

Vikki Mattila

# KUNNOSSAPITOLAJIT, KUNNOSSAPI- TOSTRATEGIAT JA ENNUSTAVA KUN- NOSSAPITO

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Veli-Pekka Pyrhönen  
Marraskuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Vikki Mattila: Kunnossapitolajit, kunnossapitostrategiat ja ennustava kunnossapito  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Teknisten tieteiden kandidaatin tutkinto-ohjelma  
Marraskuu 2022

---

Kunnossapito on toimintaa, jota suoritetaan kaikille järjestelmille niiden elinkaaren aikana. Kunnossapidon tarkoituksena on säilyttää järjestelmä tilassa tai palauttaa järjestelmä tilaan, jossa se kykenee suorittamaan sille asetettuja tehtäviä. Kunnossapitoa on toteutettu teknologia teollisuudessa eri tavoilla ja kunnossapidosta on tehty useita tieteellisiä tutkimuksia. Tieto on kuitenkin usein pirstaloitunutta, kohdennettu tiettyyn näkökulmaan ja aihealueen termistö ei ole yhdenmukaista tai vakiintunutta varsinkaan suomen kielellä.

Tämän työn aineisto on kerätty kirjallisuusselvityksenä ja lähdeaineistona on lukuisia kunnossapitoa käsitteleviä tutkimuksia, artikkeleita, kirjoja ja standardeja 2000-luvulta. Työn tavoitteena on tiivistää ja esittää selkeästi erilaisia kunnossapitolajeja ja -strategioita, sekä vertailla niiden vahvuuksia ja soveltamiskohteita. Lisäksi työn tavoitteena on koota yhteen kunnossapidon termistöä ja käsitteitä suomeksi. Työn tavoitteena on myös esitellä yleisesti ennustavan kunnossapidon tekniikoita, hyötyjä ja tulevaisuuden kehityssuuntia.

Työssä on pyritty määrittelemään ja yhtenäistämään kunnossapitoon liittyvää terminologiaa. Tämä ilmenee siten, että työssä on kerätty yhteen ja tunnistettu erilaisia kunnossapidon lajeja, malleja ja strategioita eri lähestymiskulmista ja aikakausilta. Kunnossapitolajeja ja -strategiota vertaillaan erilaisissa sovelluskohteissa ja niille myös arvioidaan järjestelmän kunnossapidon kokonaiskustannuksia.

Kunnossapidon kokonaiskustannusten tarkastelun perusteella voidaan yleisellä tasolla tunnistaa ennustavan kunnossapidon teoreettinen ylivoimaisuus kunnossapidon toteutustapana. Ennustavan kunnossapidon haasteena on historiallisesti ollut luotettava ja jatkuva tiedon kerääminen ja erityisesti tiedon analyysi. Meneillään oleva teollisen internetin ja digitalisaation trendi, sekä koneoppimisen työkalut, kykenevät vastaamaan ennustavan kunnossapidon haasteisiin. Työssä esitellään erilaisia tekniikoita, joilla ennustavan kunnossapidon tiedonkeruuta ja analyysiä voidaan toteuttaa ja käsitellään, millaisia tulevaisuuden mahdollisuuksia aihe tarjoaa.

Avainsanat: kunnossapito, kunnossapitolaji, kunnossapitostrategia, ennustava kunnossapito, huoltostrategia, ennustava huolto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. KUNNOSSAPITO JA HUOLTO.....	2
2.1 Kunnossapito .....	2
2.2 Huolto .....	2
3. KUNNOSSAPITOLAJIT .....	4
3.1 Korjaava kunnossapito.....	4
3.2 Ehkäisevä kunnossapito .....	4
3.3 Ennustava kunnossapito .....	5
3.4 Parantava ja muu kunnossapito .....	6
4. KUNNOSSAPITOSTRATEGIAT .....	7
4.1 Reagoiva kunnossapito.....	7
4.2 Luotettavuuskeskeinen kunnossapito.....	9
4.3 Kuntoon perustuva kunnossapito .....	10
4.4 Kunnossapidon kokonaiskustannukset.....	11
5. ENNUSTAVAN KUNNOSSAPIDON TEKNIIKAT .....	15
5.1 Anturointi ja mittaus.....	15
5.2 Mallipohjainen tilan arviointi .....	17
5.3 Koneoppiminen .....	18
6. YHTEENVETO.....	20
LÄHTEET .....	22

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

CBM	engl. Condition based maintenance tai Condition based monitoring, kuntoon perustuva kunnossapitostrategia
CM	engl. Corrective maintenance, korjaava kunnossapitolaji
JIT	engl. Just-in-Time, ”juuri ajallaan” -tuotantofilosofia
NDT	engl. Nondestructive testing, testaustaluokka
PdM	engl. Predictive maintenance, ennustava kunnossapitolaji
PM	engl. Preventive maintenance, ehkäisevä kunnossapitolaji
RBM	engl. Risk based maintenance, riskeihin perustuva kunnossapitostrategia
RCM	engl. Reliability centered maintenance, luotettavuuteen perustuva kunnossapitostrategia
RM	engl. Reactive maintenance, reagointiin perustuva kunnossapitostrategia
R2F	engl. Run to failure, hajoamiseen perustuva kunnossapitostrategia
TBM	engl. Time based maintenance, aikaan perustuva kunnossapitostrategia
TPM	engl. Total productive maintenance, tehokkuuteen perustuva kunnossapitofilosofia

# 1. JOHDANTO

Teknologian maailmassa eletään digitalisaation aikakautta. Datan kerääminen, siirtäminen ja analysointi on tehokkaampaa ja edullisempaa kuin koskaan aikaisemmin. Monet yritykset painottavat yhä useammin palveluliiketoiminnan malleja, kuten lisensointia, leasingia ja huoltosopimuksia, joissa keskiössä on maksullinen yhteistoimintamalli koko järjestelmän elinkaaren yli. Digitalisaation ja palveluliiketoiminnan takana on lähes aina kuitenkin jokin fyysinen järjestelmä, joka vaatii tehokasta kunnossapitoa. Kunnossapidon ja huollon tehostamista ja optimointia esitetäänkin usein ensimmäisenä sovelluskohteena digitalisaation tuomien työkalujen, kuten tekoälyn, kohteeksi.

Henkilökohtainen kokemukseni on teknologia-alan trendeistä huolimatta ollut se, että monet kansainväliset yritykset toteuttavat järjestelmiensä kunnossapidon toinen toistaan järjestämättömillä suunnitelmillä ja ilman minkäänlaista ennakoitua. Halusin siis lähteä selvittämään, millaista tutkimusta kunnossapidon toteuttamisesta on jo tehty ja millaisia kunnossapidon suuntauksia on olemassa, miten ne vertautuvat toisiinsa ja millaisia niiden hyödyt ovat. Työn tavoitteena on koota erilaisia kunnossapitostrategioita yhteen eri koulukunnista ja aikakausilta, sekä esittää ne tiivistetysti suomen kielellä. Lisäksi tavoitteena on tarkastella ennustavaa kunnossapitoa, sen tekniikoita ja digitalisaation mahdollistamia ennustavan kunnossapidon kehityssuuntia tulevaisuudessa.

Työ on toteutettu kirjallisuusselvityksenä. Selvityksen alkuvaiheessa tuli jo selväksi, että kunnossapidon aihepiirin sanastossa ja termistöissä on merkittävää hajanaisuutta, sekä vierailta kielillä että suomeksi. Käsitteiden määrittely ohjaa siis hyvin vahvasti työn rakennetta. Työssä esitellään aluksi kunnossapidon ja huollon käsitteet. Kolmannessa luvussa esitellään erilaiset kunnossapitolajit, eli kunnossapitotoimenpiteiden luokittelu. Neljännessä luvussa esitellään erilaisia kunnossapitostrategioita ja kunnossapidon aiheuttamia kustannuksia. Lopuksi tarkastellaan ennustavaan kunnossapitoon liittyviä tekniikoita ja niiden kehitystä.

## 2. KUNNOSSAPITO JA HUOLTO

Kun tarkastellaan laitteiden ja järjestelmien ylläpitoon liittyviä toimenpiteitä, puhutaan arkikielessä usein huoltamisesta. Tämä ei kuitenkaan ole täysin oikein. Huolto ja kunnossapito ovat käsitteitä, jotka menevät puhutussa kielessä usein sekaisin. Jotta voidaan jatkaa aiheen esittelyä ja tutkimista, on tärkeää määrittää termistö yhdenmukaiseksi. Seuraavissa alaluvuissa on eritelty termien kunnossapito ja huolto suomenkieliset määritelmät.

### 2.1 Kunnossapito

PSK Standardisointi määrittelee standardissa PSK6201 [1, s. 3] kunnossapidon tekniisiin, hallinnollisiin ja johtamiseen liittyviin toimenpiteisiin, joiden tarkoitus on ”säilyttää kohde tilassa tai palauttaa se tilaan, jossa se pystyy suorittamaan vaaditun toiminnon sen koko elinjakson aikana”. Tässä määritelmässä korostuu kunnossapidon käsitteen laajuus ja elinkaariajattelu. Tilastokeskus puolestaan määrittelee kunnossapidon seuraavasti: ”Ylläpitoon kuuluva toiminta, jossa kohteen ominaisuudet pysytetään uusimalla tai korjaamalla vialliset ja kuluneet osat ilman, että kohteen suhteellinen laatutaso olennaisesti muuttuu.” [2] Tässä määritelmässä korostuu uusiminen ja korjaaminen eli tekeminen.

Kunnossapidon voidaan siis määritellä olevan laaja käsite, joka sisältää runsaasti asioita hallinnollisesta ja strategisesta näkökulmasta yksittäisiin järjestelmään kohdistuviin toimenpiteisiin. Kunnossapidolla tarkoitetaan kuitenkin aina toimintaa, jossa keskiössä on järjestelmän säilyttäminen tai palauttaminen tilaan, jossa se voi suorittaa sille annettua tehtävää. Tärkeää on myös huomioida se, että kunnossapito ei ole käsitteenä riippuvainen toimialasta, vaan sitä voidaan soveltaa laajasti. Kunnossapito ei siis rajoitu vain sille miellettyyn teollisuuden ja teknisten laitteiden kontekstiin, vaan sanaa tulisi käyttää myös muiden järjestelmien kohdalla.

### 2.2 Huolto

Huolto tarkoittaa kunnossapidon toimenpidettä, johon sisältyy järjestelmän tarkastamista, säätöä, puhdistamista, rasvaamista ja muita vastaavia toimia. Huoltotoimenpiteille tyypillistä on nimenomaan se, että toimenpide on helppo toteuttaa, ja ettei järjestelmään

kohdistu merkittäviä muutoksia. Kunnossapitoon sisältyvä huolto ei tarkoita toimenpiteitä, joilla palautetaan jonkin viallisen kohteen vaadittu toiminto. Tällaisessa tilanteessa puhutaan korjauksesta. [1, s. 4]

Huolto on siis yksi yleinen kunnossapitotoimenpide, joka tulee usein esille tavallisten ihmisten arkielämässä. Tällaisia toimenpiteitä ovat esimerkiksi auto- tai suksihuolto. Huolto sanaa käytetään myös paljon muissa kunnossapidon ulkopuolisissa konteksteissa. Tällaisia esimerkkejä ovat esimerkiksi sosiaalihuolto, jätehuolto ja elintarvikehuolto. Tällöin huollossa on kyse jonkin toimintakyvyn turvaamisesta yhteiskunnassa. [3] Huolto sanaa käytetäänkin paljon erilaisissa yhteyksissä, mutta on tärkeää tunnistaa sen suhde kunnossapidon käsitteeseen.

## 3. KUNNOSSAPITOLAJIT

Luvussa 2 esitelty kunnossapidon määritelmä puhuu erilaisista kunnossapidon toimenpiteistä. Erilaisia toimenpiteitä on lukemattomia, joten niitä ei ole kannattavaa listata tai eritellä sellaisinaan. Kunnossapidon aihetta käsittelevässä tieteellisessä kirjallisuudessa käytetäänkin erilaisia luokitteluita kunnossapitolajeihin (engl. *maintenance types*) toimenpiteiden tunnusmerkistön mukaan. Kunnossapitolajien määrittely ei ole kirjallisuudessa yhdenmukaista sisällöltään tai nimeämiseltään. Erilaisten luokitteluiden yhdistelmänä on kuitenkin tunnistettavissa neljä selkeää merkittävää kunnossapitolajia, jotka tässä työssä on nimetty korjaavaksi-, ehkäiseväksi-, ennustavaksi- ja parantavaksi kunnossapidoksi. Tässä luvussa esitellään näiden kunnossapitolajien tunnusmerkistöt ja esimerkkejä lajeihin kuuluvista kunnossapitotoimenpiteistä.

### 3.1 Korjaava kunnossapito

Korjaava kunnossapito (engl. *corrective maintenance*) eli CM on kunnossapitoa, joka tehdään vian havaitsemisen jälkeen [1, s. 27]. Korjaavaan kunnossapitoon viitataan myös nimillä suunnittelematon kunnossapito (engl. *unplanned maintenance*) [4] ja häiriöperäinen kunnossapito (engl. *failure-based maintenance*) [5, s. 1626]. Korjaava kunnossapito saattaa aiheuttaa hyvin korkeita kustannuksia, sillä järjestelmän häiriö voi aiheuttaa usein seisona-aikaa ja muita tuotannon ongelmia. Lisäksi yksittäisen osan hajoaminen voi aiheuttaa vaurioita muualle järjestelmään, ja täten aiheuttaa lisää korjattavaa. [4] Korjaavan kunnossapidon tarvetta ei voi yleensä välttää. Erilaisia yllättäviä laitevikoja ja ulkoisia ongelmia voi ilmentua satunnaisesti koska tahansa. [5, s. 1626]

Korjaava kunnossapito on kunnossapitolajeista selkeästi vanhin. Sen ensimmäiset ilmenemiset sijoittuvat 1900-luvun alkuun. CM juontaa juurensa aikaan, jolloin järjestelmissä oli merkittävästi vähemmän liikkuvia osia ja järjestelmät kehitettiin ensisijaisesti kestämään pitkiä aikoja. Tuohon aikaan myös tekniikat kunnossapitotarpeen ennakoointiin olivat olemattomia. CM on siis kehittynyt vastaamaan hyvin yksinkertaiseen tilanteeseen, eli jos jokin on hajalla, korjataan se takaisin kuntoon.

### 3.2 Ehkäisevä kunnossapito

Ehkäisevä kunnossapito (engl. *preventive maintenance*) eli PM on kunnossapitoa, joka tehdään ilman, että laitteessa tiedettäisiin olevan vikaa. Ehkäisevää kunnossapitoa ovat erilaiset tarkastus-, testaus- ja huoltotoimenpiteet. [6] PM on usein aikataulutettua, joko



kalenterin tai käyttöajan mukaan. PM:n pääasiallinen tarkoitus on ylläpitää järjestelmän tehokkuutta, ennaltaehkäistä hajoamista ja pidentää järjestelmän käyttöikä. [4] [5, s. 1626]

Ehkäisevän kunnossapidon muotoja ovat esimerkiksi määräaikaishuollot, määräaikaishuollot, kunnonvalvonta ja käytönseuranta. Määräaikaishuoltoon voi sisältyä asioita, kuten öljynvaihto, rasvaaminen ja putsaminen. Määräaikaishuolto kohdistuu komponentteihin, joilla on selkeä käyttöikä. Kunnonvalvonta on erilaisiin mittauksiin ja tunnusuuksiin perustuvaa järjestelmän seuranta pidemmän ajan yli, kun taas käytönseuranta on jatkuvaa pienimuotoista tarkkailua ja huoltoa, jota suoritetaan normaalin toiminnan ohessa. [1, s. 40] [6] [7, s. 86] Ehkäisevän kunnossapidon alle mahtuu paljon erilaisia toimenpiteitä, joita voi tehdä monella eri tavalla. Ehkäisevä kunnossapito riippuukin hyvin kiinteästi jokaisen toimijan kunnossapitostrategiasta ja suunnitelmasta.

### 3.3 Ennustava kunnossapito

Ennustava kunnossapito (engl. *predictive maintenance*) eli PdM on kunnossapitoa, jossa käytetään ennustavia työkaluja määrittämään, milloin kunnossapitoa tarvitsee suorittaa. PdM perustuu järjestelmän ja lopputuotteen jatkuvaan tarkkailuun ja saatavan datan analyysiin. [8, s. 2]

Kerättävää dataa voivat olla esimerkiksi aistinvaraiset havainnot, kuten näkö, kuulo ja hajuhavainnot, fysikaaliset perussuureet, kuten lämpötilat, paineet ja mitat, sähköiset perussuureet taikka värähtely- ja äänimittaukset. Lisäksi järjestelmälle voidaan tehdä ainetta rikkomattomia mittauksia (engl. *Nondestructive testing*) eli NDT-mittauksia, kuten röntgen- ja ultraäänimittauksia. Lisäksi voidaan tehdä erilaisia analyysejä, kuten öljy- tai hiukkasmittauksia esimerkiksi järjestelmän voiteluöljyistä tai pakokaasuista. [6] Näiden lisäksi esimerkiksi lopputuotteen laaduntarkkailu on myös kunnossapidon kannalta kiinnostavaa dataa.

Kuten huomataan, ennustavaa kunnossapitoa varten järjestelmästä voidaan kerätä runsaasti erilaista dataa. Se, mitä dataa on kerättävissä, riippuu luonnollisesti aina tapauskohtaisesti järjestelmästä. Datan kerääminen ja tilastointi voidaan tehdä myös automaattisesti tai manuaalisesti. Data ei kuitenkaan tue sellaisenaan ennustavaa kunnossapitoa, eli jotta kyetään ennustamaan kunnossapidon tarve etukäteen, dataa täytyy analysoida.

Datan analyysissä pyritään tunnistamaan selkeitä poikkeamia, eri arvojen vaikutusta järjestelmän toimintaan ja kunnossapidon tunnettuja tarpeita. Käytännössä ennustava kunnossapitosuunnitelma laaditaan koneoppimisen avulla, sillä ihmisen kyky tunnistaa kunnossapidon tarvetta, ja sen optimaalista ajoitusta, on rajallinen [4, s. 2]

### 3.4 Parantava ja muu kunnossapito

Aiemmin esiteltyssä kunnossapidon määritelmässä kunnossapidon tavoite on säilyttää kohteen tila tai palauttaa se alentuneesta tilasta. Yllä esitellyt kunnossapitolajit keskittyvät hyvin vahvasti näihin tavoitteisiin, mutta järjestelmän elinkaaren aikana voi tapahtua myös muita kunnossapidon toimia. Parantavalla kunnossapidolla tarkoitetaan parannusinvestointeja, järjestelmäanalytiikan kehittämistä, kunnossapito-ohjeistuksen päivittämistä ja turvallisuuden tai ympäristöystävällisyyden lisäämistä. Parantava kunnossapito voi olla myös yhdistelmä edellisiä. [1]

Parannusinvestointi voi olla ajoittain välttämättömyys, kun esimerkiksi järjestelmän teknologiat eivät ole enää saatavilla ja ne tulee korvata uudemmilla. Kyse on kunnossapidollisesta toiminnallisuuden säilyttämisestä, mutta toimenpiteellä saatetaan saavuttaa parempaa suorituskykyä, luotettavuutta tai energiatehokkuutta, mitä järjestelmästä alun perin saatiin. Parantavan kunnossapidon ja modernisointi-investoinnin välinen raja on joissain tapauksissa haastavaa.

Järjestelmäanalytiikan ja kunnossapito-ohjeistuksen kehittäminen ovat toimia, jotka parantavat järjestelmän kunnossapidon toimivuutta ja tehokkuutta. Ne eivät ole suoria kunnossapidollisia toimia, mutta kuuluvat silti kunnossapidon piiriin. Järjestelmäanalytiikan kehittämisellä pyritään esimerkiksi mahdollistamaan PdM:ää ja kunnossapito-ohjeistuksen kehittämisellä yhtenäistämään kunnossapitoa järjestelmän elinkaaren yli sekä dokumentaation laatua.

Muuta kunnossapitoa ovat esimerkiksi siivous, sekä kunnossapidon suunnittelu, johtaminen ja kehitys. Nämä ovat niitä toimia, jotka mahdollistavat kunnossapidon ja luovat sille rakenteen ja toimintaperiaatteet. Seuraavassa luvussa tarkastellaan erilaisia kunnossapitostrategioita ja lähestymistapoja kunnossapidon toteuttamiseen.

## 4. KUNNOSSAPITOSTRATEGIAT

Kunnossapidon voi toteuttaa monella eri tavalla. Kotimaisen standardin määritelmän mukaan kunnossapitostrategialla tarkoitetaan johtamisen keinoja, joiden avulla saavutetaan kunnossapidon tavoitteet. Kunnossapitostrategia määrittää yleissuunnitelman, resurssit ja tiedonhallinnan keinot kunnossapidon toteuttamiseen. [1, s. 16]

Kunnossapitostrategian valinta ja suunnittelu on haastavaa, ja kyseessä on aina liiketoiminnallinen päätös. Toimijat punnitsevat aina kunnossapitostrategian valinnassa kilpailukykyä kansainvälisillä markkinoilla, ympäristönäkökulmia, turvallisuusnäkökulmia sekä tietysti toiminnan kannattavuutta ja laatua. Kunnossapitostrategia vaikuttaa luonnollisesti näihin kaikkiin. [5, s. 1622–1623]

Tähän lukuun on koottu yhteen erilaisten lähteiden pohjalta kolme merkittävää kunnossapitostrategiaa, jotka linkittyvät hyvin vahvasti luvussa 3 esiteltyihin kunnossapitolajeihin. Luvussa esitellyt kunnossapitostrategiat eivät ole yksiselitteisesti ainoat olemassa olevat strategiat, vaan työn toteuttajan näkemys useiden lähteiden pohjalta. Usein kunnossapitostrategiat syntyvät erilaisten lähestymiskulmien optimoinnista, mutta näissä tavoitteissa päästään usein hyvin lähelle jotain tässä luvussa esitellyistä strategioista. Mainittavan arvoista on myös se, että jotkin lähteet esittelevät luvussa 3 listattuja kunnossapitolajeja sellaisenaan kunnossapitostrategioina.

Lisäksi tässä luvussa käydään läpi erilaisia kunnossapidosta aiheutuvia kustannuslajeja ja esitellään yleinen teoria kustannusten minimoimisesta. Tämä teoria sitoo erilaiset kunnossapitostrategiat hyvin yhteen ja osoittaa, ettei mikään yksittäinen strategia toimi sellaisenaan.

### 4.1 Reagoiva kunnossapito

Reagoiva kunnossapito (engl. *Reactive maintenance*), eli RM on kunnossapitostrategia, jossa nimensä mukaisesti reagoidaan syntyneeseen kunnossapidon tarpeeseen. Vastaavia strategioita pienillä eroilla tunnetaan myös nimillä R2F (engl. *Run to Failure*), eli suomeksi häiriöön ajaminen, sekä RBM (engl. *Risk Based Maintenance*), eli riskipohjainen kunnossapito. Kaikille näistä yhteistä on oletus siitä, että odotetaan vian ilmenemistä ja korjataan vasta sitten, kun komponentti on hajonnut. Kunnossapitolajeista painottuu siis CM. [8, s. 2] [5, s. 1641–1645] RM on historiallisesti kunnossapidon ensimmäistä sukupolvea 1940-luvulta, jolloin järjestelmät olivat yksinkertaisia ja helppoja huoltaa. [11, s. 654]

Tyypillistä RM:lle on se, että kunnossapitostrategiaa käyttävät organisaatiot kokevat säästävönsä rahaa sillä, kun kunnossapitoa ei säännöllisesti tehdä, ei tarvitse maksaa kunnossapitotyöstä, -materiaaleista ja tuotantoseisokista. RM ei kuitenkaan pärjää vahvasti kunnossapidon kokonaiskustannusten tarkastelussa, johon syvennyttään alaluvussa 4.4. Jotkin lähteet erittelevät, ettei RM ole kunnossapitostrategia ollenkaan. Tämä on tietysti ymmärrettävää, sillä kun kunnossapitostrategiaa ei ole, päädytään kunnossapito toteuttamaan reaktiivisesti. RM voi kuitenkin olla toimiva kunnossapitostrategia.

R2F on hyvin radikaali RM-kunnossapitostrategia, jossa on suorastaan tarkoituksenmukaista ajaa järjestelmää siihen pisteeseen, että jokin osa hajoaa. Hajonnut osa tai koko järjestelmä vaihdetaan kokonaan uuteen. [8, s.2] R2F voi olla hyvä ja tehokas kunnossapitostrategia tietyn tyyppisille komponenteille tai järjestelmille. Tällaisia ovat esimerkiksi komponentit, joiden hajoamisen todennäköisyys ei juurikaan kasva ajan myötä, tai joiden hajoaminen ei ole kriittistä järjestelmälle. Ensimmäisessä vaihtoehdossa ennakoivista toimenpiteistä ei ole hyötyä ja toisessa vika voidaan korjata jossain muussa yhteydessä, eikä tuotantoon tule taukoa. R2F voi olla myös kannattavaa, mikäli kunnossapidettävä komponenttia tai järjestelmää on hyvin haastavaa tai kallista huoltaa. [10]

RBM ei ole kunnossapitostrategiana puhtaasti RM:ää, mutta siitä voidaan tunnistaa samaa alkuperää, ja se onkin kilpaileva lähestymistapa muihin tässä luvussa esitettyihin kunnossapitostrategioihin. RBM:n ideana on tunnistaa järjestelmän toimintavarmuuteen liittyvät riskit, arvioida niiden kokonaisvaikutus ja keskittyä niihin asioihin, joista aiheutuu suurin haitta. Korkeimman riskin omaavat kohteet valmistaudutaan huoltamaan ja korjaamaan siten, että riski laskee hyväksyttävälle tasalle. [11, s. 654–655] Vaikka tässä kunnossapitostrategiassa on aktiivinen lähestyminen, on kyse silti kunnossapitotarpeisiin reagoimisessa.

Tärkeää on huomata, että RM:ää ei voi välttää koskaan täysin, sillä yllättäviä korjaustarpeita, kuten sähkövikoja ja törmäyksiä, saattaa ilmetä olettamattomasti milloin tahansa. [5, s. 1624] Kuitenkin RM kuvataan lähtökohtaisena kunnossapitostrategiana huonona ja kannattamattomana lähestymistapana, jonka määrä tulisi minimoida. Syynä tähän on se, että RM voi johtaa toistuviin ja pitkiin tuotantokatkoksiin, joilla voi olla suurikin haittaava vaikutus organisaation toimintaan. [8, s. 18] [5, s. 1624] Usein RM kunnossapitostrategiana kertoo siitä, että kunnossapidosta vastaavilla työntekijöillä on korkea kompetenssi ja he kykenevät tekemään korjaavia kunnossapitotoimenpiteitä erittäin tehokkaasti. Vaikka kunnossapidon kompetenssi olisikin korkea, tällaiset RM:ään tukeutuvat organisaatiot eivät kuitenkaan ole erilaisissa vertailuissa kilpailukykyisiä. [7, s. 37]

## 4.2 Luotettavuuskeskeinen kunnossapito

Luotettavuuskeskeinen kunnossapito (engl. *Reliability centered maintenance*) eli RCM on kunnossapitostrategia, jonka keskiössä on järjestelmän luotettavuus sille suunnitellussa käytössä ja luotettavaan tilaan pääsemiseksi vaadittava kunnossapito. RCM on saanut alkunsa ilmailualalta, jossa järjestelmän hajoaminen kesken käytön voi johtaa vaaratilanteisiin tai ihmishenkien menettämiseen. [7, s. 92] RCM edellyttää sitä, että järjestelmän toiminta tunnetaan, ja että järjestelmästä pystytään tunnistamaan ne osat ja osakokonaisuudet, joiden toiminta on järjestelmän luotettavuudelle kriittistä. Näiden osien ja osakokonaisuuksien tulee olla huollettavissa siten, että ennakoivat kunnossapitotoimet vaikuttavat luotettavuuteen. [12, s. 15]

Siinä missä RCM on kehitetty lähinnä Yhdysvalloissa, sille löytyy hyvin vastaava, Japanissa kehitetty kilpaileva strategia. Kokonaistuottava kunnossapito (engl. *Total productive maintenance*), eli TPM on kunnossapitofilosofia, jonka tarkoitus on minimoida järjestelmän alasajo aika sekä yllättävät häiriöt. Filosofian keskiössä on, että edellä mainittujen tilanteiden minimoimisella vastaavasti maksimoidaan järjestelmän tuottava aika. TPM:lle poikkeuksellista on ajatus siitä, että kunnossapito mielletään osaksi tuotantoprosessia. Tämä tarkoittaa sitä, että kunnossapitoa suoritetaan aina kun se on mahdollista, sekä sitä, että kunnossapidon ensisijainen tarkoitus on ennaltaehkäistä häiriöitä kuten järjestelmän rajoitettua käyttöä tai käyttökatkoja. TPM kunnossapitostrategialla siis pyritään saavuttamaan mahdollisimman paljon tuotannosta saatua hyötyä mahdollisimman pienillä kunnossapidon panostuksilla. [5, s. 1645]

Mainittakoon vielä RCM:n kaltaisista kunnossapitostrategioista aikaan perustuva kunnossapito (engl. *Time based maintenance*), eli TBM. Tässä strategiassa erilaisia ehkäisevän kunnossapidon (PM) toimia tehdään kello- tai kalenteriohjatusti. Kello-ohjaus tarkoittaa järjestelmän käyttöaikaa, kalenteriohjaus tarkoittaa sitä, että toimenpiteet suoritetaan tiettyinä päivinä käyttöasteesta huolimatta. [9, s. 128–129] TBM:n tavoitteena on parantaa säännöllisesti järjestelmän tehokkuutta ehkäisemällä häiriöitä. Aikaan perustuva kunnossapito saattaa kuitenkin olla turhaa ja aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia. Tällaiseen tilanteeseen päädytään silloin, kun kunnossapitoa tehdään liian usein. [4, s. 2] TBM:n suurimmat edut ovat sen yksinkertaisuus ja ennalta-arvattavuus. Kunnossapitoon tarvittu aika voidaan sopeuttaa järjestelmän käyttöön, sen sijaan että järjestelmän käyttö lakkaisi yllättävän kunnossapitoa vaativan häiriön vuoksi.

Esitellyistä kunnossapitostrategioista kaikki keskittyvät hyvin vahvasti ehkäisevään kunnossapitolajiin ja niiden tehtävänä on ennalta estää tai ehkäistä yllättäviä häiriöitä ja jär-

jestelmän pysähtyminen ennakoivilla toimenpiteillä. Näissä kaikissa on siis pääasiallisena tarkoituksena kunnossapidon toimin minimoida yllättävät häiriöt ja maksimoida järjestelmän tehokkuus. Toisinaanottuna kaikissa pyritään parantamaan luottamusta järjestelmän toimintaan.

RCM strategiat ovat erittäin hyviä kunnossapitostrategioita silloin, kun järjestelmän häiriöt käytössä eivät ole hyväksyttäviä tai niistä aiheutuu kohtuuttoman suuret kustannukset. Tällaisia järjestelmiä ovat esimerkiksi lentokoneet, prosessiteollisuuden prosessit, joiden keskeyttäminen on vaikeaa, sekä järjestelmät, joiden hajoaminen aiheuttaa vaaraa ympäristölleen. RCM strategioiden kustannustehokas toteuttaminen on haastavaa ja hyvin tapauskohtaista. Yleisimpänä haasteena kustannusnäkökulmasta ovat liiallinen huolto ja kunnossapito.

### 4.3 Kuntoon perustuva kunnossapito

Kuntoon perustuva kunnossapito (engl. *Condition based maintenance*) tai kunnan tarkkailuun perustuva kunnossapito (engl. *Condition based monitoring*), eli CBM on kunnossapitostrategia, jossa kunnossapitotoimenpide tehdään silloin kun järjestelmä tai sen osa osoittaa viitteitä siitä, että se on hajoamassa. Tarkoitus ei ole siis ennaltaehkäistä häiriöitä huoltotoimenpiteillä, eikä reagoida havaittuun häiriöön, vaan tunnistaa kunnossapitotoimen tarve järjestelmän mitattavan kunnan pohjalta ennen kuin häiriö ilmenee. Jotta CBM:ää voidaan toteuttaa, tarvitsee järjestelmässä tai osajärjestelmässä olla kolme ominaisuutta. Ensimmäisenä pitää olla mitattava parametri, joka korreloi järjestelmän heikkenemisen kanssa. Toisena mittausdatasta pystytään, jollain tekniikalla havaitsemaan muutoksia, jotka viittaavat järjestelmän muutoksiin. Ja kolmantena vaatimuksena mittausdatan kerääminen ei edellytä järjestelmän tai osajärjestelmän purkamista tai hajottamista. [12, s. 79]

CBM on siis kunnossapitostrategia, jossa kaikki kunnossapito pyritään tekemään ennustavana kunnossapitona. CBM on kehittynyt 1980- ja 1990-luvulla Just-in-Time (JIT) johtamis- ja tuotantofilosofian pohjalta, mistä johtuu CBM:n perustarve välttää turhaa työtä ja vastavuoroisesti kunnossapidon odottamista. 1900-luvun lopulla ja 2000-luvun alussa myös tekniset järjestelmät muuttuivat merkittävästi monimutkaisimmiksi, automaation ja anturoinnin määrä kasvoi ja kunnossapidon laatuvaatimukset nousivat. Merkittävää on myös se, että kunnossapidon suunniteluun ja johtamiseen on tullut saataville tietoteknisiä järjestelmiä. Tällainen teknologian kehitys mahdollisti CBM:n soveltamisen, mutta samaan aikaan CBM tarjosi hyvän ja kustannustehokkaan ratkaisun moderneihin kunnossapitotarpeisiin. [11, s. 654]

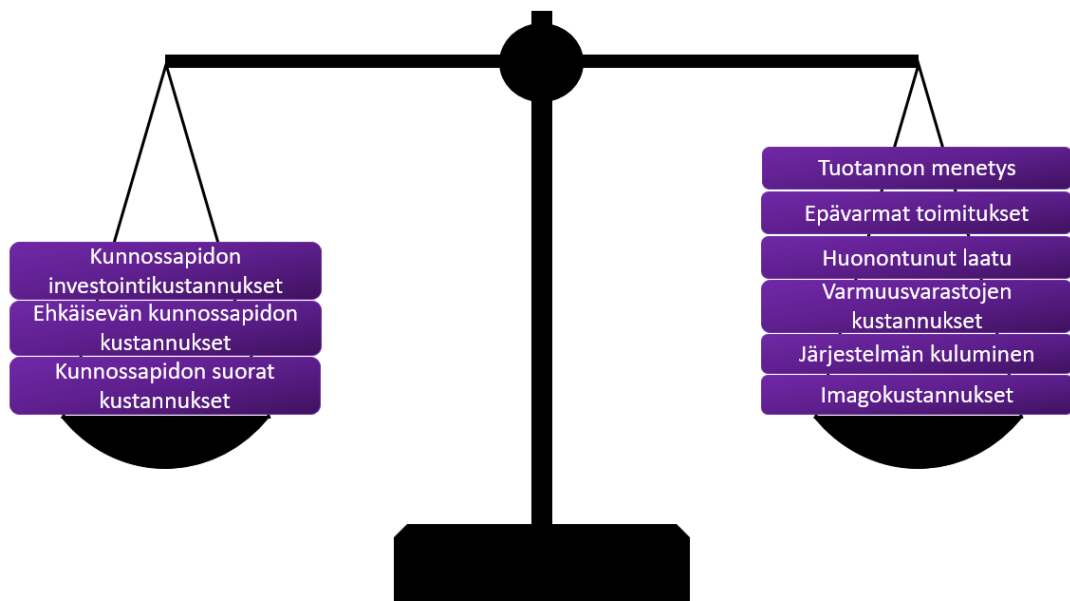
CBM on kunnossapitostrategiana ja tarkastelukulmana myös useissa teollisen internetin kunnossapitoon liittyvissä sovellusintegraatioissa. Erilaisten järjestelmien älyllistäminen tarkoittaa usein sitä, että järjestelmästä on saatavilla runsaasti enemmän tietoa, jota voidaan soveltaa poikkeamien ja häiriöiden havainnointiin ja ennustamiseen. CBM:n pohjalta toteutettu älykäs kunnossapito mahdollistaa sen, että kunnossapitotoimet suoritetaan juuri oikeaan aikaan, ja että kunnossapito parantaa järjestelmän toimintaa. Teollisen internetin yleistymisen erilaisten laite- ja konevalmistajien tuotteissa näkyy siten, että asiakkaille tarjotaan tuotteen mukana suoraan älykkäitä kunnossapidon tarkkailutyökaluja ja -palveluita. Nämä työkalut ja palvelut ovat usein sulautettuna järjestelmien hallintasovelluksiin, mutta mahdollistavat järjestelmien käyttäjille helpon mahdollisuuden toteuttaa kunnossapitoaan järjestelmien todellisen tilan ja tarpeen mukaan. Suomalaisista teknologiayrityksistä tällaisia älykkäitä ratkaisuja järjestelmiinsä tarjoavat esimerkiksi Ponsse, Wärstilä ja KONE. [13, s. 135–136]

#### **4.4 Kunnossapidon kokonaiskustannukset**

Jo aikaisemmin todettiin, että kunnossapitostrategian valinta on liiketoiminnallinen päätös, ja että strategian valinta usein suoritetaan arvioimalla kunnossapitostrategian kokonaiskustannusten perusteella. Käytännössä tämä tarkoittaa kaikkea kunnossapitostrategian vaikutusta järjestelmän kokonaistuottavuuteen hyvässä ja pahassa. Kunnossapito nähdään usein vain kustannuksena, ja monet yritykset saattavat herkästi leikata ensimmäisenä juuri kunnossapidosta [9, s. 44]. Koska kunnossapidon rahoitus on usein vähissä, on ensiarvoisen tärkeää tunnistaa kunnossapidon kustannustekijät, ja löytää sellainen kunnossapitostrategia, joka minimoi kokonaiskustannukset.

Erilaisia kustannuksia, joita kunnossapito aiheuttaa, ovat työkustannukset, materiaalikustannukset, sekä kunnossapitoaikana menetetty tuotanto. Lisäksi joissain järjestelmissä esimerkiksi tuotantoprosessin alasajo kunnossapitoa varten ja uudelleen käynnistyksen jälkeen saattaa maksaa runsaasti. Erilaisia kustannuksia, joita kunnossapidon laiminlyöminen ja siitä aiheutuva häiriö aiheuttavat, ovat tuotannon menetykset, välikivastointikulujen kasvaminen ja ripeästä CM:stä aiheutuvat kustannukset. Lisäksi pitkittyneissä tuotantoseisokeissa saatetaan joutua maksamaan mahdollisia viivästymiskorjauksia. Laiminlyödyistä kunnossapidosta voi aiheutua myös laadunalenemistä, joka voi johtaa menetettyyn tuotantoaikaan ja raaka-aineeseen. [6]

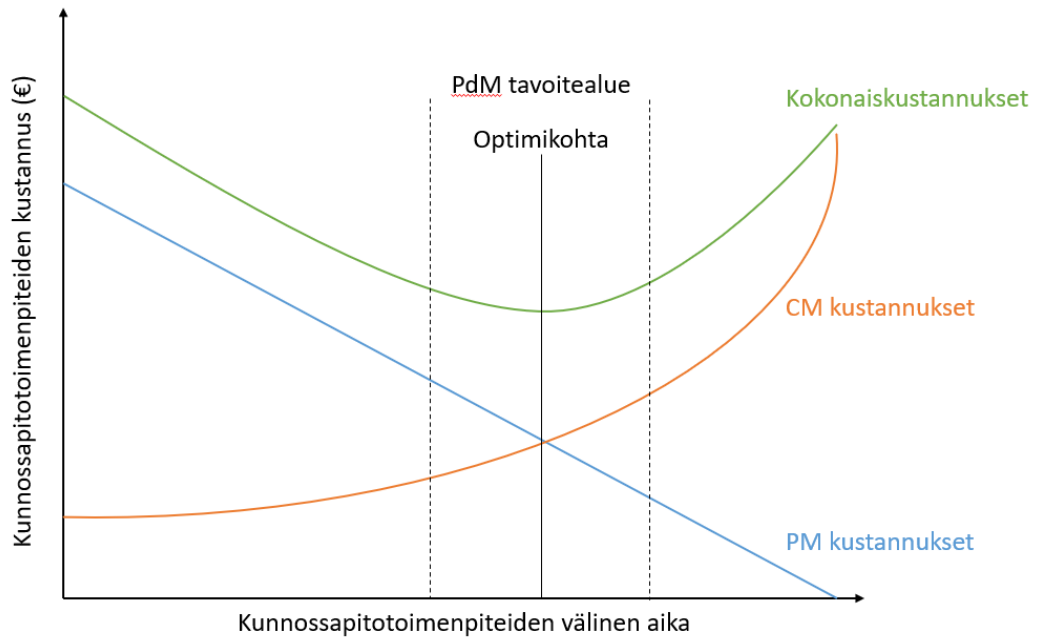
Vastaavasti hyvin toteutetusta kunnossapidosta voi olla yritykselle sekä suoraa että epäsuoraa hyötyä. Järjestelmistä saadaan enemmän tuotantoaikaa tai -tehoa irti niin vuositasolla, kuin myös pidennetyn elinkaaren muodossa. Tämä näkyy järjestelmäinvestointien kannattavuudessa. Toimitusvarmuus ja laatu pysyvät korkealla, mikä näkyy katteessa ja asiakastyytyvyydessä. Hyvin kunnossapidetty järjestelmä on myös energia- tehokkaampi ja ympäristöystävällisempi. Lisäksi kunnossapidolla voidaan parantaa työturvallisuutta, kun sattumanvaraisia häiriöitä tapahtuu harvemmin. Kaikkien näiden asioiden vaikutusta on hankalaa laskea ja arvottaa, mutta niiden merkitys yrityksen toiminnassa tulee myös huomioida kunnossapidossa. Edellä esitettyjen kustannustekijöiden vaikutusta on pyritty tiivistämään Kuvaan 1. [6]



**Kuva 1:** Erilaisten kunnossapitokustannusten tasapainottelu, muokattu lähteestä [6].

Kuva 1 havainnollistaa, kuinka kunnossapitostartegiaa valittaessa tulee punnita kunnossapidon kehittämis- ja toteuttamiskustannuksia verrattuna heikosti toteutetusta kunnossapidosta aiheutuviin kustannuksiin. Kuva 1 voi antaa ymmärtää, että vasemmalla olevat toimenpiteet olisivat jotenkin yksiselitteisesti positiivisia ja tavoiteltavia asioita. Näin ei kuitenkaan ole ja kustannuslajeja ei ole turhaan aseteltu vaakapuntariin. Mikäli kunnossapidon taloudellista panosta lisätään ylikorosteusti, eli tässä tapauksessa lisätään kustannuksia Kuvassa 1 vaa'an vasemmalle puolelle, päädytään tilanteeseen, jossa kunnossapitoon käytettävät resurssit eivät ole tasapainossa niistä saatavan hyödyn kanssa ja järjestelmän tila on ylikunnossapidetty. Kuvaan 2 on mallinnettu kuvaajaesitys havainnollistamaan kokonaiskustannuksia kunnossapitoasteen suhteen.





**Kuva 2:** Kokonaiskustannusten kehittyminen kunnossapitotoimien välisen ajan suhteen, muokattu lähteestä [9, s. 197].

Kuvassa 2 on esitetty geneerisen järjestelmän kunnossapidon kokonaiskustannukset kunnossapitotoimenpiteiden välisen ajan suhteen. Kuvaaja on karkea malli, joka yleistää kunnossapidon kokonaiskustannusten kehitystä sen suhteen, milloin järjestelmää kunnossapidetään liikaa ja milloin vastaavasti liian vähän. Kuvaajaan on myös sidottu luvussa 3 esitellyt kunnossapitolajit. Tarkastellaan hieman tarkemmin PM:n, CM:n ja PdM tavoitealueen kuvaajia sekä niiden muotoa.

PM on esitetty Kuvassa 2 lineaarisena muuttuvana kustannuksena, eli mitä tiheämpään tahtiin ehkäisevää kunnossapitoa tehdään, sitä enemmän kustannuksia kyseisestä kunnossapitolajista syntyy. Tämä on loogista, sillä jos järjestelmä on koko ajan kunnossapidossa, niin maksetaan pelkästä kunnossapidosta ja menetystä tuottavasta ajasta. Lineaarisuus ei kuitenkaan välttämättä ole intuitiivista, sillä aikaisemmin on esitetty kuinka PM:stä ja PM:ää hyödyntävistä kunnossapitostrategioista on merkittävästi suorja ja epäsuoria hyötyjä. Syy tälle löytyy siitä, että PM:n toimenpiteiden tiheys vaikuttaa CM:n tarpeeseen ja kustannuksiin, mikä on nähtävissä Kuvasta 2.

CM:stä aiheutuvat kustannukset on esitetty Kuvassa 2 kasvaviksi eksponentiaalisesti kunnossapitotoimenpiteiden välisen ajan suhteen. Tämä on loogista, koska silloin kun kunnossapitotoimenpiteitä tehdään säännöllisesti, häiriöitä tapahtuu harvoin ja järjestelmän tilan palauttaminen korjaavilla toimenpiteillä on usein nopeaa. Vastaavasti kun kunnossapitotoimenpiteitä tehdään harvoin, ne ovat aina reagoivia ja korjaavia toimia. Järjestelmän epäluotettavuudesta aiheutuvia kustannuksia kertyy, häiriöt ovat laajempia,

häiriöiden korjaaminen maksaa enemmän ja järjestelmän tuottavuus on matala. Eksponentiaalinen kustannusten kasvu selittyy siis tällä. Nollasta poikkeava kustannuskäyrän asetusarvo johtuu taas vastaavasti siitä, että CM:ltä ei voi koskaan täysin välttyä PM:n tasosta huolimatta, sillä satunnaisia järjestelmän tai osajärjestelmän häiriöitä voi tapahtua.

Kokonaiskustannusten funktio on Kuvassa 2 pelkistetty CM:n ja PM:n kustannusten summa. Kokonaiskustannusten funktio osoittaa kunnossapitostrategiaa määrittävän keskeisen ajatuksen siitä, että liiallinen kunnossapito on huono, mutta niin on myös liian vähäinen. Optimaalisen tilan saavuttaminen on tietysti satunnaistekijöiden vuoksi mahdollonta, mutta PdM:n rooli on pyrkiä mahdollisimman lähelle tätä. PdM:n idea on tunnistaa kunnossapidon tarpeen ajankohta, jolloin pyritään mahdollisimman lähelle 'ei liian aikaisin, muttei liian myöhään' -ajankohtaa. Tämä ajankohta saattaa usein myös korreloida kokonaiskustannusten minimin kanssa, mutta ei välttämättä ole sitä. Ennustavan kunnossapidon toteutustavan mukaan saatetaan esimerkiksi painottaa esimerkiksi enemmän järjestelmän luotettavuutta toteutuvien kokonaiskustannusten sijaan.

Kuvasta 2 on hyvä huomata vielä se, että kyseessä on vain yleistetty teoreettinen malli. Todellisuudessa on äärimmäisen vaikea mallintaa järjestelmäkohtaisesti kunnossapidon kustannuksia ja vaikutuksia näin yksiselitteisesti. Satunnaistekijät aiheuttavat mallintamiseen aina ongelmia, mutta järjestelmän muutkin ominaisuudet voivat tuottaa haasteita optimikohdan kuvaamiseen. Esimerkiksi PM:n kustannukset kunnossapitotoimenpiteiden välin suhteen voivat vaihdella esimerkiksi hyvin vähän tai CM:stä johtuva asetusarvo voi olla hyvin korkea. Joka tapauksessa ennustavalla kunnossapidolla pyritään pääsemään hyvin lähelle optimoitua kokonaiskustannusalueita. Seuraavassa luvussa tarkastellaan, millaisilla tekniikoilla ennustavaa kunnossapitoa voidaan toteuttaa.

## 5. ENNUSTAVAN KUNNOSSAPIDON TEKNIIKAT

Luvussa 3 käytiin läpi ennustavan kunnossapitolajiin kuuluvien kunnossapitotoimenpiteiden yleinen rakenne; kerää dataa, analysoi dataa, tunnista kunnossapitotoimenpiteet ja niiden ajoitus. Seuraavaksi tutustutaan erilaisiin tekniikoihin, joilla näitä tehtäviä on toteutettu ja tullaan tulevaisuudessa toteuttamaan. Anturoinnin ja mittauksen tekniikat vastaavat datan keräämisestä, mallipohjainen tilan arviointi on yksi toimiva datan analyysityökalu ja koneoppimista voidaan hyödyntää datan analyysissä, sekä erityisesti tarvittavien kunnossapitotarpeiden tunnistamisessa ja ajoittamisessa.

Ennustavan kunnossapidon toteuttaminen vaatii yleisesti aina investoinnin sen toteuttamiseen tarvittaviin tekniikoihin. Tässä työssä ei tarkasti kuvata tekniikoiden mahdollisia sovelluskohteita tai kustannustehokkuutta. Tulee kuitenkin aina muistaa, että PdM:ää mahdollistavien tekniikoiden lisääminen järjestelmään on aina investointi ja tämän investoinnin tulee olla kannattava.

Tämän luvun on tarkoitus esittää, millaisia mahdollisia tekniikoita on mahdollista hyödyntää, ja mitä niiden erityiset piirteet ovat. Tässä luvussa ei kuitenkaan esitellä kaikkia olemassa olevia ennustavaa kunnossapitoa mahdollistavia tekniikoita, vaan joukkoon on valittu mielenkiintoisia tekniikoita erityisesti automaatiotekniikan ja systeemien hallinnan näkökulmasta.

### 5.1 Anturointi ja mittaus

Erilaisia anturointi- ja mittausratkaisuita käytetään datan keräämiseen järjestelmästä. Kunnossapidon ja erityisesti PdM:n näkökulmasta mielenkiintoiset antureilla ja muilla mittausmenetelmillä tarkasteltavat suureet eivät ole juurikaan muuttuneet viimeisen 25 vuoden aikana. Merkittävää muutosta on kuitenkin tapahtunut näiden tekniikoiden tarkkuudessa, hinnassa ja luonteessa. Tarkastellaan ensin erilaisia anturointi- ja mittausratkaisuita, joita kunnossapidon tarpeisiin tehdään, ja sitten niiden muutosta.

Yleisiä antureita ovat fysikaalisia perussuureita mittaavat tila-anturit, joilla tarkkaillaan järjestelmän sisäistä ja ulkopuolista tilaa. Tällaisia antureita ovat esimerkiksi järjestelmää ympäröivää lämpötilaa, ilmanpainetta ja ilmankosteutta mittaavat anturit tai esimerkiksi järjestelmässä kiertävän voiteluöljyn lämpötilaa, hydraulikkajärjestelmien paineita tai prosessiteollisuuden prosessin pinnankorkeutta mittaavat anturit. Lisäksi anturit voivat mitata sähkölaitteiden sähköisiä perussuureita, kuten virtaa, jännitettä ja resistanssia.

Monesti tällaisia antureita tarvitaan jo pelkästään prosessin ohjaamiseen, mutta niistä saatava data voi olla tarpeellista myös kunnossapidon näkökulmasta.

Harvinaisempia antureita, jotka soveltuvat nimenomaan ennustavaan kunnossapitoon, ovat esimerkiksi värähtelyanturit ja mikrofonit, joilla tarkkaillaan järjestelmän värähtelyä, resonointia ja ääntä. Usein äänen voi havaita ihminenkin, mutta mikrofoni anturina mahdollistaa laajemman äänialan. Värähtely ja äänimittausta tekeviä antureita sovelletaan yleensä järjestelmiin, joissa on pyöriviä osia ja erityisesti laakereita sekä hammaspyöriä. Joissain tapauksissa värähtelyantureita ja mikrofoneja on sovellettu kokonaisille moottoreille ja vaihdelaatikoille onnistuneesti ennustamaan kunnossapidon tarvetta. Nimenomaan värähtelyanturien keräämä data on yleisin toimiva lähtötieto PdM:ää tekeville koneoppimisen algoritmeille [8, s. 5].

Siinä missä anturit ovat osa järjestelmää ja mittaavat suureitaan jatkuvasti tai säännöllisesti, voidaan järjestelmästä ottaa erilaisia mittauksia myös ulkoisilla mittalaitteilla. Tällaisia mittauksia ovat esimerkiksi erilaiset dimensioiden mittaukset, NDT-mittaukset ja öljyanalyysit. Dimensioiden mittauksella tarkoitetaan erilaisilla mittalaitteilla suoritettavia muotojen, sijaintien ja väljyyksien mittauksia. Tämä voi tarkoittaa esimerkiksi pyörän säteen, rakenteiden siirtymän tai ketjun venymän mittausta. NDT-mittaukset puolestaan ovat mittauksia, joilla tarkastellaan rakenteiden sisäistä eheyttä ilman, että järjestelmää rasitetaan tai vaurioitetaan. Tällaisia mittauksia toteutetaan ultraääni- ja röntgenlaitteilla ja niillä pyritään tunnistamaan rakenteiden halkeamia, väsymismurtumia ja korroosion aiheuttamia hapertumisia. Öljyanalyysejä voidaan tehdä esimerkiksi voiteluöljylle. Näissä analyyseissä pyritään tarkastelemaan, kuinka paljon metallia on mekaanisen rasituksen mukana irronnut voitelu öljyn sekaan. Metallin määrä ja yksittäisien havaintojen koko voi selkeästi ennustaa kunnossapidon tarvetta.

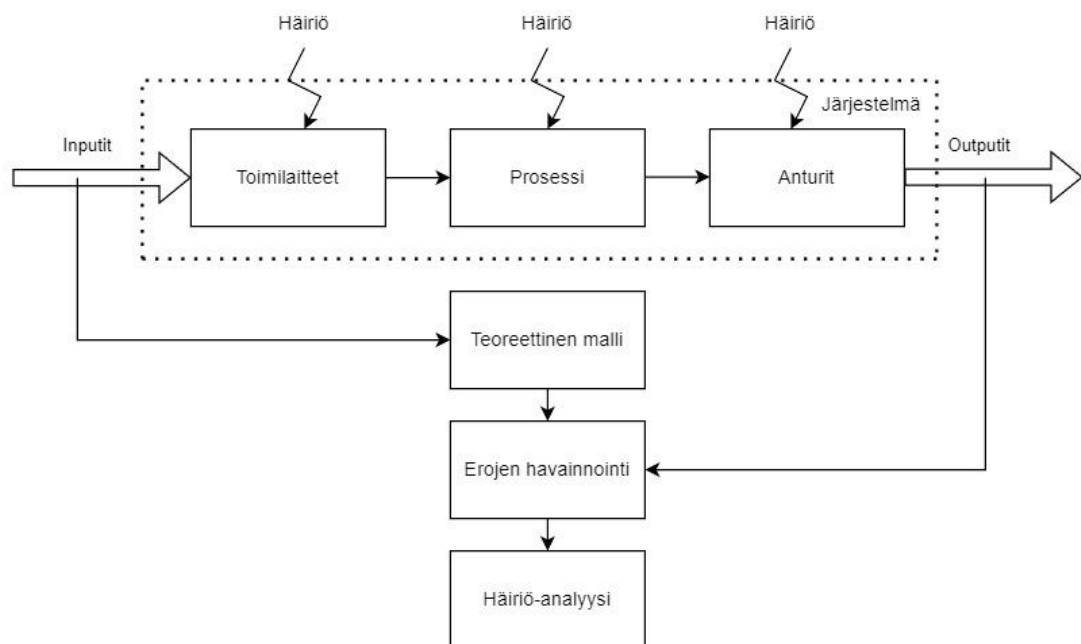
Mittaukset saattavat yksittäisinä kertoina olla toimiva tapa ennustaa kunnossapidon tarvetta. Tästä hyvä esimerkki on esimerkiksi lämpökameramittaus, joka saattaa helposti paikantaa merkittäviä lämpöhäviöitä aiheuttavan viallisen komponentin tai mekaanisesti vaurioituneen osan. Yleisesti ottaen kuitenkin mittauksia tulee tehdä säännöllisesti joko järjestelmän ollessa käynnissä tai seisonnassa mittauksen tarpeen mukaan. Yksittäinen mittaus ei välttämättä kerro järjestelmän tilasta, systemaattisesti ja säännöllisesti tehdyt ja tilastoidut mittaustiedot puolestaan voivat osoittaa järjestelmän tilan kehityksestä kunnossapidon tarpeita.

Vaikka anturoinnilla tarkasteltavat perussuureet ovat pysyneet samoina 90-luvun lopusta asti, on merkittävää huomata, että anturitekniikka on tässä ajassa kehittynyt merkittä-

västi. Suurimpina kehityksinä on ollut kustannus, tarkkuus ja langattomuus. Anturitekniikoista on tullut koko 2000-luvun ajan merkittävästi edullisempia. Edullisuuden vaikuttaa merkittävästi langattomien tekniikoiden yleistymien, joka poistaa tarpeen kaapeloinnin suunnittelulle ja asentamiselle. Yleisiä käytettyjä langattomia tekniikoita ovat esimerkiksi Bluetooth ja WiFi [4, s. 4].

## 5.2 Mallipohjainen tilan arviointi

Kuten aikaisemmin on mainittu, ennustavassa kunnossapidossa voidaan hyödyntää järjestelmästä mitatun datan analyysiin mallipohjaista tilan arviointia (engl. *Model-based condition monitoring*). Kyse on menetelmästä, joka soveltuu tyypillisille automaatiojärjestelmille, joista tunnetaan järjestelmän inputit, outputit sekä teoreettinen malli järjestelmästä. Inputit ovat tunnettuja järjestelmän ohjaussuureita ja outputit järjestelmän suoritteita. Molemmat ovat luotettavasti mitattavissa olevia datajoukkoja. Teoreettisen mallin luominen järjestelmästä, edellyttää järjestelmän tarkkaa tuntemusta, mikä on mallipohjaisen tilan arvioinnin suurin haaste [8, s. 2]. Mallipohjaiseen tilan arviointiin käytettävä menetelmä on esitetty Kuvassa 3.



**Kuva 3:** Mallipohjaisen tilan arvioinnin menetelmä, muokattu lähteestä [15, s. 31].

Kuten Kuvasta 3 nähdään, menetelmä perustuu siihen, että järjestelmästä olevaan teoreettiseen malliin syötetään samoja inputeja kuin todelliseen järjestelmään ja verrataan mallin ja todellisen järjestelmän outputteja keskenään. Todellisen järjestelmän outputit

ovat aina poikkeavia, sillä järjestelmään kohdistuu todellisuudessa erilaisia arvaamattomia häiriöitä. Häiriöt voivat olla täysin luonnollisia, kuten prosessin ideaalisen mallintamisen puutteet verrattuna todellisuuteen, tai antureiden mittauskohina, mutta syynä voi olla myös vikaantunut toimilaite. Häiriöt aiheuttavat malliin verrattuna eroavaisuuksia outputissa, joiden pohjalta voidaan lähteä tekemään analyysiä häiriöiden laadusta. Mallipohjaisessa tilan arvioinnissa on ennustavan kunnossapidon näkökulmasta oleellista tunnistaa nimenomaan ne häiriöt, jotka aiheutuvat esimerkiksi huollon tarpeesta tai osakomponenttien heikkenemisestä. Vaikka tässä työssä ei tarkastella sitä teoriaa, jolla menetelmän avulla häiriöitä pystytään erottelemaan järjestelmästä, on kyseessä kuitenkin tekniikka, joka edellyttää hyvin tarkkaa järjestelmän tuntemusta ja siksi se ei sovellu kaikkiin sovelluskohteisiin.

Mallipohjaista tilan arviointia on kuitenkin onnistuttu käyttämään vikojen ja häiriöiden tunnistamiseen ja ennustamiseen erilaisissa sovelluskohteissa. Tällaisia ovat esimerkiksi sähkömoottorit, sähkömagneettiset venttiilit, pumput ja työstökoneet. [15] Mallipohjainen tilan arviointi antaa siihen soveltuviissa kohteissa hyviä viitteitä siitä, milloin kunnossapitoa tulisi tehdä. Se ei kuitenkaan itsellään mahdollista ennustavaa kunnossapitoa. Mallipohjainen tilan arviointi on ollut 2000-luvun alussa edistynein ennustavan kunnossapidon tekninen työkalu, mutta kuten anturoinninkin osalta, siitä on enemmän hyötyä koneoppimisen tekniikoille.

### 5.3 Koneoppiminen

Tässä luvussa on jo käsitelty datan keräämisen merkitystä ennustavassa kunnossapidossa. Anturitekniikoiden kehittyessä, digitalisaation edetessä ja järjestelmien tietoverkottuessa, kunnossapidon tarpeisiin on saatavilla todella suuria määriä dataa. Keskeiseksi tekijäksi kunnossapidon osalta nouseekin kyky ymmärtää saatua tietoa ja reagoida siihen. Tätä mahdollistaa ennustavan kunnossapidon viimeisin tekninen kehityskävel, joka on koneoppiminen. Koneoppimisella tarkoitetaan tietojärjestelmiä, jotka kykenevät käsittelemään laajoja tietomääriä ja oppimaan tiedon merkityksiä ja asioiden välisiä kausaalisuhteita. [13, s. 90]

Koneoppiminen on käsitteenä vielä toistaiseksi hyvin tuore. Käsitteestä on tehty tutkimusta laajamittaisesti vuodesta 2015 alkaen. Vaikka ennustava kunnossapito on tutkitavana käsitteenä merkittävästi vanhempi, on koneoppimisen hyödyntämistä ennustavassa kunnossapidossa tutkittu enemmän vasta vuodesta 2018 alkaen. Kyse on siis varsin tuoreesta tekniikasta, joka ei ole vielä yleistynyt erilaisten järjestelmien laitekantaan. Voidaan kuitenkin olettaa, että koneoppiminen ja sen mahdollistama entistä tehokkaampi PdM tulee olemaan tulevaisuudessa kunnossapidon kehityssuunta. [4, s. 7]

Koneoppimisalgoritmeilla voidaan yleisesti pyrkiä tunnistamaan ja ennustamaan kunnossapidon tarpeita erään luokittelun mukaan kahdella eri tavalla. Voidaan tarkastella järjestelmän nykyistä tilaa ja tunnistaa sieltä heikkouksia ja vikoja, eli muodostaa niin kutsuttu kuvaava malli. Toinen vaihtoehto on tarkastella järjestelmän tai vastaavien järjestelmien historiadataa ja tunnistaa erilaisia kehityksiä, joilla voidaan arvioida järjestelmän tulevaisuuden tilaa, eli muodostaa niin kutsuttu ennustava malli. [14, s. 95] Ennustavan mallin koneoppimista voidaan hyödyntää myös silloin, kun järjestelmään on tullut yllättävä häiriö, jolle ei onnistuta tunnistamaan syytä.

Kuvaavan mallin koneoppimisalgoritmeilla voidaan tarkastella, onko järjestelmästä saatava data sellaista, kuin pitäisi, ja onko datasta tunnistettavissa ikään kuin piilossa olevia kehityksiä. Kuvaavien mallien suurin haaste on se, että koneoppiminen ei välttämättä tunnista mitä kehitykset ovat merkityksellisiä, mutta voi silti esittää ne ihmiselle. [14, s. 95] Kuvaavan mallin koneoppimisalgoritmeilla voidaan esimerkiksi tunnistaa, että järjestelmän osa on tulossa käyttöikänsä päähän, vaikka kyseisen osan anturointi ei vielä anna suoraan tähän viittaavaa tulosta. Tämä on ennustavan kunnossapidon kannalta hyödyllistä, sillä osan vaihtoon voidaan varautua hyvissä ajoin.

Ennustavan mallin koneoppimisalgoritmeilla käydään yleensä läpi kyseisestä järjestelmästä tai vastaavista järjestelmistä saatua käyttödataa, ja algoritmi pyrkii tunnistamaan datasta toistuvia kaavoja ja sitä, kuinka kaavoja voidaan hyödyntää jatkossa [14, s. 95]. Ennustavassa kunnossapidossa tämä voisi ilmetä esimerkiksi siten, että koneoppimisen algoritmi tunnistaa tiettyjen datapisteiden johtavan aina tietyn osan vaurioitumiseen. Koneoppimisen avulla tällainen kaavanmukainen kehitys pystyisi jatkossa tunnistamaan osan vaurioitumisen ajankohdan, jolloin kunnossapitotoimet voidaan ajoittaa tarkasti.

Niissä tilanteissa, joissa järjestelmään on sattunut yllättävä häiriö, voidaan soveltaa myös ennustavan mallin koneoppimista ja onnistua tunnistamaan mahdollisia poikkeavia syitä häiriöön. Joissain tilanteissa järjestelmään sovitettu koneoppimisen työkalu voi myös pystyä määrittämään erilaisia syitä häiriölle puutteellisestakin historiadatasta. Tällainen työkalu mahdollistaa sekä nopeampia ratkaisuja, parantaa käsitystä järjestelmästä, että mahdollistaa ennustavan kunnossapidon jatkossa vastaaville häiriöille.

## 6. YHTEENVETO

Tässä työssä käytiin läpi otsikon aiheet, eli kunnossapitolajit, kunnossapitostrategiat ja ennustavan kunnossapidon erityistä roolia kunnossapitolajina. Lisäksi työ määrittelee kunnossapidon aihepiirin termistöä laajasti ja tarkastelee kunnossapidon kokonaiskustannuksia. Erilaiset kunnossapitolajit ja -strategiat on tiivistetty ja esitetty yksinkertaisella lajittelulla, ja niiden välisiä etuja on vertailtu.

Lopputuloksena luotiin tarkka määritelmä kunnossapidolle, sekä tarkasteltiin huollon käsitettä puhekielisenä ilmauksena ja kunnossapitotoimenpiteenä. Kunnossapitolajeiksi määriteltiin erilaisista kunnossapitotoimenpiteistä koostuvat kokonaisuudet, joita ovat korjaava kunnossapito, ehkäisevä kunnossapito ja ennustava kunnossapito. Korjaavaa kunnossapitoa ovat toimenpiteet, joita tehdään silloin kun jokin järjestelmä on jo hajonnut. Ehkäisevää kunnossapitoa ovat toimenpiteet, joita tehdään ennen kuin tiedetään järjestelmän hajooneen. Ennustavan kunnossapidon toimenpiteitä ovat järjestelmästä tiedon kerääminen, analysointi ja analyysin pohjalta tehtävät toimenpiteet.

Ympäri maailmaa ja eri ajanjaksoina on esitetty runsaasti erilaisia kunnossapitostrategioita. Työssä nämä strategiat tiivistettiin kolmeen pääluokkaan, jotka ovat reagoivan kunnossapidon strategiat, järjestelmän luotettavuuteen pohjautuvat kunnossapitostrategiat ja kuntoon perustuvat kunnossapitostrategiat. Jokaiseen luokkaan mahtuu runsaasti erilaisia näkemyksiä strategian lähestymiskulman mukaan ja jokaiselle strategiatyypille on esitelty hyviä sovelluskohteita. Tunnistetut kunnossapitostrategioiden luokat korreloivat vahvasti työssä esitettyjen kunnossapitolajien kanssa. Reagoiva kunnossapito koostuu lähes täysin korjaavasta kunnossapidosta, luotettavuuteen pohjaavat kunnossapitostrategiat painottavat ehkäisevän kunnossapidon menetelmiä, ja kuntoon perustuva kunnossapito toteutetaan yleensä ennustavan kunnossapidon menetelmillä.

Kunnossapitostrategioiden soveltuvuus järjestelmään tulee määritellä tapauskohtaisesti, mutta yleensä kunnossapitostrategian valinta riippuu kunnossapidon kokonaiskustannuksista. Työssä esitettiin, millaisia kustannuksia kunnossapidosta ja sen laiminlyönnistä voi syntyä ja kuinka ne yleisesti riippuvat kunnossapitolajien suhteesta. Havainnoksi saatiin yleisesti pätevä malli, jonka mukaan ei saa huoltaa liian usein, mutta ei saa huoltaa liian harvoinkaan. Tämän arvioinnissa tunnistettiin ennustavan kunnossapidon roolin olevan keskiössä.

Ennustavaan kunnossapitoon käytettäviä tekniikoita käytiin läpi yleisellä tasolla. Työssä tunnistettiin tekniikoiden osalta merkittäväksi osakokonaisuuksiksi erilaiset anturointi- ja



mittausratkaisut, mallipohjaiset tila-arviot, sekä koneoppimisen työkalut kunnossapitotarpeen ennustamisessa. Anturointi- ja mittaussuureet ovat säilyneet pitkään samoina, mutta näiden tekniikoiden edullisuus ja tietoverkottuneisuus mahdollistavat yhä suuremman määrän tietoa järjestelmän tilasta. Mallipohjaiset tila-arviot mahdollistavat vikojen ja häiriöiden tunnistamisen yksinkertaisista ja hyvin tunnetuista järjestelmistä mitatun tiedon avulla, ja koneoppimisen mallit puolestaan käyttävät antureiden, mittausten ja mallien tuottamaa tietoa tunnistukseen kunnossapidon tarpeita ja niiden ajankohtia.

Työssä ei ehditä syvällisesti pureutua yksittäisiin aiheisiin, joten työn lukijalle saattaa jäädä runsaasti kysyttävää. Erityisesti kyseenalaista on se, millaisella prosessilla työn tekijä on päätenyt yleistämään kunnossapitolajit ja strategiat kolmeen luokkaan ja millaisia vaihtoehtoisia luokitteluita olisi mahdollista tehdä. Pelastavaa on se, miten paljon englanninkielistä termistöä työssä on esitelty. Termistön ja lähteiden pohjalta voi omaaloitteisesti tutustua esiteltyihin ja mainitsematta jätettyihin strategioihin tai luokitteluihin. Lisäksi työ ei ota kantaa lainkaan kunnossapitostrategian laatimiseen ja toteuttamiseen liittyviin ongelmiin tai ennustavan kunnossapidon tekniikoihin käytännössä. Työn tarkoitus on lopulta vain tuoda esille kunnossapidon yleisiä periaatteita, lajeja ja strategioita selkeästi ja tutustuttaa lukija ennustavan kunnossapidon hyötyihin ja teknisiin mahdollisuuksiin, missä työ tekijänsä mielestä kuitenkin onnistuu.

## LÄHTEET

- [1] Standardi PSK6201, 4. painos, Kunnossapito. Käsitteet ja määritelmät, PSK Standardisointi, 2022.
- [2] Tilastokeskus, Käsitteet, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.10.2022): <https://www.stat.fi/meta/kas/kunnossapito.html>
- [3] Suomisanakirja.fi, huolto, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.10.2022): <https://www.suomisanakirja.fi/huolto>
- [4] Z. Çınar, A. Nuhu, Q. Zeeshan, O. Korhan, M. Asmael, B. Safaei, Machine Learning in Predictive Maintenance Towards Sustainable Smart Manufacturing in Industry 4.0, Sustainability (Basel, Switzerland), 2020, Vol.12(19), p. 8211. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/su12198211>
- [5] R.S. Velmurugan & T. Dhingra, Maintenance strategy selection and its impact in maintenance function: A conceptual framework, International journal of operations & production management, 2015, Vol.35(12), pp. 1622–1661. Saatavissa: <http://www.emeraldinsight.com/0144-3577.htm>
- [6] Opetushallitus, Kunnossapito, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.10.2022): <http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet.html>
- [7] R. Smith & B. Hawkins, Lean maintenance reduce costs, improve quality, and increase market share, Elsevier Butterworth Heinemann, 2004.
- [8] T. Carvalho, F. Soares, R. Vita, R. Francisco, J. Basto, S. Alcalá, A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance, Computers & Industrial Engineering, 2019, Vol.137, p. 106024. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>
- [9] D. Galar, P. Sandborn, U. Kumar, Maintenance costs and life cycle cost analysis, Boca Raton : CRC Press, 2017.
- [10] Fiix software, Run to failure: make it part of your maintenance planning, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.10.2022): <https://www.fiixsoftware.com/blog/run-failure-make-part-maintenance-planning/>
- [11] N. Arunraj & J. Maiti, Risk-based maintenance—Techniques and applications, Journal of hazardous materials, 2007, Vol.142(3), pp. 653–661. Saatavissa: <https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1016/j.jhazmat.2006.06.069>
- [12] M. Ben-Daya, U. Kumar, D. Murthy, Introduction to Maintenance Engineering: Modelling, Optimization and Management, John Wiley & Sons Incorporated, 2016.
- [13] M. Martinsuo & T. Kärri, Teollinen internet uudistaa palveluliiketoimintaa ja kunnossapitoa, Kunnossapitoyhdistys ProMaint, 2017.

- [14] A. Diez-Olivan, J. Del Ser, D. Galar, B. Sierra, Data fusion and machine learning for industrial prognosis: Trends and perspectives towards Industry 4.0, *Information fusion*, 2019, Vol.50, pp. 92–111. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2018.10.005>
- [15] R. Isermann, *Fault-Diagnosis Applications Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-tolerant Systems*, Berlin Heidelberg, 2011.