

Todennäköisyyspohjainen käyttövarmuuden ja kunnossapidon suunnittelu

Heikki Pernu

Tampereen teknillinen yliopisto, Korkeakoulunkatu 6, Box 589, 33101 Tampere
Puh. (03) 31152628, telefax (03) 31152307, heikki.pernu@tut.fi

AVAINSANAT käyttövarmuus, kunnossapito, vika, luotettavuus, käytettävyys

TIIVISTELMÄ

Tampereen teknillisessä yliopistossa on useiden vuosien ajan kehitetty todennäköisyyspohjaisia käyttövarmuuden ja kunnossapidon suunnittelumenetelmiä. Kehitetyt menetelmät perustuvat stokastiseen simulointiin, jossa matkitaan ”reaaliajassa” satunnaisotoksilla osien vikaantumista ja korjaamista sekä muita tutkittavia tapahtumia.

Käyttövarmuuden ja kunnossapidon suunnittelutarpeen perimmäinen syy löytyy erilaisten rasitusten alaisten laitteiden äärellisestä kestoikästä. Järjestelmän vikaantuminen, ns. TOP-tapahtuma, kuvataan vikapuuna, joka kytkee kausaalisesti vikalogiikan avulla yhteen TOP-tapahtuman ja varsinaisen vian juurisyy. Voimme tunnistaa TOP-tapahtuman potentiaaliset vikamuodot, ja arvioida mitä jokaisesta yksittäisestä viasta mahdollisesti seuraa. Voimme liittää tarkasteluun kvantitatiivista tietoa komponenttien vikataajuuksista ja vian seurauksien vakavuudesta sekä laskea vikaantumisen todennäköisyyksiä ja niihin liittyviä riskejä. Tästä voimme luontevasti edetä IEC 61508 normin mukaiseen automaation turvallisuuden eheystasojen (SIL) määrittelyyn.

Hankkiessamme uuden laitteiston, joudumme suunnittelemaan sen elinkaarta käyttöönotosta aina romutukseen asti. Elinkaariajatteluun sisältyy käyttövarmuus, jonka suunnittelu voidaan jakaa kahteen osaan: käyttövarmuusvaatimusten asettaminen laitteistolle ja laitteiston käyttövarmuuden suunnittelu vastaamaan asetettuja vaatimuksia. Laitteisto voidaan jakaa pääjärjestelmiin esim. prosessilaitteet, automaatio, sähköistys jne., jotka voidaan edelleen jakaa osajärjestelmiin. Koko laitteistolle asettamamme käyttövarmuusvaatimukset meidän on allokoitava näille osajärjestelmille siten, ettei jollekin tule kohtuuttomia vaatimuksia. Allokoiduilla vaatimuksilla tasapuolisesti, pyrimme sekä investointi- että käyttökustannusten kannalta optimaaliseen kokonaisratkaisuun. Ne vikaantumiset, joille olemme edellä kuvatulla periaatteella allokoineet käyttövarmuusvaatimuksia, toimivat yksityiskohtaisen suunnittelun kohteina. Perusosien vika- ja korjausajakaumista käsin simuloimme vikalogiikan avulla em. suunnittelun kohteille jakaumat. Näitä jakaumia vertaamme niihin jakaumiin, jotka on käyttövarmuusvaatimuksista käsin allokoitu ko. kohteille. Vertailu antaa meille tietoa suunnittelumme onnistumisesta. Laitteiston kunnossapidon vaikutusta käyttövarmuuteen arvioimme mallintamalla jokaisen perusosan huollon erikseen. Satunnaisvikojen korjauksien ja huoltojen vaatimat kustannukset ja henkilöresurssit laskemme samassa yhteydessä. Varaosavaraston suunnittelu on osa kunnossapidon suunnittelua. Varaosatarve on seuraus sekä satunnaisista vioista että valitsemastamme kunnossapitostrategiasta. Varaosavarasto tulee suunnitella sijaintinsa ja kokonsa puolesta siten, että osan puutteesta aiheutuvat kustannukset ja varaston kustannukset ovat minimissään, samalla kun laitteiden haluttu käyttövarmuus saavutetaan.

1. JOHDANTO

Jo vuodesta 1996 lukuisat suomalaiset metalli-, energia-, prosessi- ja elektroniikkateollisuutta edustavat yritykset ovat osallistuneet tutkimustoimintaan, jonka tavoitteena on kehittää todennäköisyyspohjaisia simulointiin perustuvia suunnittelumenetelmiä ja -ohjelmistoja [1]. Tutkimusprojektien keskeisenä tutkimus- ja kehitysorganisaationa toimii Tampereen teknillinen yliopisto. Menetelmät ja kehitetyt ohjelmistot palvelevat käyttövarmuuden ja kunnossapidon suunnittelua tuotteen elinkaaren eri vaiheissa. Menetelmät voidaan jakaa neljään osaan:

1. Vika- ja seurauspuun rakentaminen. Syntyneen tapahtumaverkon analysointi ja käyttö suunnittelukohteen riskianalyysissä ja luotettavuustarkasteluissa.
2. Tuotteen käyttövarmuusvaatimusten allokointi tuotteen osille.
3. Tapahtumaverkon avulla kuvatun tuotteen luotettavuuden, käytettävyyden ja kustannusten simulointi ja laskenta sekä tulosten vertailu koko tuotteelle tai allokoiduilla sen osille asetettuihin vaatimuksiin.
4. Varaosavaraston simulointi ja mitoitus lähtien osan vikaantumisen todennäköisyydestä eri käyttöpaikoilla ja päätyen osan puuteriskin ja varastointikustannusten vertailuun.

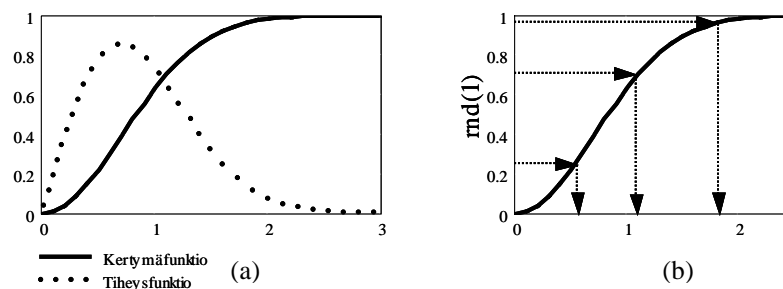
2. VIKA

Käyttövarmuuden ja kunnossapidon suunnittelutarpeen perimmäinen syy löytyy erilaisten rasitusten alaisten laitteiden äärellisestä kestoikästä, joka on luonteeltaan satunnainen. Mitoitimmepa laitteen kuinka pitkää kestoikää silmälläpitäen hyvänsä, on aina mahdollista, että ensimmäinen vika syntyy hyvin pian käyttöönoton jälkeen. Käytännössä voimme toki olettaa, että oikein mitoitettu, asennettu ja käytetty laite toimii hyvin todennäköisesti tavoittelemamme kestoikään asti ja jopa paljon sitä kauemminkin.

Vioittuneen laitteen korjaamiseksi voimme purkaa sen osiinsa. Varsinaisen laitevian löydämme yleensä jostakin näistä osista (vian todellinen alkusyy, juurisyy, ei meitä välttämättä kiinnosta). Korjaamme laitteen joko korjaamalla vioittuneen osan tai vaihtamalla sen uuteen. Jatkossa tällaista pienintä korjattavaa tai vaihdettavaa osaa kutsumme *perusosaksi*.

2.1. Vioittumisen malli

Tutkiaksemme vioittumista ja vioittumisen seurauksia matemaattisin menetelmin saatamme tarkasteltavan osan vikaantumisen matemaattisen mallin muotoon. Matemaattinen malli voi perustua vioittumisilmiön fysikaaliseen luonteeseen, kuten laakereille laajasti käytetty Weibull-malli (Weibull-jakaumaan perustuu mm. standardin mukainen laakerien kestoikälaskenta). Malli voi perustua myös kokemusperäiseen tietoon: voimme seurata osan toimintaa pitempiä aikoja tietyssä käyttöpaikassa tai useissa rasituksen kannalta samankaltaisissa käyttöpaikoissa. Syntyvästä vikaantumistilastosta laadimme vioittumiselle mallin, joko sovittamalla kerättyyn tietoon jokin ns. standardijakauma (parametrinen malli) tai konstruoimalla jakauma suoraan datasta (ei-parametrinen malli).



Kuva 1. (a) Weibull-jakauman tiheysfunktio $f(t)$ ja vastaava kertymäfunktio $F(t)$. (b) Stokastisen simuloinnin periaate.

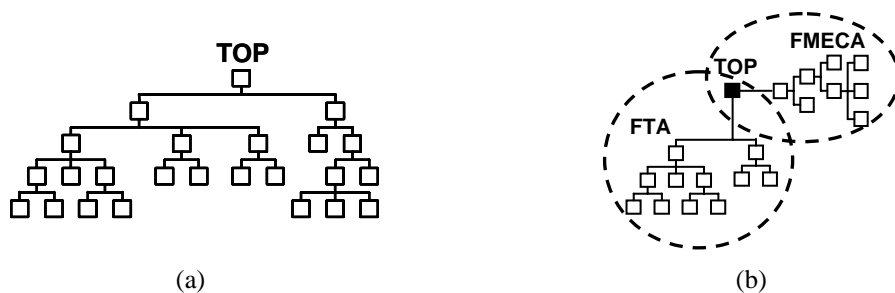
Kun olemme näin rakentaneet mallin, niin voimme simuloida osan vioittumista tietokoneella. Tässä kirjoituksessa kuvattavat menetelmät perustuvat stokastiseen eli Monte Carlo simulointiin /5/, jossa matkimme ”reaalijassa” satunnaisotoksilla osien vikaantumista ja korjaamista sekä muita tutkittavia tapahtumia. Kuvassa 1 käytämme esimerkkinä Weibull-mallia. Kuva 1a esittää Weibull-jakauman tiheysfunktioita ja vastaavaa kertymäfunktioita (kts. Kuva 4b). Kuvassa 1b esitämme stokastisen simuloinnin periaatteen. Pystyakselilla ovat todennäköisyyden arvot välillä 0...1 ja vaaka-akselilla on aika. Satunnaisesti valitsemamme todennäköisyydet kuvautuvat vaaka-akselille simuloituiksi vika-ajankohdiksi tarkasteltavalle osalle luonteenomaisen kertymäfunktion kautta.

2.2. Vikapuu

Kuten edellä totesimme, perimmäisen laitteen vian voimme löytää jostain sen perusosasta (tai useista osista samanaikaisesti). Usein meitä kuitenkin kiinnostaa perusosista kootun laitteen tai useista laitteista kootun suuremman järjestelmän tai prosessin vikaantuminen. Prosessin sanomme olevan vialla, kun tuotanto on pysähtynyt vian johdosta. Yksittäinen laite saattaa olla vialla, mutta tuotanto saattaa silti jatkua. Meillä on käytettävissämme lukuisia menetelmiä tutkiaksemme milloin ja millä ehdoilla prosessi voi olla em. mielessä vialla. Eräs näistä menetelmistä on vikapuuanalyysi /2/ (FTA), jota käyttämällä voimme laskea TOP- eli huipputapahtuman (esim. laite ei käy tai prosessi on pysähtynyt laitevian johdosta) todennäköisyyden sen aiheuttavien nk. perustapahtumien (perusosien vikojen) todennäköisyyksien avulla. Vikapuussa (Kuva 2a) liitämme perustapahtumat, jotka

ovat kausaalisesti ja ajallisesti muusta kokonaisuudesta riippumattomia, toisiinsa loogisten porttien avulla. Vikapuulogiikan laatimiseksi käytettävissämme olevat porttityypit ovat AND, OR, k/n, XOR, Priority AND ja NOT. Käyttämällä todennäköisyyksien laskentaan simulointia, meille avautuu mahdollisuus laskea minkä tahansa vikapuun tapahtuman (TOP tai portti) todennäköisyys ja lisäksi tarkastella tapahtumien välisiä riippuvuuksia ns. tärkeysmittojen avulla /4/. Tärkeysmittoja ovat:

- Birnbaumin tärkeysmittoja: kuinka paljon tapahtuman A todennäköisyyden muutos vaikuttaa tapahtumaan B.
- Riskin vähennys: kuinka paljon tapahtuman A todennäköisyyden pienentämisellä on vaikutusta tapahtumaan B.
- Riskin nousu: kuinka paljon tapahtuman A todennäköisyyden kasvattamisella on vaikutusta tapahtumaan B.
- Kriittisyystärkeys: millä todennäköisyydellä tapahtuman A toteutuminen on syynä tapahtuman B toteutumiseen.



Kuva 2. (a) Tyypillinen vikapuun, jossa perustapahtumat (puun lehdet) kytkeytyvät TOP- eli hupputapahtumaan loogisten porttien avulla. **(b)** Tapahtumaverkon periaatteellinen muodostuminen FTA:sta ja FMECA:sta.

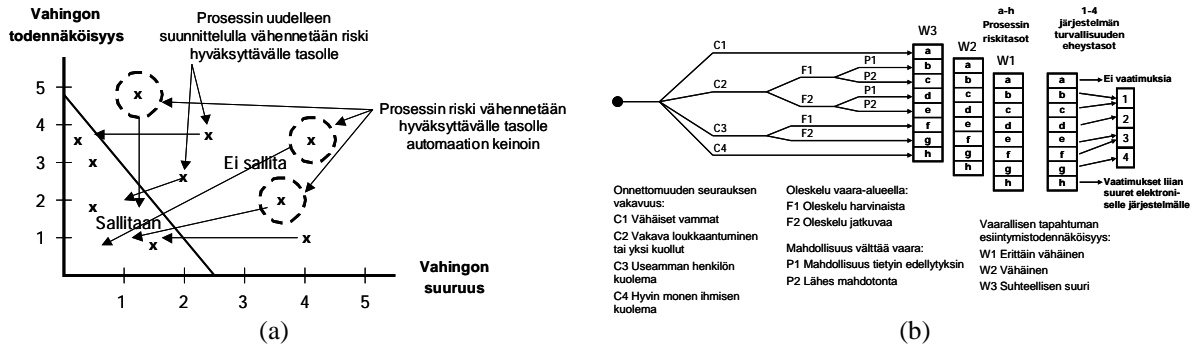
Vikapuuanalyysistä voimme luontevasti jatkaa samoilla menetelmillä ja samanlaista puurakennetta käyttäen vikavaikutusanalyysiin (FMEA) /6/. Vikavaikutusanalyysillä tunnistamme potentiaaliset vikamuodot, joilla tarkasteltava kohde voi vikaantua ja arvioimme mitä jokaisesta yksittäisestä viasta mahdollisesti seuraa. Liittämällä siihen kvantitatiivista tietoa osien vikataajuuksista ja vian seurauksien vakavuudesta päädyimme vikavaikutus- ja kriittisyysanalyysiin (FMECA) /6/. Lähtemällä liikkeelle TOP:sta (Kuva 2b), voimme rakentaa edelleen monihaaraisen puun, jonka eri oksilla on eri toteutumisen todennäköisyydet ts. kullakin seurauksella on sille luontainen toteutumisen todennäköisyys. Liittämällä näin määritettyihin seurauksiin niiden vakavuutta kuvaava suure, päädyimme mahdollisten seurausten riskiarvioihin. FTA:sta ja FMECA:sta näin rakentamaamme kokonaisuutta kutsumme jatkossa *tapahtumaverkoksi* /4/ /7/. Tapahtumaverkolla pystymme esittämään vikaantumista kuvaavan rakenteen lisäksi vikaantumisen aiheuttamia seurauksia kuvaavan rakenteen. Koska kyseessä on yksi verkko, voimme myös luoda yhteyksiä mainittujen eri rakenteiden välille.

2.3. Tapahtumaverkon ja turvallisuuden eheystasojen välinen yhteys

Prosessiteollisuudessa käytetään automaatiota laajasti pitämään prosessi turvallisena sekä normaaleissa ajotilanteissa että häiriötilanteissa. Turvallisuuteen liittyvää automaatiota (TLJ) käytetään vähentämään prosessin aiheuttamat riskit hyväksyttävälle tasolle. Prosessin aiheuttamia riskejä ovat mm. henkilövahingot, materiaalivahingot, keskeytysvahingot ja ympäristövahingot.

Sopivaa kvalitatiivista analyysia /9/ käyttäen voimme tunnistaa merkittävimmät riskit. Riskin suuruuden voimme kvantifioida soveltamalla tapahtumaverkkoa ja siihen kytkettyä simulointiin perustuvaa laskentaa. Analyysien tuloksena löytämilleme vahinkomahdollisuuksille voimme määrittää vahinkotyyppin, sen esiintymisen todennäköisyyden ja seurausten vakavuuden.

Tunnistetut vahinkomahdollisuudet esitämme riskitasossa (Kuva 3a), jonka avulla määritämme, mitkä vahinkomahdollisuudet eli riskit hyväksymme ja mitä on suunniteltava uudelleen. Analyysin avulla yksilöimme ne riskit, joiden riskin vähennyksen toteutamme automaation keinoin. Turvallisuuteen liittyvän automaation yhteydessä meille on keskeistä IEC 61508 normin mukainen turvallisuuden eheystasojen määrittäminen. Em. standardi antaa käyttöömmme eheystasojen määrittämistä varten riskigraafin (Kuva 3b), jonka avulla voimme määrittää *kunkin yksittäisen riskin* edellyttämän automaation eheystason. Edellä kuvaamaamme tapahtumaverkkoa voimme soveltaa riskien kvantifiointiin ja siten määrittää riskigraafin tietyjen parametrien arvot (onnettomuuden seurausten vakavuus, vaarallisen tapahtuman esiintymistodennäköisyys).



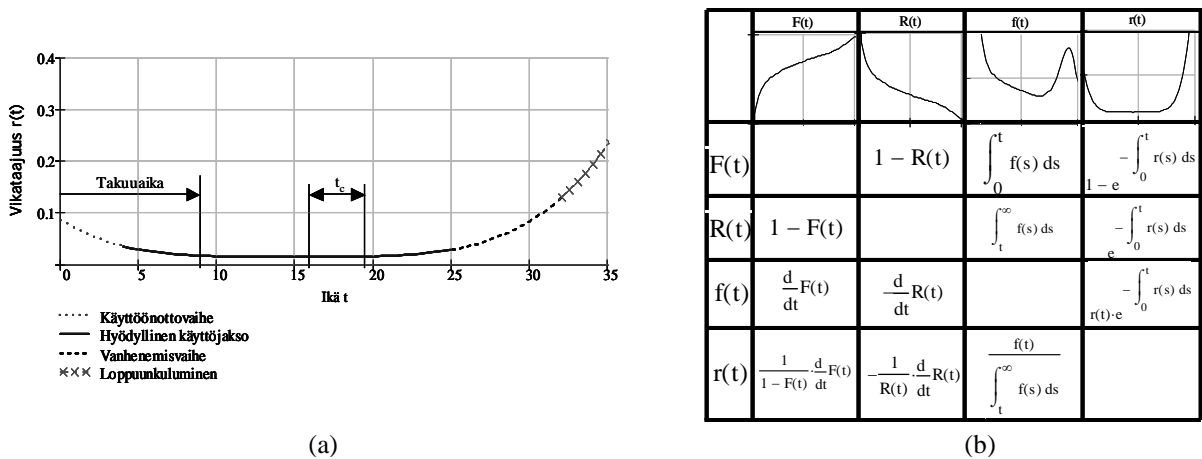
Kuva 3. (a) Riskitaso, johon on merkitty tunnistetut riskit. **(b)** Riskigraafi, jonka avulla turvallisuuden eheystaso voidaan määrätä.

3. KÄYTTÖVARMUUDEN SUUNNITTELU

Ryhtyessämme suunnittelemaan laitteiston tai kokonaisen prosessin hankintaa, joudumme ottamaan kantaa hankittavan laitteiston elinkaaren ja siten sen osien luotettavuuteen ja käytettävyyteen koko elinkaaren aikana. Elinkaariajattelu kytkee yhteen laitteiston osien suunnitellun kestoian ja niiden kunnossapidon sekä kunnossapitostrategiat. Käytettävyyshaatimukset seuraavat laitteistolle asettamistamme pitemmän aikavälin tuotantotavoitteista ja luotettavuushaatimukset lyhyemmän aikavälin toimintavarmuushaatimuksista. Käyttövarmuuden suunnittelu voidaan jakaa kahteen osaan: käyttövarmuushaatimusten asettaminen laitteistolle /3/ /8/ ja laitteiston suunnittelu vastaamaan asetettuja vaatimuksia /7/.

3.1. Käyttövarmuushaatimusten asettaminen

Laitteiston käyttövarmuushaatimuksia määrittäessämme perimmäisenä tavoitteenamme on konstruoida Kuvan 4a esittämä laitteiston viottuvuuden malli. Viottuvuus $r(t)$ on Kuvan 4b kaavoilla muunnettavissa kertymä-, luotettavuus- ja tiheysfunktioiksi tarpeen mukaan. Viottuvuutta voimme lähestyä kahta kautta: annamme haatimukset laitteiston luotettavuudelle jollain meille tärkeällä aikavälillä t_c (Kuva 4a) tai annamme haatimukset laitteiston korjausajalle ja käytettävyydelle. Laitteiston korjausaika muodostuu vian paikallistamisesta, korjaustoimenpiteistä päättämisestä, korjaustyökalujen ja varaosien hankinnasta ja varsinaisen korjaustyön suorituksesta tarkastuksineen ja mahdollisine virityksineen.



Kuva 4. (a) Laitteiston viottuvuus eri elinkaaren vaiheissa. **(b)** Kertymäfunktio $F(t)$, luotettavuusfunktio $R(t)$, tiheysfunktio $f(t)$ ja viottuvuus (vikataajuus) $r(t)$ toistensa avulla lausuttuna.

Luotettavuushaatimuksesta pääsemme viottuvuuteen suoraan Kuvan 4b kaavoja soveltamalla. Käytettävyyshaatimuksesta ja korjausaikavaatimuksesta pääsemme viottuvuuteen r kaavan (1) avulla. Kaavassa (1) μ on keskimääräinen korjausaika (vaatimus) ja A käytettävyyshaatimus. Viottumisfunktion lopullista määrittäystä varten tarvitsemme joitakin lisäparametreja, jotka huomioivat sisäanjavaiheeseen ja takuuajkaan liittyviä vaatimuksia.

$$r = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{1}{A} - 1 \right) \quad (1)$$

3.2. Käyttövarmuusvaatimusten allokointi

Laitteiston voimme jakaa pääjärjestelmiin esim. prosessilaitteet, automaatio, sähköistys jne., jotka voimme edelleen jakaa osajärjestelmiin. Koko laitteistolle asettamamme käyttövarmuusvaatimukset meidän on allokoitava tasapuolisesti näille osajärjestelmille siten, ettei jollekin tule kohtuuttomia vaatimuksia. Allokoiduilla vaatimuksilla tasapuolisesti pyrimme sekä investointi- että käyttökustannusten kannalta optimaaliseen kokonaisratkaisuun. Vaatimusten allokointi tarkoittaa järjestelmälle asetettujen käyttövarmuusvaatimusten ”jyvittämistä” vikapuun avulla (Kuva 2a) sille portille (oksalle), joka on suunnittelun kohteena. Järjestelmän TOP:lle asettamamme vaatimukset muunnamme ensin todennäköisyysjakaumiksi (violettuus ja korjausaika). Nämä TOP:lle tehdyt jakaumat jaamme simuloimalla portti kerrallaan ja vikalogiikka huomioon ottaen, vastaaviksi jakaumiksi alemmille osille. Allokointia ohjaavat joka vaiheessa allokoidavaan osaan ja sen alla oleviin osiin liittyvät kriteerit: kompleksisuus ja tärkeys. Allokointiin voimme vaikuttaa kiinnittämällä haluttujen osien vaatimukset ennen allokointia. Tämä tulee kyseeseen jos meillä on tiedossamme jonkin käytettävän osan käyttövarmuustiedot tai haluamme jostain muusta syystä ennakoita vaatimukset. Muille osille allokoidaan vaatimukset huomioiden kyseiset kiinnitykset /8/ /3/.

3.3. Käyttövarmuuden vaatimusten mukainen suunnittelu

Vikapuun osa, joille olemme edellä kuvatulla tavalla allokoinneet käyttövarmuusvaatimuksia, toimii sitten yksityiskohtaisen suunnittelun kohteena (suunnitteluksan TOP). Suunnittelun kohteena olevan vikapuun osan perusosien vikaantumista ja korjaamista meidän on pystyttävä arvioimaan tilastollisesti niin tarkasti, että niiden violettuus ja korjausaika voidaan mallintaa todennäköisyysjakaumilla. Emme tässä yhteydessä tietenkään puutu perusosien varsinaiseen suunnitteluun ja valmistukseen, vaan tarkastelemme perusosia niiden arvioidun tai tiedetyn violetumisen ja korjauksen perusteella. Voimme antaa niiden suunnittelua ja valmistusta varten vaatimuksia mikäli kyseessä on oma valmistus. Toisaalta jos perusosa on alihankittava osa, niin voimme valintoja tehdessämme huomioida em. käyttövarmuusvaatimukset siten, että lopputulos vastaa kokonaistavoitettamme. Perusosien lähtöjakaumista käsin simuloimme nyt vikalogiikan avulla suunnitteluksan TOP-osalle jakaumat. Näitä jakaumia vertaamme niihin jakaumiin, jotka on käyttövarmuusvaatimuksista käsin allokoitu ko. TOP-osalle. Vertailu antaa meille tietoa suunnittelumme onnistumisesta. Jos vaatimukset ja suunnitelman tulokset poikkeavat liiaksi toisistaan, niin meidän on palattava asetettuihin vaatimuksiin ja niiden allokointiin samoin kuin osan (suunnitteluksan TOP) suunnitteluun. Työ jatkuu iteratiivisesti, kunnes lopputulos on tyydyttävä /7/.

Laitteiston käytettävyyteen vaikuttaa oleellisesti kunnossapito. Eri kunnossapitostrategioiden vaikutusta käyttövarmuuteen pyrimme arvioimaan mallintamalla jokaisen perusosan huollon erikseen. Vertailukohtana toimii ”standardihuolto”. Satunnaisvikojen korjauksien ja huoltojen vaatimat kustannukset ja henkilöresurssit saamme lasketuiksi samassa yhteydessä.

4. VARAOSAVARASTON SUUNNITTELU

Varaosavaraston suunnittelu on osa käyttövarmuuden ja kunnossapidon suunnittelua ja sen taustalla on myös osien vikaantuminen. Varaosatarve on seurausta laitteiden satunnaisesta vikaantumisesta ja valitsemastamme kunnossapitostrategiasta. Varaosatoimittajan ja kunnossapito-organisaation tulee pystyä vastaamaan syntyneeseen tarpeeseen sovitussa ajassa. Varaosatoimittaja voi olla oma varaosavarasto, valmistajan / maahantuojan varasto tai jokin muu yhteisvarasto, jossa tarvittavan osan odotetaan olevan saatavilla. Varaston omistajan, asiakkaan (varaosan tarvitsijan) ja kunnossapitäjän näkökulmasta meidän on suunniteltava varaosavaraston sijainti ja koko siten, että osan puutteesta aiheutuvat kustannukset ja varaston kustannukset ovat minimissä, samalla kun laitteiden haluttu käyttövarmuus saavutetaan. Suunnittelumme kohdistuu aina yhteen varaosanimikkeeseen kerrallaan. Suunnittelukohteena on kokonaisuus, joka koostuu yhdestä varastosta sekä kulutusta aiheuttavista, varastoa käyttävistä kulutuskohteista. Kulutuskohteet ovat varaston asiakkaita. Varaosanimikkeen varastoinnin suunnittelun taustalla on samantyyppisten tai vastaavien osien dokumentoitu kulutus- ja käyttöhistoria sekä ihmisille kerätty kokemustieto. Varaosien kulutus on varaston kannalta yllättävää ja ei-yllättävää. Jos asiakkaan tarvitsemää osaa ei ole, niin kyseessä on puutetila. Tavoitteenamme on suunnitella varasto siten, että puutetila syntyy riittävän harvoin ja syntyessään ei kestä liian kauan. Puutetilän tutkimiseksi laskemme varastosaldon suunnittelujak-

son aikana. Laskentaa varten tarvitsemme tietoja mm. kyseisen varaosan kulutuksesta, varaosan toimittaja- ja toimitusaikavaihtoehdoista, ennakkotilauksajasta sekä suunnitelman mukaisesta varaosan tilauspisteestä ja tilausmäärästä. Näitä varioimalla voimme laskea erilaisia skenaarioita päätöksentekoa varten. Laskennan tuloksena saamme arvioita varaston ja varaosatarpeen käyttäytymisestä tunnuslukujen avulla, joita ovat mm. eri ottomäärien todennäköisyydet, varaston maksimi ja minimi, varaosien menekki, kiertonopeus, tavarantoimituksien määrä, osan varastossa viettämä aika. Puuteriskistä kertovia tunnuslukuja ovat puutejaksojen lukumäärä, puuteosien lukumäärä, yllättävästä hausta seuraava puuteaika, ei-yllättävästä hausta seuraava puuteaika, todennäköisyys että yllättävä haku johtaa puutteeseen, todennäköisyys että ei-yllättävä haku johtaa puutteeseen ja puutejakson pituus. Varaston kustannuslaskenta jakautuu varaosien puutteen aiheuttamien puutekustannusten sekä varaosan hankintaan ja varastointiin liittyvien kustannusten laskentaan.

5. YHTEENVETO

Tässä kirjoituksessa on kuvattu tuotteen elinkaaren eri vaiheisiin liittyvään käyttövarmuuden ja kunnossapidon suunnitteluun Tampereen teknillisellä yliopistolla kehitettyjä menetelmiä. Kehitetyt menetelmät ja ohjelmistot on testattu lukuisissa case -projekteissa. Viimeksi kuluneiden kahden vuoden aikana on erityisesti tutkittu menetelmiä, joiden avulla voidaan arvioida ennakkohuollon vaikutusta vikaantumisen todennäköisyyteen ja määrittää tarvittavien kunnossapitoresurssien ja varaosien määrä. Menetelmät ovat realisoituneet integroituna ohjelmistoperheeseen, jonka avulla kuvattuja toimenpiteitä voidaan käytännössä tehdä. Vaikkakin menetelmät liittyvät läheisesti toisiinsa, niin ne ovat myös käytettävissä itsenäisinä ohjelmina. Menetelmien kehitystyössä on käytetty tehokkaasti Mathcad-ohjelmistoa, mutta varsinaiset loppukäyttäjän ohjelmistot on toteutettu Java-kielellä.

KIRJALLISUUSLUETTELO

- /1 / Competitive Reliability 1996 – 200, Final Report. Edited by Kenneth Holmberg. Tekes, National Technology Agency. Technology Programme Report 5/2001 Helsinki 2001. Saatavissa: http://www.tekes.fi/Julkaisut/Competitive_Final.pdf.
- /2/ IEC 61025, Fault tree analysis (FTA). International Electrotechnical Commission, 1990, s. 35.
- /3/ Konttila, S.: Käyttövarmuusvaatimusten allokointiohjelmisto (Diplomityö), Tampereen teknillinen yliopisto, 2004, s. 74.
- /4/ Penttinen, J-P.: Vikalogiikan analysointi simuloimalla (Diplomityö), Tampereen teknillinen yliopisto, 2005, s. 94.
- /5/ Rubinstein, R. Y.: Simulation and the Monte Carlo Method, John Wiley & Sons, New York, 1981, p. 278.
/ / Meeker, W. Q., Escobar, L. A.: Statistical Methods for Reliability Data, John Wiley & Sons, New York, 1998, s. 278 .
- /6/ SFS 5438, Järjestelmän luotettavuuden analysointimenetelmät. Vika- ja vaikutusanalyysi (VVA). Suomen standardisoimisliitto SFS ry, 1988, s. 12.
- /7/ Virtanen, S.: Probability approach in Reliability and Maintenance development, Proceedings of Euromaintenance 2004, 17th European Maintenance Congress, May 11-13, 2004, Barcelona, Spain. s. 345-353.
- /8/ Virtanen, S., Hagmark P-E.: Allocation of Dependability Requirements in Power Plant Design. Case Studies in Reliability and Maintenance. Edited by Wallace R. Blichke and D.N. Prabhakar Murthy. John Wiley & Sons, New York, 2003, s. 85-107.
- /9/ VTT Tuotteet ja tuotanto: Riskianalyysin menetelmät (verkkosivusto). Julkaistu 1.3.2003, päivitetty 19.5.2005. Saatavissa: <http://riskianalyysit.vtt.fi/>.