accessed on Apr. 2007.
- [144] SKF, Available at http://www.skf.com/portal/skf_fi/home, Accessed on Apr. 2007.
- [145] Wilcoxon, Available at <http://www.wilcoxon.com/>, Accessed on Apr. 2007.
- [146] Kistler, Available at <http://www.kistler.com/>, Accessed on Apr. 2007.
- [147] Metra, Available at <http://www.mmf.de/>, Accessed on Apr. 2007.

- [148] About MEMS and Nanotechnology, Available at <http://www.memsnet.org/mems/>, Accessed on April 2007.
- [149] K.J. Gabriel, "Microelectromechanical systems (MEMS) tutorial," in *Proc. of the International Test Conference*, Oct. 1998, pp. 432-441.
- [150] Tuomo Lindh, Jero Ahola ja Jarmo Partanen, *Oikosulkumoottorin laakerivian tunnistaminen mikrotöstyön kiihtyvyyssanturin avulla*, tutkimusraportti, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, 2001, ISBN 951-764-617-8.
- [151] VTI Technologies – Applications, Available at <http://www.vti.fi/en/products-solutions/solutions/>, Accessed on Apr. 2007.
- [152] Analog Devices ADXL202E datasheet Available at http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/ADXL202E.pdf, Accessed on Apr. 2007.
- [153] Carelay ACCxxx Available at <http://www.carelay.com/Datasheets/DatasivuACC.pdf>, Accessed on Apr. 2007.
- [154] International IEEE Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Available at <http://www.mems2008.org/>, Accessed on Apr. 2007.
- [155] IEEE SENSORS 2007 Conference, Available at <http://www.ieee-sensors2007.org/>, Accessed on Apr. 2007.
- [156] MicroMachines Centre, NTU – Links, Available at <http://mmc.mpe.ntu.edu.sg/links.asp>, Accessed on Apr. 2007.
- [157] CU MEMS Group, Available at http://mems.colorado.edu/pub_div1.htm, Accessed on Apr. 2007.
- [158] STMicroelectronics, Available at <http://www.st.com/stonline/>, Accessed on Apr. 2007.
- [159] Markku Pervilä, *Repijäpumppu toimii kuin jätepumppu*, saatavissa http://www.tekniikkatalous.fi/doc.ot?f_id=519349, viitattu huhtikuussa 2007.
- [160] Konenäkö, saatavissa <http://fi.wikipedia.org/wiki/Konen%C3%A4k%C3%B6>, viitattu huhtikuussa 2007.
- [161] Konenäkö Euroelektro Oy, saatavissa <http://www.euroelektro.fi/etusivu.html>, viitattu huhtikuussa 2007.
- [162] H. Golnabi and A. Asadpour, "Design and application of industrial machine vision systems," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Will be published in 2007. ISSN 0736-5845.
- [163] Esa Vilenius, *Röntgen näkee tukan sisälle*, saatavissa <http://www2.lappeenranta.fi/lehtitietokanta/artikkeli.php?id=953>, viitattu huhtikuussa 2007.
- [164] S. Kurada and C. Bradley, "A review of machine vision sensors for tool condition monitoring," *Computers in Industry*, Vol. 34, 1997, pp. 55-72. ISSN 0166-3615.
- [165] IAPR Conference on Machine Vision Applications, Available at <http://www.cvl.iis.u-tokyo.ac.jp/mva/>, Accessed on Apr. 2007.
- [166] British Machine Vision Conference, Available at <http://www.bmva.ac.uk/bmvc/index.html>, Accessed on Apr. 2007.
- [167] Pattern Recognition - Elsevier, Available at http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/328/description#description, Accessed on April 2007, ISSN 0031-3203.
- [168] Machine Vision Unit - Edinburgh, Available at <http://www.ipab.informatics.ed.ac.uk/mvu/>, Accessed on Apr. 2007.
- [169] Machine Vision Group, Available at <http://vision.fe.uni-lj.si/>, Accessed on Apr. 2007.

- [170] Beijer Electronics Automation – Konenäkö, saatavissa http://automation.beijer.fi/web/web_aut_fi.nsf/AllDocuments/C125701A003AA919C1256F1000487B08, viitattu huhtikuussa 2007.
- [171] Atostek Oy, saatavissa <http://www.atostek.com/konenako.html>, viitattu huhtikuussa 2007.
- [172] TC-Plan konenäkö, saatavissa <http://www.tc-plan.fi/fi/Konenako.html>, viitattu huhtikuussa 2007.
- [173] ABB, *Teknisiä tietoja ja taulukoita*, Ykkös-Offset, Vaasa, 2000, ISBN 951-99366-0-2.
- [174] Risto Tiainen, *Sähkökoneiden etädiagnostiikan kenttätason tiedonsiirtotarpeen arviointi ja instrumentoinnin kehittäminen*, diplomityö, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, 2004.
- [175] Veli Erkki Lumme, *Neurolaskenta kunnossapidossa*, saatavissa <http://www.kupinet.fi/documentindex.asp?id=85&type=1&show=1>, viitattu huhtikuussa 2007.
- [176] Tekes, *Neurolaskennan mahdollisuudet*, saatavissa http://www.tekes.fi/julkaisut/raportit/43_94/, viitattu huhtikuussa 2007.
- [177] D.E. Dimla, "Artificial neural networks approach to tool condition monitoring in a metal turning operation," in *Proc. of the 7th IEEE International Congress on Emerging Technologies and Factory Automation (ETF A 1999)*, Cranfield, UK, Oct. 1999, pp. 313-320.
- [178] Sanna Pöyhönen, *Support Machine Vector Based Classification in Condition Monitoring of Induction Motors*, Doctoral Dissertation, Helsinki University of Technology, 2004, ISBN 951-22-7154-0.
- [179] Augusto Hernandez-Solis, *Diagnosis of Centrifugal Pumps*, Msc. Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), 2006.
- [180] V. Sugumaran and K.I. Ramachandran, "Automated rule learning using decision tree for fuzzy classifier in fault diagnosis of roller bearing," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, 2007, pp. 2237-2247. ISSN 0888-3270.
- [181] Erkki Jantunen, *Indirect multisignal monitoring and diagnosis of drill wear*, Doctoral dissertation, Helsinki University of Technology, 2006, ISBN 951-38-6692-0.
- [182] J. Rafiee, F. Arvani, A. Harifi and M.H. Sadeghi, "Intelligent condition monitoring of a gearbox using artificial neural network," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, 2007, pp. 1746-1754. ISSN 0888-3270.
- [183] Simon Haykin, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, Prentice Hall, 1999, ISBN 0-1237-3350-1.
- [184] Wikipedia, neuroverkot, saatavissa <http://fi.wikipedia.org/wiki/Neuroverkko>, viitattu huhtikuussa 2007.
- [185] George J. Klir and Bo Yuan, *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*, Prentice Hall, ISBN 0-1310-1171-5.
- [186] Robert Fullér, *Fuzzy logic*, Available at <http://www.abo.fi/~rfuller/fuzs.html>, Accessed on Apr. 2007.
- [187] C. Cortes and V. N. Vapnik, "Support Vector Networks," *Machine Learning*, Vol. 20, 1995, pp. 273-297, ISSN 0885-6125.
- [188] Neural Networks, The Official Journal of the International Neural Network Society, ISSN 0893-6080.
- [189] International Joint Conference on Neural Networks, Available at <http://www.ijcnn2007.org/cfp.htm>, Accessed on Apr. 2007.

- [190] T. Berners-Lee, J. Hendler, and O. Lassila, "The Semantic Web," in *Scientific American*, May 2001, Available at http://www.sciam.com/print_version.cfm?articleID=00048144-10D2-1C70-84A9809EC588EF21, Accessed on Mar. 2007.
- [191] Eero Hyvönen, "Semanttinen Web – Mitä se on käytännössä?," ATK - Tietotekniikkaa yliopistoille, Helsingin yliopisto, tietotekniikkaosasto, no. 2/2004, ss. 38–42.
- [192] Airi Salminen, "Mikä on semanttinen Web?," Semanttinen Web ja funktionaalinen luettelointi seminaari, 3.5.2006.
- [193] A. Min Tjoa, Amin Andjomshoaa, Ferial Shayeganfar, Roland Wagner, "Semantic Web Challenges and New Requirements," in *Proc. of the 16th International Workshop on Database and Expert Systems Applications (DEXA '05)*, Wien, Austria, Aug. 2005, pp. 1160–1163.
- [194] Michael Wilson and Brian Matthews, "The Semantic Web: Prospects and Challenges," in *Proc. of 7th International Baltic Conference on Databases and Information Systems*, Chilton, UK, Jul. 2006, pp. 26–29.
- [195] World Wide Web Consortium, Available at <http://www.w3.org/>, Accessed on Mar. 2007.
- [196] Tim Berners-Lee, Semantic Web Roadmap, Sep. 1998, Available at <http://www.w3.org/DesignIssues/Semantic.html>, Accessed on Mar. 2007.
- [197] York Sure, Pascal Hitzler, Andreas Eberhart, and Rudi Studer, "The Semantic Web in One Day," *IEEE Intelligent Systems*, Vol. 20, No. 3, May/June. 2005, pp. 85–87.
- [198] Semantic Web Science Association, Available at <http://www.iswsa.org/>, Accessed on Mar. 2007.
- [199] European Semantic Systems Initiative, Available at <http://www.essi-cluster.org/>, Accessed on Mar. 2007.
- [200] International Semantic Web Conference, Available at <http://iswc.semanticweb.org/>, Accessed on Mar. 2007.
- [201] Barcodes, Available at <http://www.upccode.net/>, Accessed on Mar. 2007.
- [202] GS1 Finland Oy, Available at <http://www.gs1.fi/>, Accessed on Mar. 2007.
- [203] GS1, The Global Language of Business, Available at <http://www.gs1.org/>, Accessed on Mar. 2007.
- [204] Milan Petkovic, and Willem Jonker, *Security, Privacy, and Trust in Modern Data Management, Part: RFID and Privacy* written by Marc Langheinrich, Springer, Jul. 2007, ISBN 978-3-540-69860-9.
- [205] Ron Weinstein, "RFID: A Technical Overview and Its Application to the Enterprise," *IT Professional*, Vol. 7, No. 3, May/June. 2005, pp. 27–33.
- [206] EPCglobal, Available at <http://www.epcglobalinc.org/>, Accessed on Mar. 2007.
- [207] Ken Traub, Greg Allgair, Henri Barthel, Leo Burstein, John Garrett, Bernie Hogan, Bryan Rodrigues, Sanjay Sarma, Johannes Schmidt, Chuck Schramek, Roger Stewart, and KK Suen, "The EPCglobal Architecture Framework," Available at <http://www.epcglobalinc.org/standards>, Accessed on Mar. 2007.
- [208] T. Phillips, T. Karygiannis, and R. Kuhn, "Security Standards for the RFID Market," *IEEE Security & Privacy Magazine*, Vol. 3, No. 6, Nov./Dec. 2005, pp. 85–89.
- [209] K. Fishin, S. Roy, and B. Jiang, "Some Methods for Privacy in RFID Communication," Intel Research, Jun. 2004.
- [210] Selma Boumerdassi, Papa Kane Diop, Éric Renault, and Anne Wei, "T2MAP: a Two-Message Mutual Authentication Protocol for Low-Cost RFID Sensor Networks," in *Proc. of 64th IEEE Vehicular Technology Conference 2006 Fall (VTC2006-Fall)*, Montréal, Canada, Sep. 2006, pp. 1–5.

- [211] Melanie, R. Rieback, Bruno Crispo, and Andrew S. Tanenbaum, "Is Your Cat Infected with a Computer Virus?," in *Proc. of the 4th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PERCOM'06)*, Amsterdam, Netherlands, Mar. 2006, 10 pp.
- [212] Ballagas, R.; Borchers, J.; Rohs, M.; Sheridan, J.G.;"The smart phone: a ubiquitous input device". *Pervasive Computing*, IEEE Volume 5, Issue 1, Jan.-March 2006 Page(s):70 – 77
- [213] Leong, C.Y.; Ong, K.C.; Tan, K.K.; Gan, O.P.;"Near Field Communication and Bluetooth Bridge System for Mobile Commerce" *Industrial Informatics*, 2006 IEEE International Conference on Aug. 2006 Page(s):50 - 55
- [214] Kihun Chang, Yong-Ho Kim, Yong-Jun Kim, and Young Joong Yoon, "Patch Antenna Using Synthesized Polyimide for RFID Sensing," in *Proc. of the 9th European Conference on Wireless Technology*, Manchester, UK, Sep. 2006, pp. 83–86.
- [215] Roy Want, "Enabling Ubiquitous Sensing with RFID," *Computer*, Vol. 37. Issue 4, Apr. 2004, pp. 84–86.
- [216] Commission Communication on RFID sets the stage for the EU to realise benefits of applications based on EPCglobal standards, Immediate Release, Brussel, Mar. 2007, Available at <http://www.epcglobalinc.org/home>, Accessed on Mar. 2007.
- [217] Philips Global, Available at <http://www.philips.com/>, Accessed on Apr. 2007.
- [218] Texas Instruments, Available at <http://www.ti.com/>, Accessed on Apr. 2007.
- [219] Motorola, Available at <http://www.motorola.com/>, Accessed on Apr. 2007.
- [220] Atmel Corporation, Available at <http://www.atmel.com/>, Accessed on Apr. 2007.
- [221] STMicroelectronics, Available at <http://www.st.com/>, Accessed on Apr. 2007.
- [222] FEIG ELECTRONIC GmbH, Available at <http://www.feig.de/>, Accessed on Apr. 2007.
- [223] AWID Inc., Available at <http://www.awid.com/>, Accessed on Apr. 2007.
- [224] CAEN S.p.A, Available at <http://www.caen.it/>, Accessed on Apr. 2007.
- [225] TagMaster AB, Available at <http://www.tagmaster.com>, Accessed on Apr. 2007.
- [226] Mikko Santanen, "RFID teknologiakatsaus," Satakunnan ammattikorkeakoulu, O'Sata® tutkimus ja kehitys.
- [227] UPM Raflatac, Available at <http://www.upmraflatac.com/>, Accessed on Apr. 2007.
- [228] Elcoplast Oy, Available at <http://www.elcoplast.com/>, Accessed on Apr. 2007.
- [229] Feedback Oy, Available at <http://www.rfid-cardholder.com/>, Accessed on Apr. 2007.
- [230] Idesco Oy, Available at <http://www.idesco.fi/>, Accessed on Apr. 2007.
- [231] Nordic ID Oy, Available at <http://www.nordicid.com/>, Accessed on Apr. 2007.
- [232] P.V.Supa Oy, Available at <http://www.pv-supa.fi/>, Accessed on Apr. 2007.
- [233] Trackway Oy, Available at <http://www.trackway.eu/>, Accessed on Apr. 2007.
- [234] Tamtron Solution Oy, Available at <http://www.tamtronsolution.fi/>, Accessed on Apr. 2007.
- [235] Omron Electronics Oy, Available at http://www.europe.omron.com/fi_fi/cor/iab/home/, Accessed on Apr. 2007.
- [236] Toptunniste Oy, Available at <http://www.toptunniste.fi/>, Accessed on Apr. 2007.
- [237] Wavin-Labko Oy, Available at <http://www.labko.fi>, Accessed on Apr. 2007.
- [238] Viivakoodi Optiscan Oy, Available at <http://www.viivakoodi.fi>, Accessed on Apr. 2007.
- [239] Vilant systems Oy, Available at <http://www.vilant.com/>, Accessed on Apr. 2007.
- [240] RFID Journal, Available at <http://www.rfidjournal.com/>, Accessed on Apr. 2007.

[241] Nokia Field Force Solution, Available at <http://business.nokia.fi/A4272126>, Accessed on Apr. 2007.