

Janne Leinonen

LUOTETTAVUUS TEOLLISUUSROBOTTIJÄRJESTELMISSÄ

LUOTETTAVUUS TEOLLISUUSROBOTTIJÄRJESTELMISSÄ

Janne Leinonen
YAMK-opinnäytetyö
Kevät 2025
Robotiikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Tekniikan ylempi ammattikorkeakoulututkinto, robotiikan tutkinto-ohjelma

Tekijä: Janne Leinonen

Opinnäytetyön nimi: Luotettavuus teollisuusrobotijärjestelmissä

Työn ohjaaja: Jyrki Savela

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2025

Sivumäärä: 89 + 0 liitettä

Tuotantoprosessien kehittämisellä voidaan sanoa oleva suuntana tuottaa mahdollisimman suuri arvonlisä mahdollisimman pienellä alalla. Tämä suunta johtuu turhien välikvarastojen ja siirtomatkojen poistamisesta; tuotantokonsortiot tiivistyvät ja keskittyvät. Välikvarastojen poisto aiheuttaa viiveettömän riippuvuuden järjestelmien välille. Kun jokin prosessin osa lakkaa toimimasta, vaikuttaa se nopeasti prosessin muihin osiin. Prosessien luotettavuuden merkitys korostuu tuotantoprosessien tehokkuusvaatimusten kasvaessa.

Tavoitteena oli löytää keinot, joilla voidaan edesauttaa luotettavuuden tasoa robotijärjestelmissä erityisesti jo hankintavaiheessa. Alussa täytyi selvittää keskeisimmät käsitteet luotettavuuteen liittyen. Lähteinä oli kunnossapidon standardeja, tieteen sanakirjoja ja alan kirjallisuutta. Käsitteiden selvittämisen jälkeen aiheeseen perehdyttiin luotettavuustekniikan, turvallisuustekniikan ja laatu-tekniikan lähteistä.

Työn tulokseksi saatiin, että robotijärjestelmän luotettavuutta voidaan arvioida OEE:llä. Luotettavuuden suunnittelussa huomioidaan riskienhallinnan menetelmin tekijät, jotka vaikuttavat OEE:n tulontekijöihin eli käyttösuhteeseen, nopeuteen ja laaduntuottokykyyn. Luotettavuuden suunnittelussa on huomioitava, että robotijärjestelmä on aina vain osa tuotantoprosessia ja OEE:n mittaaminen on varsinaisesti tuotantoprosessin mittari. Yhtenä työn tuloksena saatiin menetelmä, jolla robotijärjestelmän OEE voidaan erottaa tuotantoprosessin OEE:stä. Tärkeintä korkean luotettavuuden saavuttamiseksi on suunnitella robotijärjestelmään vahva resilienssi, selviytymiskyky erilaisiin poikkeustilanteisiin. Tämä saavutetaan älykkäällä käyttäytymismallilla, rakenteellisilla ratkaisuilla ja järjestelmän kunnolla.

Asiasanat: luotettavuus, resilienssi, toimintavarmuus, OEE, robotti, teollisuusrobotti, saanto

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Master's degree programme, Robotics

Author: Janne Leinonen
Title of thesis: Reliability in industrial robot systems
Supervisor: Jyrki Savela
Term and year when the thesis was submitted: spring 2025
Number of pages: 89 + 0

The evolution of production processes can be said to be geared towards generating the highest possible added value in the smallest possible area. This trend is due to the elimination of unnecessary intermediate stocks and transfer distances; production consortia are becoming denser and more concentrated. The elimination of intermediate stocks leads to a delayless interdependence between systems. When one part of the process stops working, other parts of the process are quickly affected. Thus, the importance of process reliability becomes more important as the efficiency requirements of production processes increase.

The aim was to find ways to contribute to a higher level of reliability in robotic systems, especially at the procurement stage.

After clarifying the concepts, the subject was explored from the sources of reliability engineering, safety engineering and quality engineering.

The result of the work was that the reliability of the robotic system can be assessed by OEE. Reliability planning takes into account, through a risk management approach, the factors that affect the OEE revenue drivers of availability, speed and quality performance. Reliability planning must take into account that the robotic system is always only part of the production process and the measurement of the OEE is actually a measure of the production process. One result of the work was a method to separate the OEE of the robot system from the OEE of the production process. The key to achieving high reliability is to design a robot system with strong resilience, the ability to cope with various abnormal situations. This is achieved through smart behaviour, structural solutions and good system design.

Keywords: dependability, industrial robot, reliability, resilience, OEE, robotics, yield

SISÄLLYS

TERMIT	8
LYHENTEET.....	10
1 JOHDANTO	11
1.1 Työn tausta.....	11
1.2 Tavoite ja tutkimuskysymys.....	12
2 KÄSITTEET	14
2.1 Luotettavuus.....	14
2.2 Varmuus ja todennäköisyys.....	16
2.3 Kyky ja ominaisuus.....	23
2.4 Resilienssi	24
2.5 Tuotantoprosessin tehokkuus ja saanto	25
2.6 Yhteenveto keskeisimmistä käsitteistä	26
3 LUOTETTAVUUDEN TEOREETTINEN LASKENTA.....	28
3.1 Sarjaankytkentä.....	28
3.2 Rinnankytkentä.....	30
3.3 Sarjaan- ja rinnankytkentä.....	31
3.4 Tuotantoprosessien kytkeytyminen toisiinsa	32
4 LUOTETTAVUUS TUOTANTOPROSESSISSA.....	33
4.1 Ammekäyrä	34
4.2 Korkean luotettavuuden merkitys	36
4.3 Luotettavuuden rakentamisen kustannukset eri elinkaaren vaiheissa	37
5 LUOTETTAVUUDEN MITTAAMINEN	40
5.1 OEE ja saanto	41
5.2 Tuotantoprosessin ja robottijärjestelmän OEE:t	42
5.3 Saannon vaihtelu.....	47
6 ROBOTISOIDUN TUOTANTOPROSESSIN LUOTETTAVUUDEN SUUNNITTELU	49
6.1 Suunnittelun lähtötilanne	49
6.2 Luotettavuuden rakenteet.....	51
6.3 Robottijärjestelmän resilienssin rakentaminen	52
6.4 Käyttäytyminen.....	53
6.4.1 Lähestyvän poikkeustilanteen tiedostaminen.....	54

6.4.2	Poikkeustilanteen välttäminen.....	55
6.4.3	Poikkeustilanteen läsnäolon tiedostaminen	56
6.4.4	Tuotantokyvyn säilyttäminen.....	56
6.4.5	Toimintavalmiuden säilyttäminen	57
6.4.6	Nopea toipuminen.....	57
6.5	Rakenteelliset ratkaisut	57
6.6	Kunto.....	58
7	VAATIMUSMÄÄRITTELY.....	60
8	RISKIENHALLINTA ROBOTTIJÄRJESTELMÄN HANKINNASSA	64
8.1	Luotettavuusvaatimuksien selvittäminen	66
8.2	Robottijärjestelmän prosessinkuvaus	66
8.3	Riskien tunnistaminen	66
8.3.1	Hankintaprojektin vaikutukset luotettavuuteen	67
8.3.2	Robottijärjestelmän prosessinkuvaus.....	68
8.3.3	Poikkeustilanteet.....	68
8.3.4	Robottijärjestelmän sisäiset riskitekijät.....	69
8.3.5	Robottijärjestelmän ulkoiset tekijät.....	72
8.3.6	Robottijärjestelmän riskit rajapinnoissa	73
8.3.7	Opitut opit, Lessons learned	74
8.3.8	Benchmarking	74
8.4	Riskien arviointi	74
8.5	Tunnistettujen riskien hallintatoimien suunnittelu	75
8.6	Hallintatoimien arviointi ja hallintatoimista päättäminen.....	77
8.7	Hallintakeinot vaatimusmäärittelyyn	78
8.8	Suunnittelukatselmus, Design Review.....	78
8.9	Toteutuksen todentaminen.....	79
9	KÄYTTÖÖN SAATTAMINEN.....	81
10	JOHTOPÄÄTÖKSET	82
10.1	Tutkimuskysymys, menetelmät ja tulokset	82
10.2	Tulosten luotettavuus ja oikeellisuus	82
10.3	Tulosten soveltamisalue ja hyödyllisyys	83
10.4	Tulosten rajoitteet.....	83
10.5	Jatkotutkimus	84
11	YHTEENVETO	86

LÄHTEET..... 87

TERMIT

Benchmarking	Vertailuanalyysi (1)
Integraattori	Robottijärjestelmän toimittaja (2)
Jigi	Työkappaleen paikoittava pidin
Kelpuuttaminen	Näyttöön perustuva kelvolliseksi toteaminen
Kyky	Toiminnon mahdollistavat ominaisuudet
Luotettavuus	Objektiivinen tai subjektiivinen <i>johtopäätös</i> entiteetin ominaisuudesta suoriutua tehtävästään suhteessa sen tavoitteeseen tai odotusarvoon. Tehtävä voi sisältää suoritusolosuhteet ja tavoiteajan, -hetken, -keston tai tavoitemäärän.
Nimellissaanto	Tuotantoerän saanto, kun prosessissa ei ole käyntiaika-, nopeus- tai laatumenetyksiä. Voidaan laskea hetkellisen tehokkuuden ja suunnitellun käyttöajan tulona.
Resilienssi	Toimintakelpoisuuden hallinta (3)
Riskienhallinta	”Koordinoitu toiminta, jolla organisaatiota johdetaan ja ohjataan riskien osalta (4.) ”
Robotti	Ohjelmoitu käyttömekanismi, jolla on tietty autonomia liikkumisen, manipuloinnin tai paikantamisen suorittamiseksi (5). Kts. myös teollisuusrobotti.
Robottijärjestelmä	”Robotisoitu tuotantoprosessin osa, johon kuuluvat teollisuusrobotti, robotin työkalut ja kaikki välineet, jotka tukevat tehtävää suorittavaa robottia” (6).
Saanto	Tuotantoerästä saatu laadullisesti kelvollisten tuotoksien määrä.

Saantosuhde	Toteutuneen saannon suhde nimellisaantoon. Voidaan ilmaista asteikoilla 0..1 tai 0..100 (%), on lukuarvoltaan sama kuin OEE.
Saantovarmuus	Tuotantoprosessin mahdollisuus tuottaa tuotoksen suunnitellulla jaksonajalla ilmaistuna todennäköisyydellä.
Teollisuusrobotti	”Teollisuuden automaatiosovelluksissa käytettäväksi tarkoitettu automaattisesti ohjattu, uudelleen ohjelmoitavissa oleva monikäyttöinen käsittelylaite, jonka akseleista vähintään kolme on ohjelmoitavissa ja joka voi olla kiinteästi asennettu tai liikkuva (6).”
Vaativuusmäärittely	Määrittelee hankittavan tai olemassa olevan järjestelmän.
Varmuus	Suure, joka kuvaa tapahtuman toteutumisen tai asian tilan olemassaolon mahdollisuuden suuruutta. Yksikkönä on todennäköisyys. Tapahtuma voi olla ajan hetkeen, keston tai määrään sidonnainen.

LYHENTEET

ERP	Enterprise Resource Planning, Toiminnanohjausjärjestelmä
FAT	Factory Acceptance Test, Tehdashyväksyntätesti toimittajan tiloissa
FMEA	Failure Mode and Effective Analysis, Vika- ja vaikutusanalyysi (7)
GUI	Graphical User Interface, Graafinen käyttöliittymä, HMI:n alakäsite
HAZOP	Poikkeamatarkastelu (8)
HMI	Human Machine Interface, Ihminen-kone rajapinta
K.N.L / KNL	OEE:n suomenkielinen vastine (9)
MES	Manufacturing execution system, Tuotannonohjausjärjestelmä
O.E.E / OEE	Overall Equipment Efficiency, Kokonaistehokkuustunnusluku (10) tai saantosuhde
RPN	Risk priority number, Riskin merkittävyysluku (8)
SAT	Site Acceptance Test, Toimitushyväksyntätesti

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Tämä opinnäytetyö on kirjoitettu tarpeesta selvittää niitä tekijöitä, jotka vaikuttavat teollisuusrobotiikkaratkaisuissa luotettavuuteen lähinnä sen suunnitteluvaiheessa. Vaikka opinnäytetyö sijoittuu ruiskuvalutuotannon robotisointiin, lähestytään tässä aihetta yleisemmältä tasolta.

Tuotannon kehittämisen vahvana suuntauksena nähdään nykyään Lean-ajattelu, jossa keskitytään hukkien poistoon. Kun välivarastointien, kuljettamisten ja siirtojen hukat pyritään poistamaan, päädytään tulokseen, jossa yhdessä pisteessä on kannattavinta tehdä mahdollisimman suuri jalostusarvon nosto. Mitä suurempi yhdessä pisteessä tehty jalostusarvon nosto tehdään, sen monimutkaisemmaksi systeemi muuttuu. Yhteen koottu pitkä jalostusarvon nosto antaa paljon mahdollisuuksia tehostaa tuotantoa erilaisilla automaatioilla kuten robotiikalla, toisin kuin jalostusvaiheiden ollessa hajautettuna. Hajautetussa mallissa yksittäisiin työvaiheisiin ei välttämättä voida niin helposti perustella robotisoitua investointia, koska järjestelmän käyttöaste voisi jäädä matalaksi eikä robottisolun välttämätöntä infrastruktuuria voida jakaa muiden robottien tai työvaiheiden kanssa. Yhdessä pisteessä infrastruktuurin kulut voidaan jakaa useamman robotin kanssa ja robottien tehtäviä voidaan järjestellä ja yhdistellä siten, että niiden käyttöaste saadaan korkeammaksi kuin niiden ollessa hajautettuna.

Yhden pisteen suuri jalostusarvon nosto antaa siis tuotantotehokkuuden parantamiselle ja siten kilpailukyvyille suuret mahdollisuudet juuri automatisoinnin kautta. Useiden robottien yhdessä toimiminen luo toisaalta myös haasteita: Kun yhteen liitettyjen jalostusvaiheiden määrä kasvaa, myös näiden riippuvuus toisistaan kasvaa. Yhden vikaantuessa se vaikuttaa sekä edeltäviin, että seuraaviin vaiheisiin. Haasteena on saada kaikki järjestelmän osatekijät niin luotettavaksi, että saanto tuotantoprosessista saadaan kuitenkin toistuvasti halutulle tasolle.

Robottijärjestelmässä robottien määrän kasvaessa yleensä myös tuotantotehokkuus kasvaa, samoin investoinnin suuruus. Lähtökohtaisesti sarjaan kytkettyjen robottien määrän kasvu kuitenkin heikentää toiminnallista luotettavuutta. (12.) Tällöin robottien määrän kasvaessa, luotettavuuteen täytyy erityisesti kiinnittää huomiota investointiprojektin onnistumisen vuoksi.

Suurin osa tuotantojärjestelmien luotettavuuden kehitystutkimuksista on retrospektiivistä, järjestelmä on olemassa, jonka luotettavuutta tulisi kehittää. Käyttöönoton jälkeen todetut kehitystarpeet ovat yleensä aina kalliimpia toteuttaa kuin kerralla oikein suunniteltu osa tai järjestelmä. Jos aiempi kehitystä kaipaava, jo kerran investointikustannuksina maksettu osakokonaisuus hylätään, tilalle toimitettava uusi osakokonaisuus joudutaan viemään uudestaan koko hankinta-, suunnittelu-, valmistus-, testaus- ja käyttöönottoprosessin läpi. (13 s.11.)

Edellä mainitut syyt, ruiskuvaluprosessin vakausvaatimus ja monirobottijärjestelmän haasteet ovat ohjanneet tähän aihepiiriin ja työn valintaan. Työn tarkastelutaso on robotisoinnin suunnittelu yleisesti, jossa pyritään löytämään ne tekniikat ja lähestymistavat, joita kulloinkin kyseessä olevaan robotisoinnin hankintaprojektiin voidaan soveltaa. Työssä huomioidaan koko tuotantoprosessi, kaikki ne tekijät, jotka vaikuttavat sen saantoon, mutta arvioidaan robotisoidun järjestelmän näkökulmasta. Työn tavoitteena on löytää ennemminkin keinoja luotettavuustekijöiden tunnistamiseen, kuin löytää valmiita ratkaisuja yksittäisiin kohteisiin.

Hankintaprojektit vaihtelevat, samoin ratkaisut, mutta keinot luotettavuustekijöiden tunnistamiseen pysyvät samoina. Näistä syistä työ on yleisellä tasolla. Työn yleinen taso antaa myös mahdollisuuden soveltaa tietoa muillekin aloille kuin ruiskuvalualoille, jossa robotiikkainvestointeja tehdään. Työ antaa näkökulmia sekä robottijärjestelmää tilaavalle, että robottijärjestelmiä rakentaville toimittajille.

Yleensä luotettavuusnäkökohdat on huomioitu isoimmissa teollisuusyrityksissä, joissa robottijärjestelmien hankinta on arkipäivää. Pienemmissä yrityksissä ei välttämättä ole kokemusta tämän tyyppisistä hankinnoista vielä kovinkaan paljoa. Hankintakokemuksen puuttuessa riskit epäonnistumiseen ovat suuremmat kuin kokeneemilla toimijoilla. Järjestelmän luotettavuus on aina yksi tärkeimmistä kriteereistä, jolla arvioidaan hankintaprojektin onnistumista.

1.2 Tavoite ja tutkimuskysymys

Opinnäytetyö tehdään käytännön tarpeeseen selvittää niitä keskeisiä tekijöitä, jotka vaikuttavat robottijärjestelmien toiminnalliseen luotettavuuteen esisuunnittelun ja hankinnan vaiheissa. Työn tehtävänä on vastata tähän kysymykseen. Vastauksien etsiminen on konstruktivistista tutkimusta ja

tutkimusotteena suunnittelutieteen soveltaminen. Tutkimuskysymykseen vastaamisen lisäksi tavoitteena on lisätä omaa ammattiosaamista ja luoda aihepiiristä kiinnostuneille aineistoa. Sektori on kapea, mutta nopeasti kasvava, ja täsmäaineistoa aihepiiristä ei tällä hetkellä ole kovin paljoa tarjolla.

2 KÄSITTEET

”Tieteellisesti pätevällä mittarilla on tietyt vaatimukset. Mittarin määrittäminen lähtee siitä, että ensin määritellään asia tai ilmiö, jota halutaan mitata. Tämä edellyttää ilmiön täsmällistä käsitteellistämistä (14).”

2.1 Luotettavuus

Luotettavuus on puhekielessä varsin yleisesti käytetty ilmaisu. Sitä voidaan käyttää puhuttaessa laitteista, tiedosta, tuotantoprosessista, henkilöstä tai melkein mistä tahansa. Sen merkitys ymmärretään aina asiayhteydestään. Vaikka ilmaisua voidaan käyttää useissa hyvinkin erilaisissa konteksteissa, on kaikista tilanteista löydettävissä luotettavuus käsitteelle yhteisiä piirteitä. Luotettavuutta arvioitaessa asiayhteyden merkitys on tärkeä. Lentokoneiden luotettavuutta arvioidaan toisin kuin puutarhakoneiden.

Luotettavuutta määritellään TEPA-termipankissa seuraavasti: ”kyky tuottaa vaadittu suorite silloin, kun sitä tarvitaan” ja lisättyä huomautuksella: ”Hyvä luotettavuus edellyttää, että suorite on saatavilla vaadittavalla hetkellä, niin kauan ja niissä oloissa, joissa sitä tarvitaan.” (15.)

Myös kunnossapitostandardit määrittelevät luotettavuutta. PSK6201_v4 käyttää ilmaisuja ”dependability”, joka kääntyy toimintavarmuudeksi ja ”reliability”, jonka vastine on käyttövarmuus. Finto Suomalainen asiasanasto- ja ontologiapalvelun (11) mukaan käänös kuitenkin on reliability:lle luotettavuus, ei varmuus.

Käyttövarmuus määritellään PSK6201_v4: ”Käyttövarmuus on kyky toimia vaadittaessa vaaditulla tavalla” ja toimintavarmuus: ”Toimintavarmuus on kohteen kyky suorittaa vaadittu toiminto määrättyissä olosuhteissa vaaditun ajanjakson”. (9.)

Näissä kaikissa edellä mainituissa määrittelyissä tarkastellaan luotettavuutta, tosin varmuuden synonyymina, tiettyyn ajanhetkeen sidottuna ominaisuutena, eikä huomioida luotettavuuden yleistettävyyttä; järjestelmä voi olla yleisesti ottaen luotettava, vaikka ei sitä olisi juuri kyseisellä

hetkellä. Kunnossapitostandardin luotettavuuden määrittely ei myöskään huomioi olevaisuuden luotettavuutta; onko tieto luotettava tai onko tutkimustulos luotettava. Kunnossapidon näkökulmasta tarkastellaan luonnollisesti vain laitetasoa, johon kyseisen standardin luotettavuus käsitettä pelkästään sovitetaan.

Luotettavuus -käsitteeseen liittyy kyky suoriutua asetetuista tai oletetuista tehtävistä. Luotettavuus viittaa olemiseen, tekemiseen tai kykyyn suoriutua kyseisestä tehtävästä. Luotettavuus määritelmää ei voida kytkeä objektiin, jolla ei ole tehtävää.

Luotettavuus -käsitteeseen liittyy myös odotusarvo, jonka suhteen tekemistä tai olemista arvioidaan. Odotusarvo voi olla joko verbaalinen tai numeerinen. Luotettavuudelle ei voida antaa absoluuttista skalaariarvoa ja yksikköä, mutta suhteellinen ja/tai abstraktiarvo voidaan antaa vertaamalla toteutumaa ja odotusarvoa. Luotettavuus on suhteellinen käsite toteutuman ja odotusarvon välille.

Kunnossapidon näkökulmasta luotettavuus käsitteessä täytyy huomioida ympäristötekijät sekä aika, joko tietty hetki tai tietty ajanjakso. Kun luotettavuutta ajatellaan tehtävästä suoriutumisen ja tavoitteen välisenä suhteenä, niin tehtävän määrittely määrittelee tarvittaessa ympäristötekijät tehtävän tarkenteena ja tavoite määrittelee ajan hetken tai keston: Junan kuljettaessa matkustajat jokaisessa säässä aikataulujen mukaisesti perille se on luotettava. Tehtävässä on ympäristötekijät ja tavoitteessa aikamääre.

Kun velallinen maksaa velkansa, tieto pitää paikkansa ja tuotantoprosessi saavuttaa tuotantotavoitteensa, näitä voidaan pitää luotettavina. Kuvauksista löytyy aina niin tekijä, tehtävä kuin tavoite. Passiivilauseella, josta tekijä puuttuu, ei voida kuvata luotettavuutta.

Luotettavuus voi olla subjektiivista ja objektiivista. Auton omistaja voi luoda subjektiivisen käsityksen, johtopäätöksen autonsa luotettavuudesta. Useiden auton omistajien subjektiivisista käsityksistä voidaan koostaa objektiivinen luotettavuuskäsitys. Subjektiivisena luotettavuus on emotionaalista, mutta objektiivisena se on matemaattista.

2.2 Varmuus ja todennäköisyys

Luotettavuus, varmuus ja todennäköisyys ovat sanoja, jotka esiintyvät samoissa asiayhteyksissä varsin yleisesti. Sanastokeskuksen TEPA -termipankki ei ilmaise sanalle varmuus suomenkielistä selitystä tai merkitystä. (15.) Kunnossapitostandardeista PSK6201_v4 ja SFS-EN 13306, joissa englanninkielinen reliability kääntyy suomen kielen käyttövarmuudeksi, voidaan ajatella, että luotettavuudella ja varmuudella on sama tai lähes sama merkitys. (9.)(16.)

Toteutumisen todennäköisyyttä voidaan ilmaista myös varmuus -käsitteellä. Todennäköisyys voi olla yleistä todennäköisyyttä esimerkiksi järjestelmän toimintaan tai juuri kyseisellä hetkellä olevaa todennäköisyyttä tietyn toiminnon toteutumista suhteessa tavoite- tai odotusarvoon. Useissa tilanteissa sanat todennäköisyys ja varmuus voidaan vaihtaa keskenään ilman lauseen tarkoituksen muuttumista. On tilanteita, joissa vaihtoa ei voida tehdä: - On todennäköistä, että rakenne kestää, se on siis varma. Sanojen vaihtoa ei voida edellisessä lauseessa tehdä, eikä myöskään seuraavassa: Ei voida olla täysin varmoja asiasta, koska on todennäköistä, että löytyy erilaista lisätietoa. Todennäköisyydestä seuraa varmuus niissä tapauksissa, joissa sanat eivät ole vaihtokelpoisia.

Varmuus ja luotettavuus sanoja voidaan useimmiten korvata toisillaan, kuten edellä mainitussa standardin käänöksessä. Korvausta tai vaihtoa ei kuitenkaan voida tehdä jokaisessa tilanteessa esimerkiksi seuraavassa lauseessa: Jos järjestelmän vaurioitumisen varmuus on suuri, se ei olisi luotettava. Lauseessa varmuuden kasvu heikentää luotettavuutta, eli sanat ovat jopa vastakohtia eivätkä synonyymeja. Sanoja vaihtamalla esimerkkilause ei olisi kuitenkaan oikein: Jos järjestelmän vaurioitumisen luotettavuus on suuri, ei se olisi varma. Voidaan sanoa, että sanoilla on merkitysero.

Vaikka sanat voidaan korvata keskenään useimmissa tilanteissa, voidaan niiden merkityseroa tarkastella lauseissa, jossa ne eivät ole korvattavissa toisella: Tutkimuksessa aineiston *epävarmuus* täytyy huomioida tilastollisessa päättelyssä, tämän epävarmuuden perusteella voidaan arvioida tutkimuksen *luotettavuutta*. Sanojen paikkaa vaihtamalla virke olisi: Tutkimuksen aineiston *epäluotettavuus* täytyy huomioida tilastollisessa päättelyssä, jolla arvioidaan tutkimuksen *varmuutta*. Näistä esimerkeistä voitaneen sanoa, että sanat ovat useimmiten vaihtokelpoiset, mutta missä ne eivät ole vaihtokelpoisia täytyy ensin määritellä varmuus, josta seuraa luotettavuus.

Toisaalta voidaan havaita, että varmuus määrittelee yleensä entiteetin yksittäistä ominaisuutta, josta voidaan tehdä koko entiteettiä koskeva luotettavuuden johtopäätös. Yllä olevassa tutkimus - lauseessa arvioidaan *aineiston* epävarmuutta, mutta siitä tehdään *koko tutkimusta* kuvaava luotettavuuden johtopäätös. Entiteetillä voi olla useita toiminnallisia ominaisuuksia, joista jokaista voidaan ilmaista erilaisilla varmuuskäsitteillä. Varmuuden käsitys liittyy entiteetin toiminnallisten ominaisuuksien arviointiin ja luotettavuus entiteettiin kokonaisuudessaan. Puutarhakoneen käynnistysvarmuus voi olla hyvä, mutta käyntivarmuuden ollessa huono, näistä varmuuksista heikompi aiheuttaisi puutarhakoneesta muodostuvan luotettavuuden johtopäätöksen.

Kolmen sanan ketju; luotettavuus, varmuus ja todennäköisyys ovat vaihtokelpoisia osittain. Luotettavuus ja varmuus ovat useimmiten vaihtokelpoisia, samoin varmuus ja todennäköisyys. Kolmen sanan ketjun reunimmaisat luotettavuus ja todennäköisyys taas eivät ole keskenään vaihtokelpoisia. Näin voidaan päätellä myös sanojen keskinäisen määrittelyketjun: Todennäköisyys määrittelee varmuutta ja varmuus luotettavuutta. Tämä voitaisiin ajatella myös siten, että todennäköisyys on yksikkö, varmuus on suure ja luotettavuus on käsite, vertaa: lämpöaste, lämpötila, pakkanen.

Varmuus ei useimmiten ilmaannu yksinään vaan etuliitteellisenä kuten kunnossapitostandardeissa olevat käyttövarmuus tai toimintavarmuus. (9.)(16.) Jos varmuus esiintyy itsenäisesti, niin asiayhteydestä voidaan päätellä mistä varmuudesta on kysymys. Etuliitteellä tarkennetaan järjestelmän yksittäistä ominaisuutta, jota varmuudella kuvataan.

Binääriset, Boolean tyypiset tapahtumat varmuuden määrittelyssä

Varmuuden käsitys voidaan muodostaa sellaisista tapahtumista tai asian tiloista, joita voidaan arvioida binäärisinä, boolean tyypisenä joko-tai -tapahtumana. Juna on aikataulussa tai se ei ole, kone on käyttökunnossa tai se ei ole, tuotannossa päästiin tuotantotavoitteeseen tai ei päästy. Jos kone käy häiriöttä keskimäärin 5 h, voidaan laskea häiriötodennäköisyys, vaikka yksittäiselle minuutille. Silloin tarkkailtavana boolean tyypisenä tapahtumajaksona on yksi minuutti.

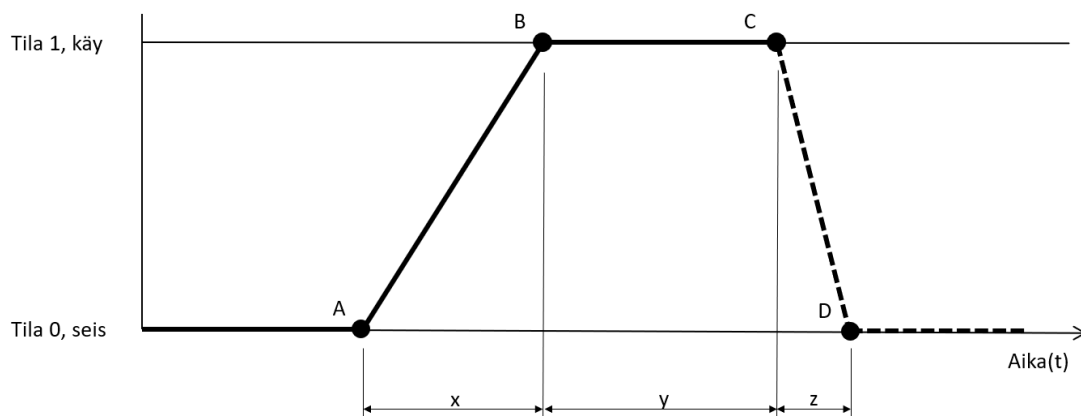
Todennäköisyyslaskennassa usein käytetty esimerkki arpakuution silmäluvusta voidaan muuttaa myös binääriseksi yksittäisen tapahtuman osalta, saatiinko silmäluvuksi yksi tai saatiinko silmäluvuksi parillinen. Tulevan tapahtuman estimaatti perustuu näin useisiin boolean tyypisiin

tapahtumiin, joiden perusteella voidaan antaa yksittäisen tulevan tapahtuman todennäköisyys skalaariarvona.

Varmuus kunnossapidon näkökulmasta

Kunnossapidon näkökulmasta järjestelmällä on pääsääntöisesti kaksi vaatimusta, joiden varmuuksien perusteella muodostetaan luotettavuuskäsitystä. ”Hyvä luotettavuus edellyttää, että suorite on saatavilla vaadittavalla hetkellä, niin kauan ja niissä oloissa, joissa sitä tarvitaan (15).” Kun järjestelmältä odotetaan vaadittua suoritetta silloin kun sitä tarvitaan (15), on se kuviossa 1 ajanhetki B. Järjestelmän käynnistystä ennakoidaan kuvion 1 kohdassa A, jotta suorite olisi ajanhetkellä B saatavilla. Niin kauan ja niissä oloissa kuvaa ajanjaksoa B – C. Ajanjaksoa A – B voidaan kuvailla käynnistysvarmuudeksi ja ajanjaksoa B – C käyntivarmuudeksi.

On olemassa järjestelmiä, joissa järjestelmän käyntitilan muuttuminen käyntitilasta seis -tilaan on varmuuden näkökulmasta merkitsevä. Tämä kuvion 1 C – D varmuus kuvaa juuri pysäytysvarmuutta. Yleensä prosessit saadaan pysäytettyä helposti ja niin varmasti, ettei asiaan juuri kiinnitetä huomiota. Tämä huomataan myös luotettavuuden määrittelyssä (15), jossa pysäytysvarmuuteen ei edes oteta kantaa. Kuitenkin ydinvoimaloiden fissiopro sessien pysäytysvarmuuden ollessa kyseessä, on tällä erittäin iso merkitys juuri luotettavuuden näkökulmasta.



KUVIO 1. Pelkistetty kuvaus tuotantojärjestelmien erilaisista varmuuksista

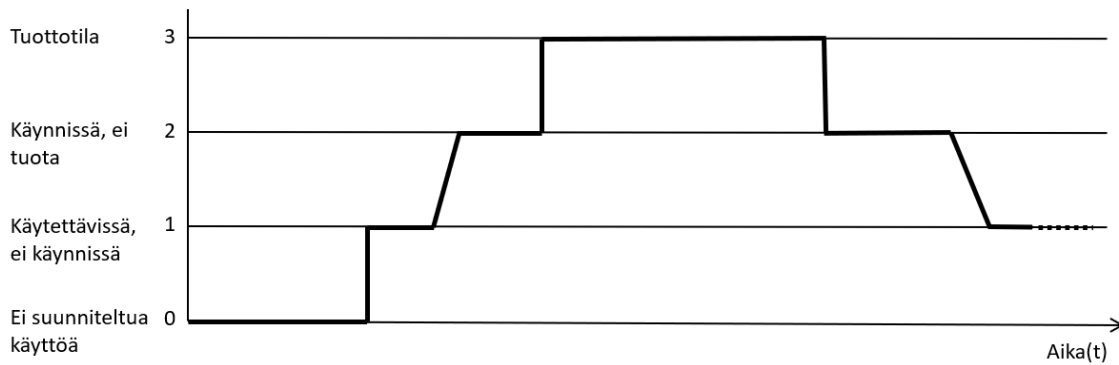
Varmuutta ei voida suoraan määrittellä skalaarisuureissa mitattaville tapahtumille kuten kestoajaksi, ajonopeus tai tuotantotehokkuus. Ainoastaan silloin, jos nämä muutetaan boolean tyypiksi tapahtumiksi arvioimalla saavutetaanko kestoajassa, ajonopeudessa tai tuotantotehokkuudessa

tietty vaadittu ajanjakso tai taso. Kuvion 1 käynnissäpysymisvarmuutta B – C välillä voidaan arvioida boolean tyyppisenä tapahtumana, kun ajanjaksoksi y valitaan jokin aika tai suorituskerrat. Jos vaadittu ajanjakso on lyhyt tai vaadittu taso on matala, saadaan helpommin hyvä varmuus.

Tuotantojärjestelmissä on kuitenkin tunnistettavissa useampia erilaisia varmuuksia, kuin edellä mainitut käynnistys- ja käynnissäpysymisvarmuudet, joiden perusteella voidaan muodostaa johtopäätös järjestelmän luotettavuudesta. Tarkastelemalla kuviota 2, huomataan, että tiloja tai tapahtumia on huomattavasti enemmän:

- Kuviossa 2 tila 0 kuvaa järjestelmää, jolloin sen käyttöä ei ole suunniteltu. Ajanjaksolle ei ole suunniteltua tuotantoa. Tässä yhteydessä ei vielä puhuta varmuuksista. Kunnossapidon standardissa SFS-EN 13306:2017 tilaa kutsutaan lähinnä joutotilana, toimintavalmiustilana tai valmiustilana.
- Tilan muuttumisesta tilasta 0 tilaan 1 tapahtuu tuotannosuunnittelun toimesta. Tämä voi toteutua päivävuorotuoannossa aina aamuisin työajan käynnistyessä.
- Tilassa 1 järjestelmä on käytettävissä, mutta ei käynnissä. Järjestelmä voi olla häiriössä. Tilanteessa vastuun ottaa yleensä kunnossapitoprosessi.
- Tilanmuutoksesta tilasta 1 tilaan 2 vastaa useimmiten tuotantotoiminnot, mutta joissain tapauksissa osittain tai jopa kokonaan kunnossapito. Voidaan puhua käynnistys- tai käynnistymisvarmuudesta.
- Tilassa 2 järjestelmä on käynnissä, mutta ei vielä tuota. Vrt. kaivinkone on käynnissä, mutta sillä ei kaiveta. Järjestelmä odottaa sisäistä tai ulkoista tekijää tuotoksen toteuttamiseksi. Voidaan puhua käynnissäpysymisvarmuudesta.
- Tilan muuttuminen tilasta 2 tilaan 3, eli tuottavaan tilaan, voitaisiin puhua tuottotilaan siirtymisen varmuudesta.
- Tilassa 3 pysymistä, jolloin tuotteita tuotetaan, voidaan puhua tuottovarmuudesta.
- Tilan 3 muuttuminen takaisin tilaan 2:een, voidaan puhua pysäytysvarmuudesta.
- Tilan 2 muuttuminen tilaan 1:een, voidaan puhua alasajovarmuudesta.
- Tilan 1 muuttumisesta tilaan 0, on pelkästään tuotantoaikamäärittelyä ja tapahtuma on virtuaalinen. Varmuus liittyy lähinnä ohjelmistoteknisiin suorituksiin.

Laaduntuottovarmuus tulee huomioiduksi kuviossa 2 siten, että vain vaatimustenmukaiset tuotteet lasketaan tuottotilan hyväksi. Ei-vaatimustenmukaisien tuotteiden suoritus aika pitää järjestelmän tilassa 2, vaikka se näennäisesti tuottaisi ja olisi tilassa 3.



KUVIO 2. Tuotantojärjestelmän erilaisia tiloja ja tapahtumia

Mittausepävarmuus

On tilanteita, missä on vaikea todentaa boolean tyyppisen tapahtuman toteutuminen ja sen suhteen jää jonkinlainen epävarmuus. Yksi tällainen on mittaaminen. Mittaamisen yhteydessä puhutaan sekä luotettavuudesta ja mittausepävarmuudesta. Edellä kuvattujen luotettavuus ja varmuus käsitteiden perusteella luotettavuus liittyy itse järjestelmään ja varmuus sen ominaisuuksiin tuottaa tarkoituksenmukaisia mittaustuloksia. Yksi mittalaitteeseen liittyvä varmuus liittyy sen käytettävyyteen, tuottaako mittalaite tuloksia juuri silloin, kun tarvitaan.

Kun mittajärjestelmä antaa skalaariarvon mittaustuloksena, ei vielä voida puhua varmuudesta vaan tarvitaan arvoon liittyvä mittalaitteelle ilmoitettu tarkkuusalue. Mittaustuloksen epävarmuudessa on kyse siitä, onko todellinen mitta mittaustuloksen tarkkuusalueen sisällä. Analyysi voidaan tehdä usean boolean tyyppisen tapahtuman perusteella, josta voidaan johtaa todennäköisyys mittausepävarmuudelle.

Asian tilan varmuus

Varmuudella voidaan myös ilmaista asian tilan olemassaolon mahdollisuutta. Sataako ulkona, pitääkö tutkimustulos paikkaansa tai onko järjestelmä häiriössä. Näissä asian tilojen olemassaoloja lähestytään boolean tyyppin näkökulmasta, ne joko ovat tai eivät ole. Jokainen edellä mainittu esimerkki voisi olla myös kvalitatiivisesti arvioitavissa; ulkona sataa heikosti tai ajoittain, tutkimustulos pitää melko hyvin paikkaansa tai järjestelmä on osittain häiriössä. Asian tilan olemassaolon mahdollisuutta kuvaava todennäköisyys vaihtelee samasta tilanteesta, riippuen mihin tieto tai todentaminen perustuu. Jos henkilökohtaisesti todetaan ulkona satavan vettä, sen

todennäköisyys on suuri, maksimaalinen. Jos tieto perustuukin toisen henkilön kertomaan ja havainto oli tehty kolmannen osapuolen toimesta joskus aiemmin, ei sen todennäköisyys enää olekaan kovin suuri.

Asian tilan olemassaolon ja tapahtuman samankaltaisuus on ilmeinen. Asian tilaa ei ole ilman sitä edeltänyttä tapahtumaa, eikä tapahtumaa ole ilman sitä seuraavaa asian tilaa: Järjestelmä on mennyt häiriöön (tapahtuma), järjestelmä on häiriössä (asian tila). Varmuus liittyy näihin molempiin ilmiöihin.

Varmuuskerroin

Edellisten perusteella voidaan ajatella, että varmuus on tapahtuman toteutumisen tai asian tilan olemassaolon mahdollisuus. Tätä mahdollisuutta ilmaistaan todennäköisyydellä. Todennäköisyyttä voidaan ilmaista lukuarvona 0..1 tai 0..100 %. Herännee kysymys, kuinka voidaan puhua varmuudesta todennäköisyytenä, jos käytetään ilmaisua varmuuskerroin. Tällöinhän pitäisi puhua suuremmasta kuin 100 % todennäköisyydestä.

Varmuuskerroin riippuvan taakan kantavuudelle voidaan ajatella kuviossa 3 olevalla vaijerilla, joka koostuu 7 säienippukimpusta, jossa jokaisessa on 7 säienippua. Niput koostuvat 7 yksittäisestä säikeestä, jolloin vaijerissa on yhteensä $7^3 = 343$ säiettä. Yksittäinen säie ei kykene kantamaan kuormaa. Yhden säikeen varaan lasketun kuorman kantovarmuus on käytännössä nolla. Säikeiden määrää lisäämällä saavutetaan jossain vaiheessa tilanne, että vaijeri juuri ja juuri kantaa kuorman, voidaan sanoa, että murtolujuus ja kuorma ovat samat. Tässä tilanteessa kyseessä on vasta yksinkertainen varmuus.

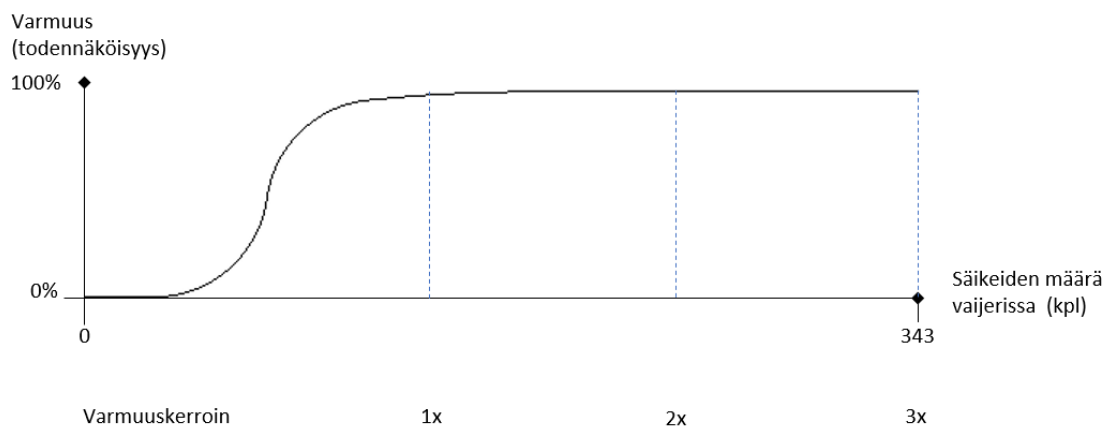
Varmuuskerroin on luku, joka kertoo, kuinka moninkertainen määrä säikeitä pitää vielä lisätä yksinkertaisen varmuuden rinnalle. Kuviosta 4 huomataan, että varmuuskertoimien lisääntyessä lähestytään 100 % kantovarmuutta, mutta ei koskaan sitä kuitenkaan ylitetä. Varmuutta voidaan näin ollen ilmaista aina todennäköisyydellä enimmillään 100 %:lla vaikka varmuuskerroin olisi kuinka suuri tahansa.

Todennäköisyyskäyrän muotoon ja paikkaan vaikuttavia tekijöitä ovat mm. aika, yksittäisten säikeiden poikkipinta-ala ja niiden vaihtelu, teräksen lujuus ja sen vaihtelu, sisäisien vaurioiden, epäpuhtauksien tai epäjatkuvuuksien määrä, virumisominaisuudet, lämpötilan ja kuorman

dynaamisen vaihtelun suuruus. Retorisena kysymyksenä voitaisiin esittää, miten yksinkertainen varmuus tarkalleen ottaen määritellään.



KUVIO 3. Vajerin koostuminen säikeistä, säienipuista ja säienippukimpusta (40)



KUVIO 4. Varmuus suhteessa varmuuskertoimiin

Saantovarmuus

Varmuudessa, silloin kun se voidaan ilmoittaa todennäköisyytenä, on aina taustalla boolean tyypiset tapahtumat, joista voidaan johtaa tulevan tapahtuman todennäköisyys. Saantovarmuudessa ensin pitää määritellä ajanjakso, mille jaksolle tapahtuman todennäköisyyttä arvioidaan ja toisaalta mikä on se tapahtuma, jonka toteutumiselle todennäköisyys lasketaan.

Laskentaa ei saada toimimaan, jos ajatellaan aluksi koko tuotantoerää ja sen saantoa. Tuotantoerän saannon muuttaminen yksittäiseksi tapahtumaksi tai asian tilaksi ei ole käytännön kannalta toimivaa. Saantovarmuuden arvo saadaan toimivaksi siten, että koko tuotantoerän suunniteltu tuotantoaika jaetaan hetkellisen tehokkuuden perusteella lyhyiksi aikajaksoiksi, jolloin jokaisella jaksolla valmistuu yksi tuotos häiriöttömässä tuotannossa. Jakson ajan ollessa yhdelle kappaleelle yksi minuutti ja tuotantoaika 100min saadaan 100 boolean tyyppisiä tapahtumaa, joita voidaan mitata, toteutuuko saanto kyseisenä yksittäisenä jakson aikana. Jos jokaisella minuutilla tuotos valmistui, saadaan saantovarmuudeksi 100 %. Jos nopeutta lasketaan puoleen, saadaan tuote vain joka toisella minuutilla. Tällöin joka toisen minuutin saanto on 0 % ja joka toisen 100 %. Tästä seuraa, että saantovarmuus on 50 % koko tuotantoerälle. Tästä voidaan johtaa saantovarmuus myös seuraavalle tuotantoerälle. Vähäisellä määrällä mitattuna saantovarmuutta ei voida mitata tarkasti juuri kuvatulla tavalla, vaan vasta suurten lukujen lakina tunnetun usean tapahtuman keskiarvona.

2.3 Kyky ja ominaisuus

Sanastokeskuksen TEPA -termipankki ei ilmaise sanalle kyky suomenkielistä selitystä tai merkitystä. (15.) Kyky on joukko ominaisuuksia, jotka luovat edellytykset toteuttaa tehtävää saavuttaakseen tavoitteen tai odotusarvon. Kykyyn vaikuttavat ominaisuudet ovat pääsääntöisesti toiminnan mahdollistavia ominaisuuksia eli toiminnallisia ominaisuuksia. Velallisen velanmaksukyky perustuu velallisen *ominaisuuksiin*, lämpömittarin *kyky* ilmaista lämpötilaa perustuu mittarin *ominaisuuksiin*, ja tuotantoprosessin *kyky* päästä saantotavoitteisiin perustuu myös sen *ominaisuuksiin*. Kyky on aina myös ominaisuus, mutta ominaisuus ei yleensä ole toiminnan mahdollistava kyky. Tästä syystä ominaisuudet määrittelevät kyvyt. Pallon pinta on tasainen ja pyöreä. Pinnan *ominaisuuksista* seuraa, että pallolla on *kyky* pyöriä.

Kyvystä pelkästään ei voida tehdä luotettavuuden johtopäätöstä, varsinkaan silloin kun kysymyksessä on elävä olio. Elävällä oliolla voi olla kyky suoriutua tehtävästä, mutta jos tahto puuttuu, niin tehtävästä ei suoriudu. Tästä syystä luotettavuuden yleismäärittelyä ei voida rakentaa pelkän kyvyn varaan, vaan kykyjen ja tahdon yhdessä muodostamaan ominaisuuteen.

Ominaisuudet, jotka mahdollistavat tekemisen, ovat tekemisen edellytyksiä, kykyjä, mutta ominaisuudet eivät itse välttämättä aiheuta tekemistä. Tekijän ollessa teollisuusrobottijärjestelmä,

sillä on ominaisuuksia, kykyjä, joilla se voi toteuttaa siltä odotetut tehtävät. Kykyjen käyttäminen eli tehtävien toteuttaminen vaatii vielä ulkoiset tekijät ja käytön. Ulkoisina tekijöinä ovat sekä energia, että materiaali ja käyttäjänä voi olla operaattori tai toinen laite.

2.4 Resilienssi

Resilienssi on toimintaan liittyvä käsite. Se on kyky, jolla järjestelmä, yksilö tai yhteisö ennakoii vaaratilanteet, välttää niihin joutumisen, mutta jouduttuaan kykenee toimimaan niissä tai toipumaan niistä helposti. (17 s.8, kohta 2.3)(18.)(19.) Resilienssin vastakohtana voidaan näin ollen pitää haavoittuvuuden ja avuttomuuden yhdistelmää. Resilienssi mielletään hieman eri tavoin eri yhteyksissä. Useissa määritelmässä korostuu toipumis- ja/tai sopeutumiskyky ja vähemmälle huomiolle jää ennakointi. (17.)

Resilienssi-käsite on varsin keskeinen robottijärjestelmän luotettavuuden rakentamisen näkökulmasta. Asian havainnollistamiseen voisi käyttää eri-ikäisiä ihmisiä. Pienen lapsen resilienssi on heikko, koska hän ei pärjää omillaan, eikä hän osaa varoa vaaran paikkoja. Ongelma- tai poikkeustilanteissa hänen vähäinenkin toimintakykynsä romahtaa ja on välittömästi apua vailla. Hän vaatii jatkuvasti valvontaa ja tukea. Aikuinen ihminen pärjää jo omillaan. Hän osaa ja ymmärtää ennakoita ja väistää vaaratilanteita. Aikuisen kohdatessa isoja ongelmatilanteita, hän voi niistä selvitä itsenäisesti. Hänen toipumis- ja sopeutumiskykynsä on hyvä. Hän osaa huolehtia itsensä toimintakyvyn ylläpitämiseen liittyvistä tarpeistaan, kuten riittävästä ravinnosta ja levosta. Myös ongelmatilanteissa hän osaa ilmaista avuntarpeen. Vanhuudessa resilienssi heikkenee jälleen.

Robottijärjestelmän resilienssissä on kyse pitkälle samasta asiasta sen elinkaaren eri vaiheissa (kts. 4.1 Ammekäyrä). Myös eri robottijärjestelmien laadullinen ero voidaan tehdä juuri resilienssin arvioinnin kautta. Kun robottijärjestelmälle tulee ongelmia, täytyy sillä olla kyky ilmaista ongelmatilanteet ja selviytyä niistä itsenäisesti mahdollisimman pitkälle. Heikoimmillaan robottijärjestelmä resilienssi voidaan nähdä vikatilanteessa, jossa järjestelmä on pysähtynyt, mutta järjestelmä ei osaa edes ilmaista sitä. Tai se ei tunnista poikkeustilannetta, ja robotti pysähtyy lopulta servomoottereiden ylivirtaan erilaisissa törmäystilanteissa. Parhaimmillaan robottijärjestelmän resilienssi voidaan nähdä kykyinä selviytyä mitä erilaisimmista poikkeustilanteista. Jos resilienssiä ei huomioida suunnittelussa voi järjestelmän resilienssi jäädä

pysyvästi heikolle tasolle, jolloin järjestelmä vaatii jatkuvaa ”hoivaa” ja huolenpitoa. Korkean luotettavuuden saavuttaminen robottijärjestelmässä edellyttää korkeaa resilienssiä.

2.5 Tuotantoprosessin tehokkuus ja saanto

Tuotantoprosessiin kuuluu keskeisinä käsitteinä hetkellinen tehokkuus, saanto ja nimellisaanto. Tuotantoerästä saatavia tuotoksia ei kuitenkaan saada yleensä niin paljoa kuin hetkellisen tehokkuuden perusteella voitaisiin teoreettisesti laskea. Menetyksiä tulee häiriöistä, keskeytyksistä, nopeudesta ja laaduttomuudesta. Tuotantoerästä saatua tuotoksien määrää kutsutaan saannoksi. Standardi SFS-EN 13306:2017 s.25 käyttää saannosta ilmaisua ”toteutunut tuotannon määrä”. Nimellisaantona voidaan ymmärtää sellainen tuotantoerän laskennallinen saanto, jossa koko tuotantoaika voidaan kertoa hetkellisellä tehokkuudella. Toisin sanoen se on tuotantoprosessin teoreettinen maksimi määrä tuotoksia kyseisenä aikana ilman tuotantoaika, nopeus tai laatumenetyksiä.

Nimellisaanto on keskeinen käsite tuotantoprosessia ja robottijärjestelmää määritellessä. Nimellisaanto ja saanto kuvaavat pelkästään tuotoksien määrää, mutta joissain tapauksissa on tuotava esille mitä ajanjaksoa tarkastellaan. Nimellisaanto vuodessa kirjallisessa muodossa ilmaistuna olisi: $\text{Nimellisaanto}_{\text{vuosi}}$. Jos aikajakso, tässä tapauksessa vuosi, olisi ilmaistu myös yksikössä; kpl/vuosi , tämä olisikin tehokkuuden tai kapasiteetin yksikkö. Useimmiten on kuitenkin käytännöllisempää puhua saannosta pelkkänä määränä, kuin ilmaista samassa yhteydessä myös sen tuottamiseen käytetty aika. Saanto käsite on rinnastettavissa sellaisiin talouden käsitteisiin kuin tulot ja menot, näissäkään ei ilmaista aikajaksoa asiayhteydessä kuin tarvittaessa. Käsiteltäessä tekijöitä, jotka yleensä vaikuttavat tuloihin ja menoihin ei ole tarkoituksen mukaista ilmaista ajanjaksoa tällaisessa kontekstissa.

Nimellisaantoa tietyssä ajassa voitaisiin ilmaista myös nimellistehokkuudella tai nimelliskapasiteetilla. Nimellis- etuliite voitaisiin korvata brutto -etuliitteellä, jolloin käsitteet olisivat helposti ymmärrettävissä. Nettosaantona käytetään tässä työssä ilmaisua saanto.

2.6 Yhteenveto keskeisimmistä käsitteistä

Luotettavuutta ei ole määritelty suomen kielessä yleisellä tasolla, vaan määritelmät ovat kunnossapitostandardissa ja TEPA-termipankissa kontekstiin sidottuja, tosin TEPA-termipankin kontekstia ei tunneta. Varmuus ja kyky ovat TEPA-termipankissa määrittelemättä. (15.) Kunnossapitostandardeissa varmuus ei esiinny yksistään vaan etuliitteellisenä toiminta- tai käyttövarmuutena. (9.)(16.)

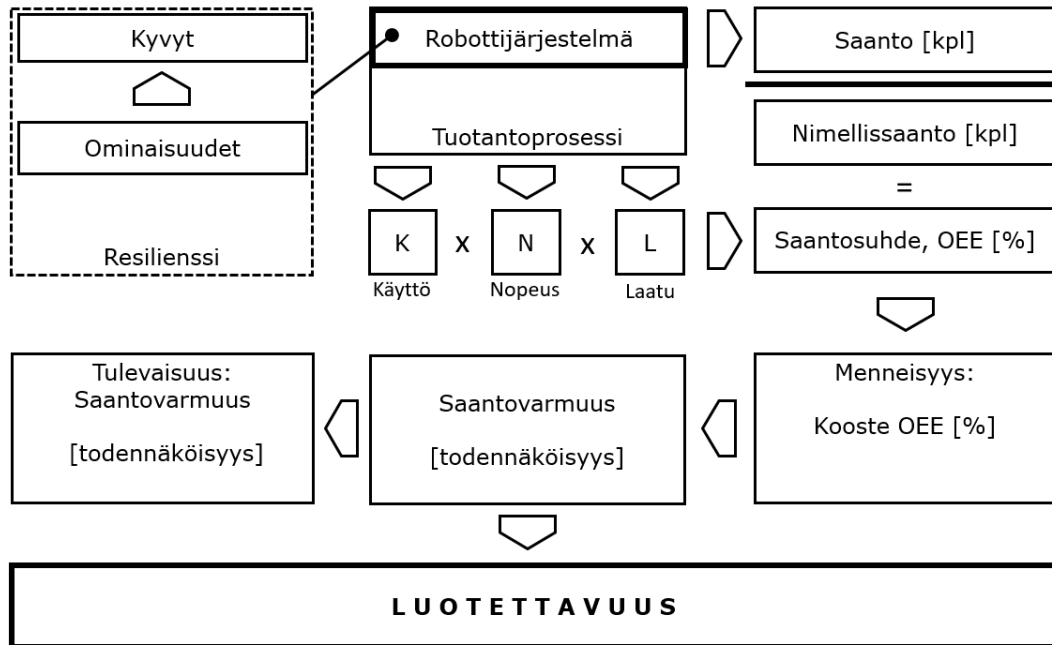
Tämä määrittelemättömyys tai kontekstisidonnainen määrittely aiheuttaa tarpeen, mutta antaa toisaalta vapauden määritellä käsitteet tätä opinnäytetyötä varten.

Keskeisimmät määritelmät ja niiden ketjutus:

- *Ominaisuudet* luovat *kyvyt*.
- *Kyvyt* yhdessä ulkoisien tekijöiden kanssa mahdollistavat tavoitteellisen *toiminnan*.
- Toistuvasta *toiminnasta*, suorituksista, voidaan koostaa *toteutumia*.
- *Toteutumista* voidaan laskea *todennäköisyys* käynnissä olevan, seuraavan tai seuraavien toimintojen toteutumiseen.
- *Varmuus* on suure, joka kuvaa tapahtuman toteutumisen tai asian tilan olemassaolon mahdollisuuden suuruutta. Yksikkönä on todennäköisyys. Tapahtuma tai asian tila voi olla ajan hetkeen, keston tai määrään sidonnainen.
- *Luotettavuus* on objektiivinen tai subjektiivinen *johtopäätös* entiteetin ominaisuudesta suoriutua tehtävästään suhteessa sen tavoitteeseen tai odotusarvoon. Tehtävä voi sisältää suoritusolosuhteet ja tavoiteajan, -hetken, -keston tai tavoitemäärän. Luotettavuudella voidaan ilmaista menneisyyttä, nykyhetkeä ja arvioida tulevaisuutta.

Kuvion 5 mukaan tuotantoprosessin luotettavuuden muodostuminen perustuu saantovarmuuteen. Saantovarmuus, jonka yksikkönä on todennäköisyys, toimii usean eri varmuuskäsityksen kokoajana. Tällaisia varmuuksia ovat esimerkiksi käyttövarmuus tai toimintavarmuus. Erilaisia

järjestelmän osavarmuuksia on kuvattu tarkemmin kuviossa 2. Saantovarmuus ilmaisee todennäköisyyden tuotoksen syntymiselle sen määritellyllä jaksonajalla. Saantovarmuuden arvo on sama kuin OEE.



KUVIO 5. Luotettavuuden muodostuminen tuotantojärjestelmässä saantovarmuuden perusteella

3 LUOTETTAVUUDEN TEOREETTINEN LASKENTA

Luotettavuuskäsityksen muodostuminen järjestelmää kohtaan perustuu yleensä kahteen varmuuteen; käyttö- ja toimintavarmuuteen. Molemmat varmuudet perustuvat joko tapahtumahistoriaan tai ennakoita laskemiseen teoreettisesti. Kun luotettavuus perustuu matematiikkaan, joko ennalta laskentaan tai historiaan, on se objektiivista luotettavuutta.

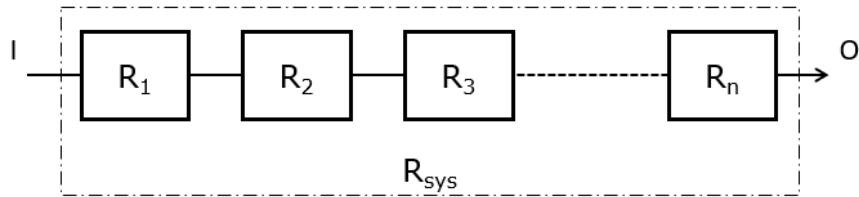
Laskentaan perustuva varmuus liittyy suunnitteluun. Suunnitelmat voivat olla mekaaniseen kestävyysliittyviä kuten kiinnittimien kantavuuksien laskelmia. Ylimoittamalla kiinnitin saadaan korkea todennäköisyys ja siten korkea varmuus sen kestävyydelle. Elektroniikan suunnittelussa laskentaan perustuva kestoajan todennäköisyys saadaan useamman komponentin yhdistelmälle, joille kaikille tunnetaan likimääräinen toimintavarmuus suhteessa tiettyyn aikajaksoon.

Jokaisella yksittäisellä yksiköllä on jokin tunnettu tai tuntematon käyttö- ja toimintavarmuus. Jos yksittäisten laitteiden käyttö- ja toimintavarmuutta ei tunneta, ei koko järjestelmän luotettavuutta luonnollisesti voida laskea. Jokainen toimintavarmuus on kuitenkin arvio, ei koskaan täysin varma. Mitä tarkempi tai luotettavampi arvio yksiköiden varmuuksista on käytettävissä sen luotettavampi kokonaisuuden arvio (20).

Käyttö- ja toimintavarmuus on myös tiettyyn ajanjaksoon tai tapahtumakertoihin kääntäen verrannollinen. Mitä pidempi aika tai useampi tapahtumakerta, sen pienempi mahdollisuus on toimintakyvyn yhtämittaiseen säilymiseen.

3.1 Sarjaankytkentä

Sarjaan kytkettyjen yksiköiden yhteinen luotettavuus on yksittäisten yksiköiden keskinäinen tulo kuvion 6 mukaan. Kuviossa 7 on kuvattu laskentaesimerkki.

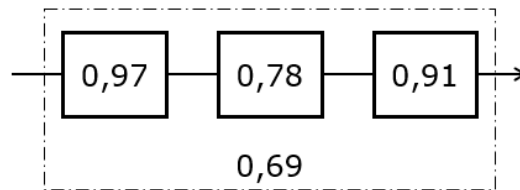


KUVIO 6. Sarjaankytkentä

KAAVA 1. Sarjaankytkentä.

$$R_{\text{sys}} = R_1 \times R_2 \times R_3 \dots \times R_n$$

Kaavassa 1 R_{sys} on kokonaisjärjestelmän varmuus ja R_n osatekijöiden varmuus tietyssä ajanjaksona.

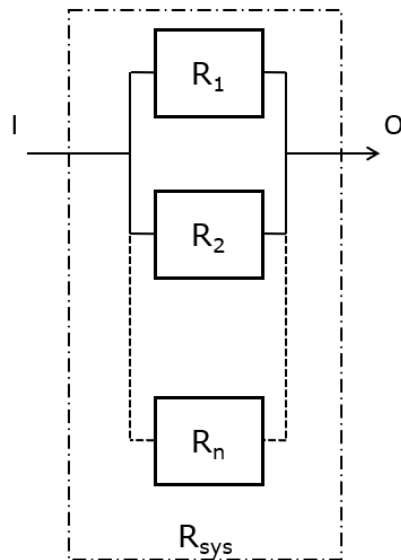


KUVIO 7. Sarjaankytkennän laskentaesimerkki

Yksittäiset komponentit, tapahtumat tai prosessit sarjaan kytkettäessä heikentävä lähtökohtaisesti aina koko järjestelmän luotettavuutta. Poikkeuksiakin on olemassa. Jos robotin ote syystä tai toisesta on säännöllisesti epätarkka kappaleeseen ja tällä tarkkuudella siitä seuraisi seuraavan vaiheen erittäin heikko luotettavuus. Tässä tilanteessa voidaan lisätä yksi työvaihe, jossa kappale irrotetaan ja paikoitetaan uudestaan suhteessa ympäristöön, jigiin tai muuhun vastaavaan. Tämän jälkeen poimitaan kappale uudestaan tarkemmin tarttujaan ja tarkempi paikoitus tarttujassa parantaa seuraavan vaiheen luotettavuutta. Vaikka lisätty työvaihe lähtökohtaisesti aina laskee luotettavuutta, se kuitenkin nostaa seuraavan vaiheen luotettavuutta suhteessa enemmän, jolloin kokonaisluotettavuus paranee.

3.2 Rinnankytkentä

Rinnankytkennän laskentaa tarvitaan silloin, jos jokin toiminto halutaan kahdentaa ja tehdään vaihtoehtoinen reititys prosessissa. Kuviossa 8 on kuvattu rinnankytkentä ja kuviossa 9 laskentaesimerkki.

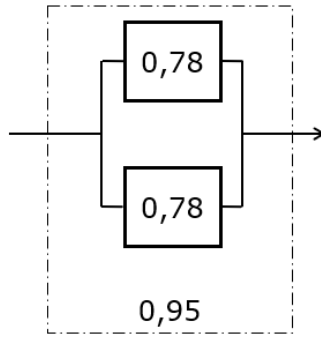


KUVIO 8. Rinnankytkentä

KAAVA 2. Rinnankytkentä.

$$R_{sys} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

Kaavassa 2 R_{sys} on kokonaisjärjestelmän varmuus ja R_n osatekijöiden varmuus tietynä ajanjaksona.

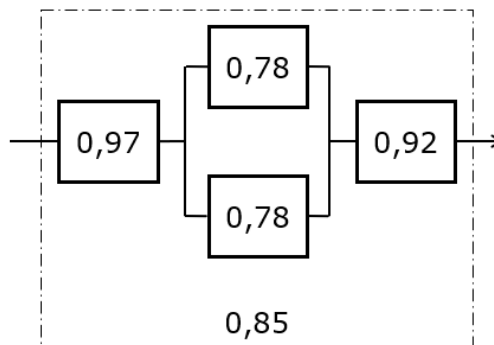


KUVIO 9. Rinnankytkennän laskentaesimerkki

3.3 Sarjaan- ja rinnankytkentä

Yhdistetty sarjaan- ja rinnankytkennän laskenta perustuu edellä kuvattuihin tapoihin. Kuviossa 10 olevassa esimerkissä ensin lasketaan rinnakkaisten järjestelmien yhteinen toimintavarmuus ja tämän jälkeen ne muodostavat kolmen yksikön sarjaankytkennän. Nämä lasketaan lopuksi sarjaankytkentälaskentaperiaatteen mukaisesti.

Rinnakkaistoimintojen lisääminen on yksi yleinen tapa lisätä järjestelmän luotettavuutta. Kuviossa 10 kuvatun laskennan kautta sen syy on helposti nähtävissä.



KUVIO 10. Yhdistetty sarjaan- ja rinnankytkentä

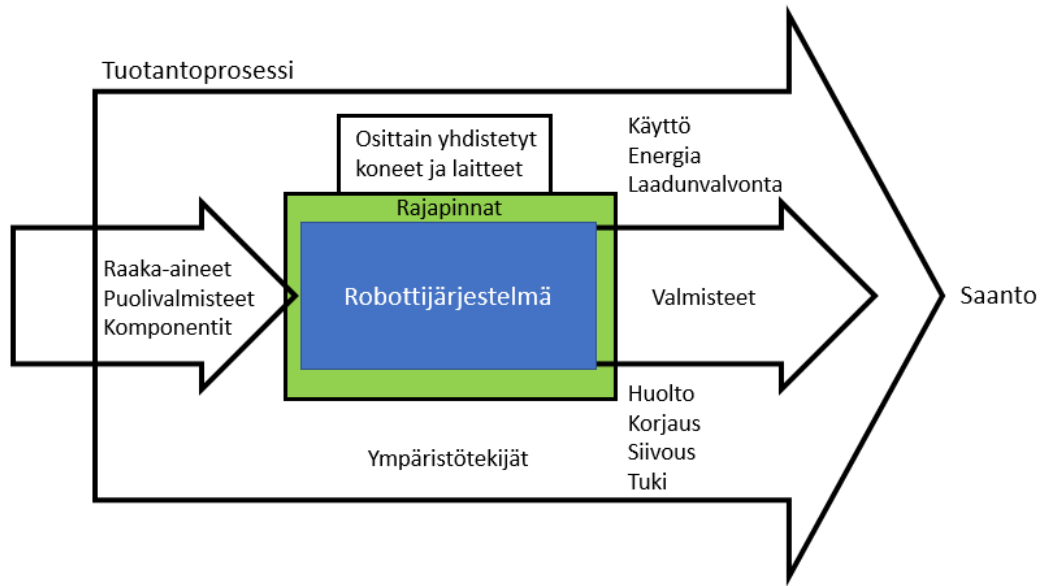
3.4 Tuotantoprosessien kytkeytyminen toisiinsa

Tuotantoprosessit voivat olla toisistaan riippuvaisia sarjaan- tai rinnankytkennän kautta riippuen materiaalivirtauksen reitityksestä. Edellä kuvattuna sarjaan- ja rinnankytkentöjä voidaan ajatella myös OEE:n kautta. Esimerkeissä kuvatut komponentit voidaan korvata yksittäisillä tuotantoprosesseilla ja niiden OEE:llä. Laskenta kertoisi tuotantoprosessien kokonaisluotettavuuden siinä tapauksessa, että välivarastoja ei olisi.

4 LUOTETTAVUUS TUOTANTOPROSESSISSA

Luotettavuudesta kommunikoidessa on kontekstin huomioiminen tärkeää. Kun järjestelmäintegraattori kommunikoi luotettavuudesta, sen intressi on lähinnä työnalla oleva laite. Kunnossapidon konteksti on samoin laitetasolla sisältäen vahvemmin ylläpidollisen näkökulman. Järjestelmää suunnittelevan ja tilaavan yrityksen näkökulmasta on otettava huomioon laajempi perspektiivi suhteessa luotettavuuteen. Yrityksen näkökulmasta olennaista on vain se, kuinka paljon ja toistettavasti koko tuotantoprosessi pystyy arvoa tuottamaan. Vain absoluuttisen arvontuoton kautta investoinnin kannattavuutta voidaan arvioida ja perustella. Yrityksen johdon näkökulmasta tuotantoprosessin luotettavuuteen vaikuttaa kunnossapidon lisäksi mm. tuotannosuunnittelu, ostot, logistiikka ja käyttö.

Robottijärjestelmä on aina osa laajempaa tuotantoprosessia. Kuviossa 11 on kuvattu tuotantoprosessi, jonka yhtenä osana on teollisuusrobottijärjestelmä. Ympäröivät tekijät luovat robottijärjestelmän toimintaedellytykset. Tuotantoprosesseja voidaan ketjuttaa, jolloin yhden saanto on seuraavan aihio. Robottijärjestelmä on huomioitava osana laajempaa tuotantoprosessia. Tarpeen on kiinnittää huomiota niin raaka-aineen kuin energian syöttöön, työnvaihtojen sujuvuuteen, huollettavuuteen, varaosien saantiin, käyttöhenkilöstön saatavuuteen (21 s.34, kohta 2.3) ja kaikkeen, mitkä vaikuttavat järjestelmän toimintaan tai toimimattomuuteen. Sellaista tuotantoteollista robottijärjestelmää, jolla ei ole sidosryhmiä tai rajapintoja, ei ole olemassa.



KUVIO 11. Teollisuusrobottijärjestelmä osana tuotantoprosessia

4.1 Ammekäyrä

Ammekäyrällä ymmärretään laitteen elinkaaren kunnossapitokustannuksia ja/tai häiriötaajuutta. Ammekäyrä saa nimensä sen muodosta, jossa ylläpitokustannukset järjestelmän elinkaaren alussa kuvio 12 jakso p1 ovat korkeahkot ja laskevat suhteellisen nopeasti tietylle vakiotasolle kuvio 12 jakso p2. Kun laite myöhemmin lähestyy elinkaarensa päätä, niin kunnossapidon kustannukset ja häiriötaajuus alkavat jälleen nousta ja ovat elinkaaren loppuosalla kuvio12 jakso p3 jälleen korkealla. (12.)

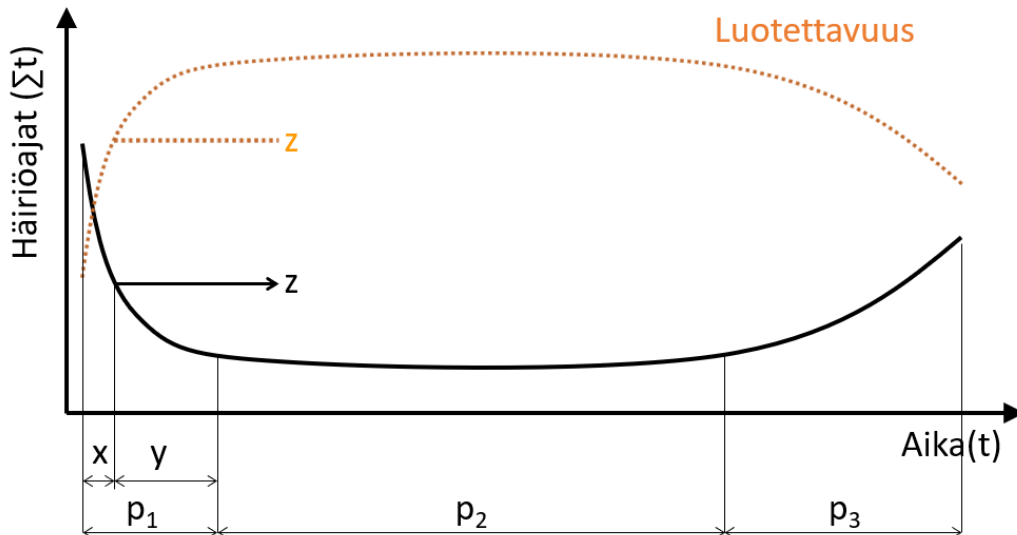
Vaikka kyseessä onkin kunnossapidon kustannuksia tai vikataajuutta arvioiva havainnollinen kuvaus koko laitteen elinkaaresta, korreloi sen muoto käänteisesti järjestelmän resilienssiä ja siten myös luotettavuutta. Korkeat kunnossapitokustannukset ja vikataajuus ovat yleensä suoraan verrannollisia alhaiseen käyntiasteeseen kyseisin laitteen elinkaaren aikana (22 s.8).

Jos järjestelmä on yksinkertainen ja vakiotyyppinen on käyrän alkupiste valmiiksi alhaalla. Jos taas järjestelmä on monimutkainen, ainutlaatuinen tilaustyönä valmistettu kokonaisuus on kunnossapitokustannusten ja häiriöaikojen käyrän aloituspiste hyvinkin korkealla.

Ammekäyrän alkuvaihetta kuvio 12 jakso p1 voidaan jakaa vaiheisiin x ja y. Vaiheessa x kehitys on nopeaa, häiriötaajuus alenee nopeasti ja saanto paranee. Tämän selittää se, että vakiotyökierrojen kehittäminen on edennyt huippuunsa. Robottien pisteitä on korjailtu, parametrejä säädelty, mekaanisia hienosäätöjä on tehty. Koska ajetaan vakiotyökierroja, on niistä helppo havaita ja tunnistaa häiriösyöt ja niiden perusteella kehittää varmuutta. Poikkeustilanteita on jo jonkin verran tullut esille ja joitain niiden tuomia ongelmia on jo korjailtu.

Kuviossa 12 vaiheessa y, jolloin vakiotyökierrot on saatu jo toimimaan varsin luotettavasti, on ongelmana vielä poikkeustilanteet. Ne johtuvat normaalista työkierrosta poikkeavista tapahtumista. Poikkeavista tapahtumista johtuvat poikkeustilanteet voi olla työn vaihto, asetusten vaihto, raaka-aineen loppuminen tai lisääminen tms.

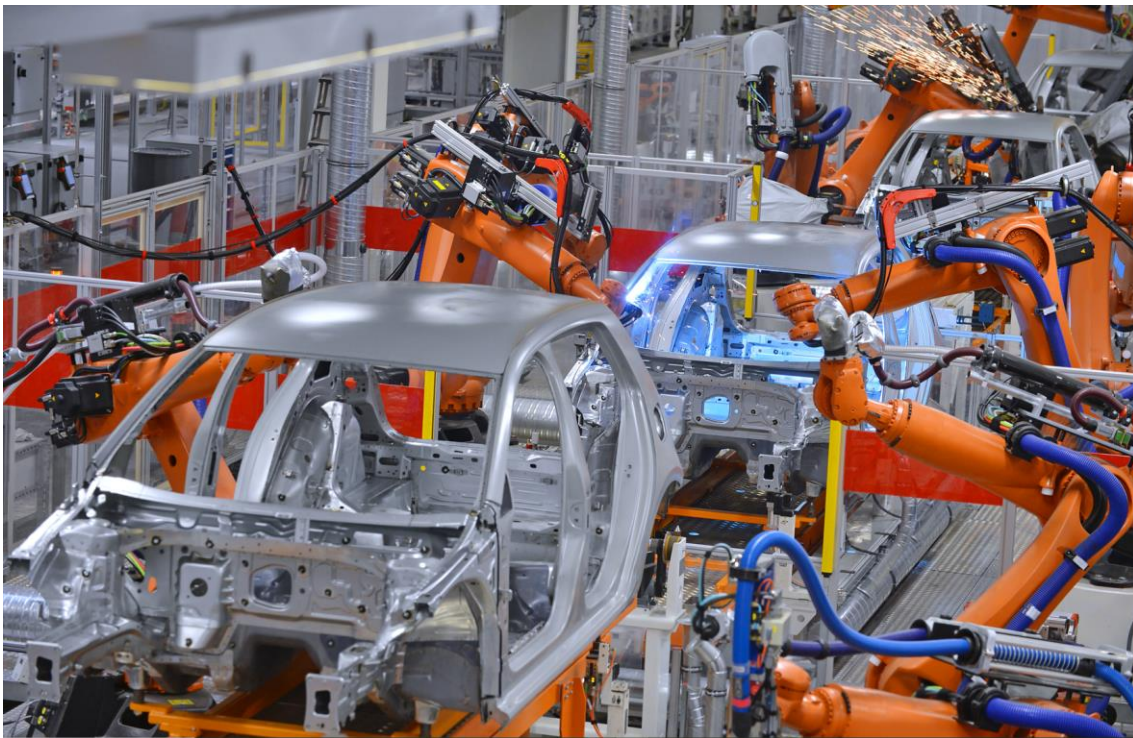
Jos resilienssiä ei tietoisesti olla suunniteltu järjestelmään, käy niin, että kuvio 12 vaiheen x jälkeen ammekäyrän pohja lähtisi muodostumaan suuntaan z, samoin luotettavuus käänteisesti. Järjestelmän ylösajovaihe olisi lyhyt, mutta järjestelmän häiriöajat jäisivät pysyvästi korkeammalle tasolle.



KUVIO 12. Ammekäyrä

4.2 Korkean luotettavuuden merkitys

Luotettavuuden korostamista ei voine liioitella. Teollisen tuotannon kehityssuunta on vääjäämättä yhä kompleksisimpiin kokonaisuuksiin etenemistä, joissa riippuvuudet toisista järjestelmistä vain kasvavat. Kun ajatellaan tuotannon kehittämistä vaikkapa Leanin näkökulmasta; poistamalla varastot sekä siirtomatkat huomataan, että tehokkain tapa valmistaa on yhdessä pisteessä mahdollisimman suuri arvonlisä. Tästä hyvänä esimerkkinä voidaan mainita autoteollisuuden kokoonpanolinjat kuten kuviossa 13, joissa välivarastot ovat harvassa ja riippuvuusketjut ovat pitkiä. (23 s.41,42.) Jos yhtä työvaihetta ei voida tehdä loppuun laitehäiriön vuoksi, koko pitkä valmistusketju pysähtyy. Kun yksi linjasto pysähtyy, pysähtyy edeltävät ja seuraavatkin. Vähäisen osan vioittumisella voi olla isot vaikutukset.



KUVIO 13. Autokorin kokoonpanolinja (39)

Yllä mainittua kehityssuuntaa peilaten, voidaan vastaavasti todeta, että tällaisten suurien kokonaisuuksien toteutuessa yksittäisten komponenttien, laitteiden ja järjestelmien luotettavuus nousee erityisen huomion kohteeksi. Yksittäinen, pieni ja mitättömän tuntuinen osa voi pysäyttää koko tuotantolinjan tai jopa koko tehtaan. Järjestelmän kokonaisluotettavuus määräytyy jokaisen yksittäisten sarjaan kytkettyjen laitteiden luotettavuusien tulosta. Tällöin jokainen sarjaan lisätty laite lähtökohtaisesti vain lisää vikataajuutta ja heikentää luotettavuutta.

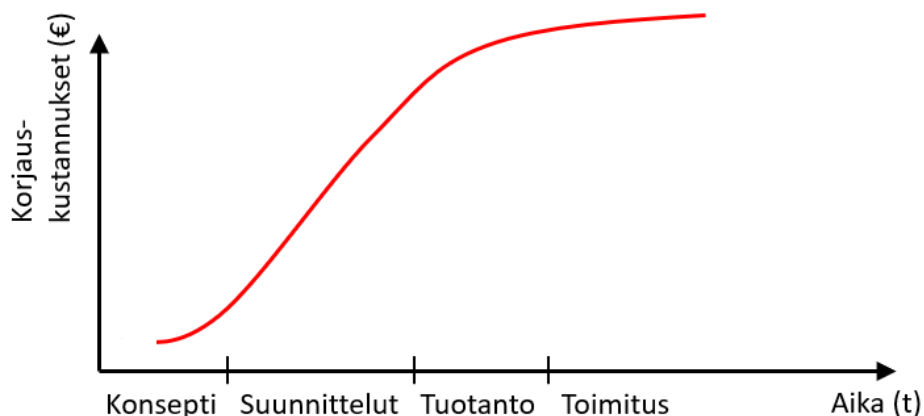
Luotettavuutta pitkäketjuisissa valmistusprosesseissa voitaisiin parantaa siten, että valmistusprosessi katkotaan lyhempiin itsenäisiin osiin. Kun yksi jalostusketjun toiminto pysähtyy häiriöön, muut voisivat edelleen jatkaa. Tästä aiheutuu kuitenkin tarve varastoida keskeneräistä tuotantoa osaprosessien väliin keskeytystilanteissa. Varastojen olemassaolo ja niiden käsittely aiheuttaa yksinomaan arvoa tuottamatonta työtä, joka näin ollen heikentää tehokkuutta.

Toisinaan ylävirrassa voi olla prosessi, jota ei voida juuri pysäyttellä ja sen vuoksi robottijärjestelmän luotettavuuteen on kiinnitettävä erityistä huomiota. Järjestelmän häiriöistä voi tulla isoja ongelmia, jos materiaalivirtaa ei voida välittömästi pysäyttää ennen häiriössä olevaa robottijärjestelmää. Tällaisia voisi olla esim. nopeatahtiset elintarviketeollisuuden prosessit tai lämmönhallintaan tai kemialliseen reaktioon perustuvat panostyyppiset tuotantoprosessit.

4.3 Luotettavuuden rakentamisen kustannukset eri elinkaaren vaiheissa

Luotettavuuden parantaminen määrittelyvaiheessa ei välttämättä ole kustannuskysymys. On paljon asioita, jotka eivät sinänsä maksa juuri mitään, jos vain ne ymmärretään lisätä vaatimusmäärittelyihin. Jos tiedetään vaikkapa jonkin yksittäisen kaapelin tai letkun väsymiskestävyys heikoksi, voidaan määritellä suoraan käytettäväksi kestäväksi todettua kaapelityyppiä. Kun kaapeli joka tapauksessa kuuluu toimitukseen, ei sen täsmällinen määrittely välttämättä nosta kustannuksia, mutta vaikuttaa toimintavarmuuteen myönteisesti. Kyse on kuvainnollisesti siitä, määritelläänkö talo rakennettavaksi tiilistä vai oljista, jos se kuitenkin on päätetty rakentaa. Jos määrittelyjä ei tehdä tilaajan toimesta, ominaisuudet määräytyvät toimittajan toimesta.

Jos määrittelyjä luotettavuuden parantamiseksi ei ole tehty, niin yleensä havaitaan toimituksen jälkeen erilaisia korjaus- tai muutostarpeita. Näiden kustannukset ovat moninkertaiset verrattuna siihen, jos haluttu ominaisuus olisi määritelty jo alussa. Muutuskustannukset ovat kuvattuna kuviossa 14 projektin eri vaiheissa toteutettuna. Kustannuksissa ei ole kyse pelkästään muutoksen hinnasta vaan monesti myös menetetyistä tuotantojärjestelmän käyttöajasta.



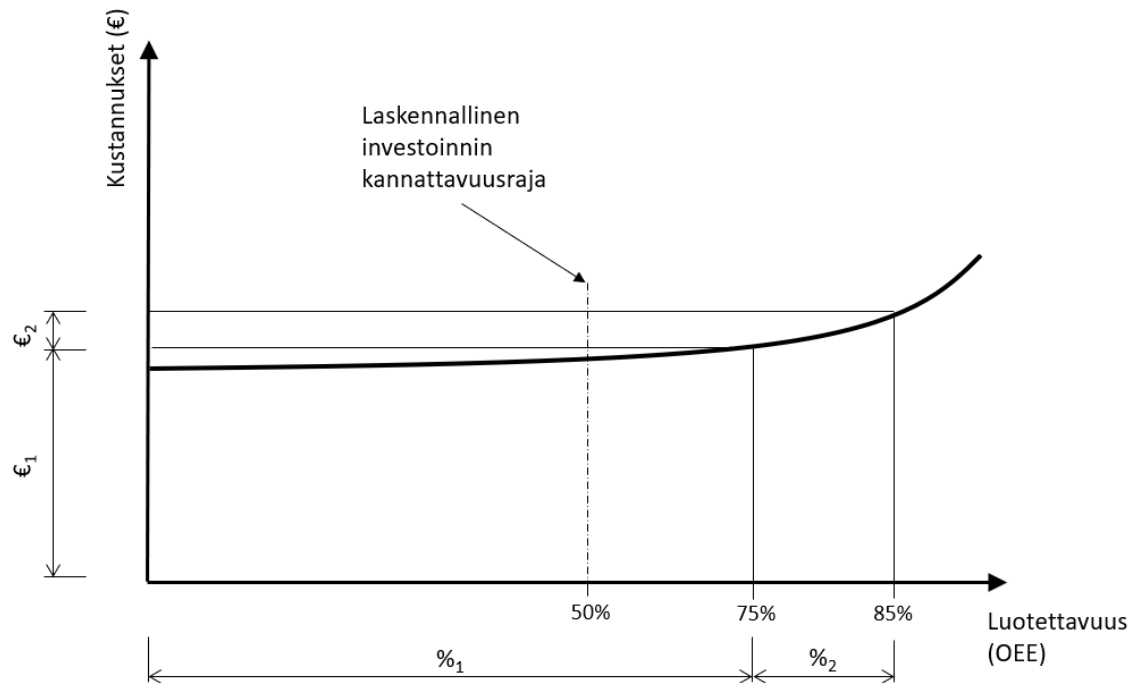
KUVIO 14. Järjestelmätoimittajan muutos- tai korjauskustannukset suhteessa toimituksen eri vaiheisiin (20) (40 s.172)

Investoinnin takaisinmaksua voidaan ajatella luotettavuuden kautta, täytyy saavuttaa tietty luotettavuus taso, että investointi olisi kannattava. Järjestelmän luotettavuustasoa ei voida määrittellä kannattavuusrajalta, vaan se täytyy asettaa kauemmaksi riskienhallinnan ja talouden näkökulmista. Kun luotettavuuden taso on saavuttanut kannattavuuden rajan, tämän jälkeen yhden prosenttiyksikön paraneminen luotettavuudessa nostaa useita prosentteja kannattavuudessa. Kuviossa 15 on kerrottu luotettavuuden merkitys taloudellisesta näkökulmasta. Järjestelmä vaatii minimissäänkin tietyn määrä taloudellista panosta, että tietyt perustoiminnot ylipäättään saadaan aikaiseksi. Niinpä perustoiminta vaatii kuvion 15 €₁ investoinnin ja tällä voidaan päästä kuvassa näkyvään %₁ luotettavuustasoon, joka täytyy olla yli kannattavuusrajan.

Olkoon esimerkkinä €₁ = 1 M€ ja %₁ = 75 %. Suhteessa pienemmällä sijoituksella €₂ perusinvestoinnin päälle voidaan lisätä luotettavuutta kuvassa näkyvän %₂ verran eli 10 % -yksikköä. Olkoon luotettavuuden lisäinvestointi €₂ 100 k€:a. Esimerkissä kannattavuuden rajana on 50 %:ia. Voidaan laskea, että 1 M€ investointi tuottaa (75 % - 50 %) 25 % katetta. Siten yksi katetuotto prosentti maksaa n. 40 k€ (1 M€ / 25 %). Kun verrataan luotettavuuteen tehtyyn lisäinvestointiin €₂ = 100 k€, jolla saadaan luotettavuutta 10 % -yksikköä lisää, niin lisäinvestoinnilla saatu yhden lisäkatetuotto prosentin hinta on 10 k€ (100 k€ / 10 %).

Tässä esimerkissä sijoitetun pääoman tuotto perusinvestoinnin ja luotettavuuteen tehdyn lisäinvestoinnin välillä on nelinkertainen. Ero tulee siinä, että perusinvestoinnissa joudutaan maksamaan paljon muitakin kustannuksia, kuin vain luotettavuuteen liittyviä. Myös sellaisia, jotka eivät varsinaisesti tuota mitään, mutta ne ovat välttämättömiä robottijärjestelmässä. Tällaisia ovat

projektointikustannukset, sähkösuunnittelu, sähkötarvikkeet, turvallisuussuunnittelu, suojarakenteet, asennukset ja niin edelleen. Luotettavuuteen tehty lisäinvestointi kohdentuu täsmällisesti vain sellaisiin, mitkä parantavat saantovarmuutta, koska perusrakenteet ovat jo olemassa.



KUVIO 15. Luotettavuuteen sijoittaminen robottijärjestelmän investoinnissa

5 LUOTETTAVUUDEN MITTAAMINEN

Tuotantoprosessia määriteltäessä sen yksi keskeisempi ominaisuuksia on saantotavoite, kuinka paljon tuotoksia tuotantoprosessista tulisi saada tietyssä ajan jaksossa. Tämä on nettomäärä, jonka toteuttamiseksi on määriteltävä tuotantoprosessin bruttomäärä, nimellissaanto. Nimellissaanto on se määrä hyödykkeitä, jotka saadaan tuotannon häiriöttömällä, suunnitellulla nopeudella ja ilman laatuhävikkiä tietyssä aikayksikössä. Nimellissaanto saadaan laskennallisesti hetkellisen tehokkuuden ja suunnitellun käyttöajan tulona.

Ensimmäisinä asioina hankintaprojektin taloudellista kannattavuutta arvioidessa edes epävirallisesti, pohditaan nimellissaannon tasoa. Jos alkuarvioinnissa todetaan, että tuotantoprosessille ja sen järjestelmille olisi mahdollista saada kannattavuuden kannalta riittävä saanto, aloitetaan tarkemmat laskelmat. Laskelmien tarkentuessa, tehdään jossain vaiheessa investointipäätös tai hylätään aie.

Tuotantoprosessin tavoitetta asetettaessa, on huomioitava, millainen rooli prosessilla on suhteessa koko toimitusketjuun. Huomioimatta kokonaisuutta, voidaan asettaa tavoitteeksi liian matala saantovaatimus, josta muodostuisi pullonkaula koko toimitusketjulle. Saantovaatimus voidaan asettaa myös liian korkealle. Jos tuotantoprosessin tehokkuus on suhteettoman suuri tarpeeseen nähden, maksetaan investointikuluina turhasta tehokkuudesta ja tuotantoprosessin joutoajasta.

Tuotantoprosessin sisältämä robottijärjestelmän suunnittelu tähtää tähän asetettuun ylätasoon nimellissaantotavoitteeseen. Saantotavoitteen ajanjaksoksi on tarkoituksenmukaista kuitenkin valita sellainen aika, joka sisältää työvaihdot, huollot, puhtaanapidot ja muut tekijät, jotka osaltaan vaikuttavat saantoon. Koska saantolaskelmien kautta peilataan myös liiketalouden dynamiikkaa, on syytä käyttää saantolaskelmissa sellaista ajanjaksoa, joka toimii käytännöllisesti liiketalouden sykleissä kuten kuukasi, kvartaali tai vuosi.

5.1 OEE ja saanto

Tuotantoprosessin tehokkuutta voidaan arvioida O.E.E mittarilla. (10.) O.E.E on kirjainlyhenne, joka tulee englanninkielisistä sanoista Overall Equipment Efficiency. Käytännöllisyyden vuoksi kirjainlyhenteestä pisteet on monessa yhteydessä poistettu ja käytetään OEE:tä.

Mittauksessa huomioidaan kaikki ne osatekijät, jotka vaikuttavat prosessin tehokkuuteen. Osatekijöinä ovat käytön määrä suhteessa suunniteltuun käyttöön, nopeus suhteessa suunniteltuun nopeuteen ja laadullisten kappaleiden suhteellinen määrä. Jokainen osatekijä saa siten suhteellisen arvon ja näiden osatekijöiden keskinäinen tulo on OEE mittarin arvo.

Suomenkielinen identtinen vastine OEE:lle on KNL kokonaistehokkuusmittari, joka tulee sanoista **Käyttösuhde**, toiminta-aste (ennen **Nopeus**) ja **Laatukerroin** (9). Kokonaistehokkuus = K x N x L. OEE mittari kertoo tuotannon tehokkuuden suhteessa nimelliskapasiteettiin. Nimellistehokkuus saavutetaan silloin, kun jokainen OEE osatekijä on yksi tai 100 %:ia. Silloin tuotanto on käynyt koko suunnitellun ajan, on käynyt suunnitellulla nopeudella ja kaikki tuotteet ovat olleet kelvollisia.

Tuotantoerän saanto saadaan kahdella tavalla: Laskemalla kelvollisten kappaleiden määrä tuotantoajan jälkeen (=saanto) tai laskemalla se OEE:llä. Jos nopeus vaihtelee tuotannon aikana, eikä siitä saada tarkkaa lokitietoa tuotantoajan ajalta, saadaan tarkempi tulos laskemalla saanto ja vertaamalla sitä nimellissaantoon. OEE:llä laskettaessa saantoa, MES-järjestelmän ilmoittama OEE arvo kerrotaan nimellissaannolla, jolloin tuloksi saadaan tuotoksien määrä eli saanto. OEE:llä, saannolla ja nimellissaannolla on yhteys, joka voidaan ilmaista seuraavalla kaavalla:

KAAVA 3. Saanto

$$\text{Saanto} = \text{Nimellissaanto} * \text{OEE}$$

Kun verrataan, miten tuotantoajan saanto toteutui nimellissaannon suhteen, kaavasta 3 johtamalla nähdään, että suhde on sama kuin OEE:

KAAVA 4. OEE

$$\text{OEE} = \text{Saanto} / \text{Nimellissaanto}$$

Saannon ja nimellisaannon suhteesta voidaan käyttää ilmaisua saantosuhde.

KAAVA 5. Saantosuhde

$$\text{Saantosuhde} = \text{Saanto} / \text{Nimellisaanto}$$

Yhdistettynä edelliset kaavat saadaan:

KAAVA 6. OEE ja Saantosuhde

$$\text{OEE} = \text{Saanto} / \text{Nimellisaanto} = \text{Saantosuhde}$$

Kaavan 6 perusteella voidaan todeta, että OEE ja saantosuhde ovat siten samaa tarkoittavia.

Aiemmin luvussa 2.2. kerrottu saantovarmuus, saantosuhde ja OEE ovat lukuarvoiltaan samoja. Näin ollen OEE:tä, joka usein on tuotantoprosesseista helposti saatavilla, voidaan käyttää ilmaisemaan sekä *saantovarmuutta*, että saantosuhdetta.

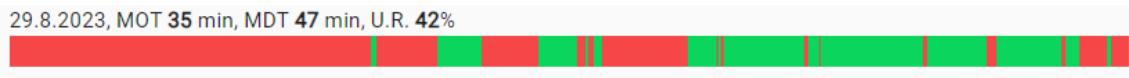
5.2 Tuotantoprosessin ja robottijärjestelmän OEE:t

PSK Standardi 7501 mukaan OEE:ssa lasketaan ”tuotannon” OEE (41 s.7). Tästä voidaan tehdä johtopäätös, että laskennassa on huomioitu koko tuotantoprosessi, eikä ainoastaan yksittäistä tuotantokonetta tai robottijärjestelmää. Näin täytyykin olla, koska OEE laskentakaavassa käytettävyys (K) laskemisessa poimitaan laskentaan vaikuttavana tekijänä seisokkiaika. Seisokkiajan kestoon ei tuotantokone tai robottijärjestelmä itse voi vaikuttaa vaan ulkoiset tekijät, logistiikka, operaattorit tai kunnossapito, jotka ovat osa tuotantoprosessia. Yleisesti OEE:llä tarkoitetaan tuotantoprosessin tehokkuutta, vaikkakin englanninkielisessä lyhenteen ensimmäinen E kirjain viittaa *laitteiston* tehokkuuteen.

Tuotantoprosessia voidaan mitata OEE:llä, mutta samoin voidaan myös robottijärjestelmää sen itsenäisenä osana. Vaikka edellä perustellun mukaan OEE määrittelee koko tuotantoprosessia, voidaan seuraavaksi kuvatulla tavalla saada selville pelkän robottijärjestelmän osuus OEE:hen.

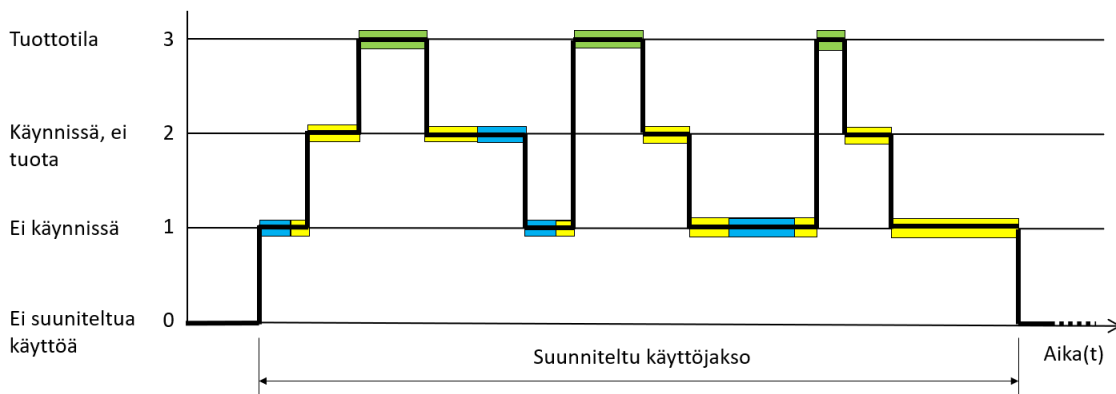
Kuviossa 16 voidaan nähdä yksittäisen laitteen aikajana kahdesta tilasta: Käyntiaika ja ei-tuottava-aika. Jos oletuksena on, että tuottava aika oli nopeuden ja laadun osalta 100 %, niin käyttösuhteesta U.R 42 % voidaan tehdä OEE laskelma, joka antaa OEE:ksi 42 %. Tästä on

kuitenkin vielä liian aikaista tehdä robottijärjestelmän luotettavuusanalyysiä, koska OEE koskee koko tuotantoprosessia.



KUVIO 16. Ei-tuottava-aika (punainen) ja käyntiaika (vihreä)

Kuvion 17 mukaan robottijärjestelmän tuottamattomia tiloja ovat 1 ja 2. Tiloista voidaan erotella syyt, miksi järjestelmä ei tuota. Synä voi olla sisäiset syyt tai ulkoiset syyt. Robottijärjestelmän OEE:ssä huomioidaan ainoastaan tilojen 1 ja 2 robottijärjestelmän sisäisistä syistä johtuneet odotukset eli nopeusmenetykset sekä häiriöt robottijärjestelmän OEE:tä laskevana tekijöinä. Laaduntuoton osalta robottijärjestelmän OEE:hen ei voida huomioida sellaisia OEE:tä laskevia tekijöitä, jotka johtuvat ei-vaatimustenmukaisien materiaalien käytöstä. Robottijärjestelmän rajapinnassa olevat laitteet on luokiteltava ulkoisiksi syiden aiheuttajiksi.



- = Tuottaa vaatimustenmukaisia tuotteita
- = Syynä ulkoiset tekijät
- = Syynä järjestelmän sisäiset tekijät

KUVIO 17. Robottijärjestelmän tiloja

Tämän analyysin perusteella voitiin todeta kuvio 16 tapauksessa, että suurin osa ei-tuottavan ajan syistä johtuikin ulkoisista tekijöistä ja robottijärjestelmän OEE:ksi saadaan 95 %. Näin käytössä on kaksi OEE arvoa; robottijärjestelmän OEE arvo 95 % ja koko tuotantoprosessin OEE arvo, joka on

42 %. Tästä voidaan laskea muiden kuin robottijärjestelmän vaikutus OEE:hen luvussa 3 esitetyn mukaan.

KAAVA 7. OEE:n jakaminen robottijärjestelmän ja ulkoisien tekijöiden välillä

$$OEE_{\text{Tuotantoprosessi}} = OEE_{\text{Ulkoiset tekijät}} \times OEE_{\text{Robottijärjestelmä}}$$

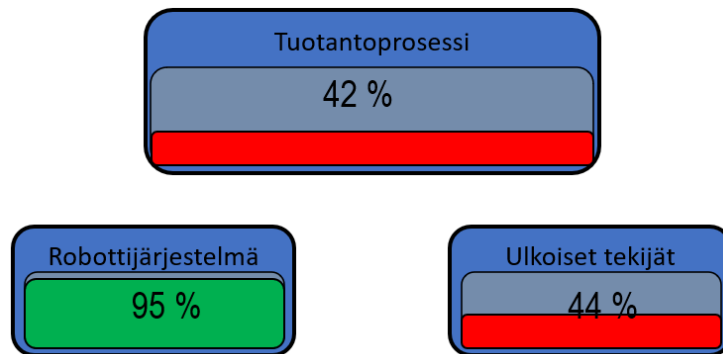
Kun lasketaan edellisen tapauksen ulkoisien tekijöiden osuus OEE:hen, voidaan kaavasta 7 johtamalla laskea:

$$OEE_{\text{Ulkoiset tekijät}} = \frac{OEE_{\text{Tuotantoprosessi}}}{OEE_{\text{Robottijärjestelmä}}}$$

$$OEE_{\text{Ulkoiset tekijät}} = \frac{42 \%}{95 \%} = 44 \%$$

Näin saadaan analyysi robottijärjestelmän ja sen ulkoisien tekijöiden vaikutuksesta koko tuotantoprosessiin. OEE:n laskeminen suoraan ulkoisille tekijöille ilman robottijärjestelmän analyysiä voi olla mahdoton, mutta se voidaan näin laskea epäsuorasti robottijärjestelmän ja koko tuotantoprosessin OEE lukujen kautta. Ulkoisien tekijöiden OEE luku on tärkeä vertailuluku päätelyyn, mihin tuotannon kehittämistoimet tulisi kohdentaa. Tässä tapauksessa ne tulisi kohdentaa ulkoisiin tekijöihin.

Kattava luotettavuuden mittari robottijärjestelmälle, ulkoisille tekijöille ja koko tuotantoprosessille koostuu näiden kolmen OEE luvusta kuviossa 18 esitetyllä tavalla. Tämän erityinen hyöty on siinä, että robottijärjestelmän ja ulkoisien tekijöiden välistä eroa kokonaisluotettavuuden osalta voidaan vertailla. Koko tuotantoprosessin OEE:stä nähdään, onko tarvetta kehitystoimille ja osatekijöiden mittarista nähdään kumpaan ne tulisi ensisijaisesti kohdistaa.



KUVIO 18. Tuotantoprosessin ja osatekijöiden OEE:t

Tuotantoprosessin OEE:n jakaminen tekijöihin voi aiheuttaa tietyssä tilanteessa jonkinlaista tulkinnanvaraisuutta. Voidaan ajatella karrikoidusti niin, että kaikki järjestelmän ongelmat ovat ulkoisia syitä. Jos järjestelmä ei käy, se johtuu *aina* ulkoisista tekijöistä. Vaikka järjestelmä pysähtyisikin sisäiseen häiriöön, päädytään useamman ”miksi?” -kysymyksen jälkeen aina ulkoisiin tekijöihin, kuten suunniteluun, käyttöön, ohjelmointiin, kunnossapitoon, huonoon materiaaliin tms. Kuitenkin sisäisissä häiriötapauksissa, tulee ne luokitella järjestelmän syiksi. On tarkoituksenmukaista, että järjestelmä kirjaa tällaista vikaa robottijärjestelmän syyksi.

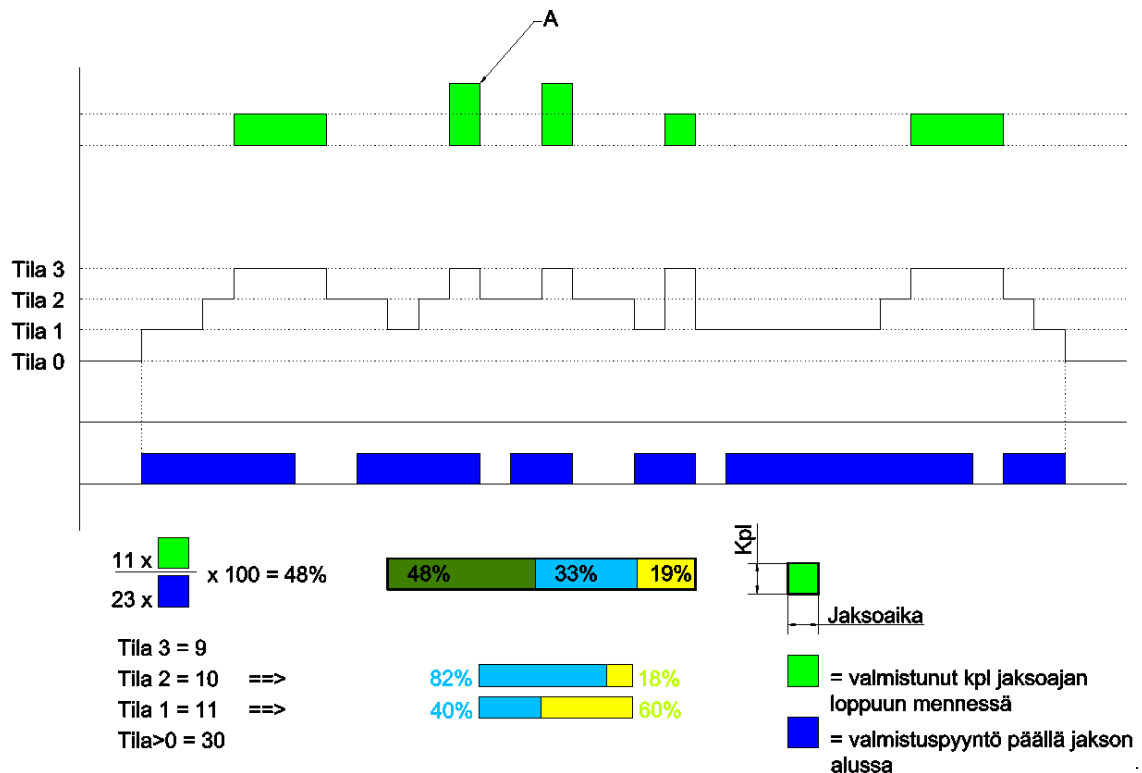
Sisäisen häiriön korjaaminen ja järjestelmän uudelleen tuotantoon saattaminen on aina ulkoisien tekijöiden varassa. Tästä seuraa mittaamisen ongelma; kuinka pitkään järjestelmän sisäisistä syistä johtuvat ongelmat katsotaan kuuluvaksi järjestelmälle ja missä vaiheessa ne kuuluisivat siirtyä ulkoisiksi ongelmiksi. Siirto robottijärjestelmän sisäisestä ongelmasta ulkoisien tekijöiden ongelmaksi voidaan tehdä jonkinlaisella viiveellä tai voidaan jättää kokonaan tekemättä.

Tämän ongelman vuoksi, robottijärjestelmän mittaaminen voidaan tehdä hieman toisella tavalla. Voidaan ajatella, että kunnossapidon vastuu on pitää järjestelmä aina toimintakuntoisena ja käyttäjien vastuu on käyttää sitä sen suunniteltuna käyttöaikana aina silloin, kun se on toimintakuntoinen ja sille on suunniteltua käyttöä. Tällöin kunnossapito vastaa sisäisistä syistä ja käyttö vastaa ulkoisista syistä. Vaikka järjestelmä menisi häiriöön sisäisistä syistä ja käyttö palauttaisi sen tuotantokäyttöön, niin silti menetetty aika menisi kunnossapidon ”tilille”.

Kuviossa 19 esitetyllä jaksoaikaperustaisella mittaamisella saadaan paljon erilaista tietoa järjestelmästä lähes reaaliajassa. Mittaustavalla voidaan erottaa järjestelmän sisäiset ja ulkoiset syyt, sekä saadaan OEE suoraan koko tuotantoprosessista ja pelkästä robottijärjestelmästä.

Joissain OEE mittausjärjestelmissä on tuottamattomat tilat jaettu odotuksiin ja häiriöihin, mutta kuvion 19 mukainen mittaustapa ei huomioi näitä tiloja. Voidaan ajatella, että jos järjestelmällä on valmistuspyyntö päällä, eikä järjestelmä kykene vastaamaan pyyntöön, vaikka ulkoisesta syystä johtuvan materiaalin *odottelun* vuoksi, se on prosessin *häiriötilanne*. Tämä mittaus ottaa sen huomioon jakamalla tuottamattoman jakson sisäiseksi tai ulkoiseksi häiriöksi.

Jokaisen jakson alussa tarkastetaan, onko valmistuspyyntö päällä. Jos näin on, vastataan valmistuspyyntöön suorittamalla jakson tehtävät. Jakson lopussa ilmoitetaan OEE laskentaan kuinka monta kappaletta valmistui ja kuinka monta romutettiin. Lisäksi ilmoitetaan tilatieto ja syytieto tiloille 1 ja 2. On mahdollista, että yksittäisellä jaksolla valmistuu useampikin, kuten kuviossa 19, kohta A:ssa on kuvattu. Tämä on mahdollista sisäisien puskureiden purkautuessa. Jos robottijärjestelmä ei saanut kuluneen jakson aikana valmiiksi yhtään tuotosta, vaikka se olisi ollut tuottavassa tilassa 3, syy on joko nopeudessa tai hylkykappaleen syntymisessä. Heikko nopeus voi johtua odottamisista. Ulkoiset nopeussyyt voidaan tiedostaa ja ilmoittaa OEE laskentaan. Sisäiset odottamisen syyt voidaan päätellä siitä, ettei ulkoisia ollut. Kun järjestelmä on jakson lopussa tilassa 1 tai tilassa 2, niin OEE laskentaan toimitetaan myös tieto, oliko syy järjestelmän sisäinen vai ulkoinen. Kuviossa 19 ei ole esitetty tilojen 1 ja 2 syykoodausta väreillä tilamuutosgraafissa, vaan se on ilmaistu OEE koostepalkissa turkoosina ja keltaisena. Tässä kuvauksessa ei ole laatuhylykappaleita, jotka kuvattaisiin OEE:n koostepalkissa.



KUVIO 19. OEE laskenta jaksonaikaperustaisesti

Kuvatulla tiedonkeruu- ja mittausmenetelmällä saadaan tarkempaa tietoa itse robottijärjestelmästä, eikä tieto huku koko tuotantoprosessin OEE:hen. Kerätyllä tiedolla voidaan analysoida robottijärjestelmää usealla eri tavalla. Voidaan verrata tilojen 1 ja 2 keskinäistä suhdetta tai tilan 2 ja 3 suhdetta. Näiden suhteilla voidaan paikallistaa järjestelmän kehityskohteita. Kuvattu menetelmä mahdollistaa myös monirobottijärjestelmässä yksittäisten robottien tai robottiryhmien mittaamisen. Yksittäisiä robotteja mitatessa täytyy ulkoisina syinä olla kaikki, mitkä eivät kuulu kyseisen robotin toimialueeseen, vaikka ne koko robottijärjestelmään kuuluisivatkin.

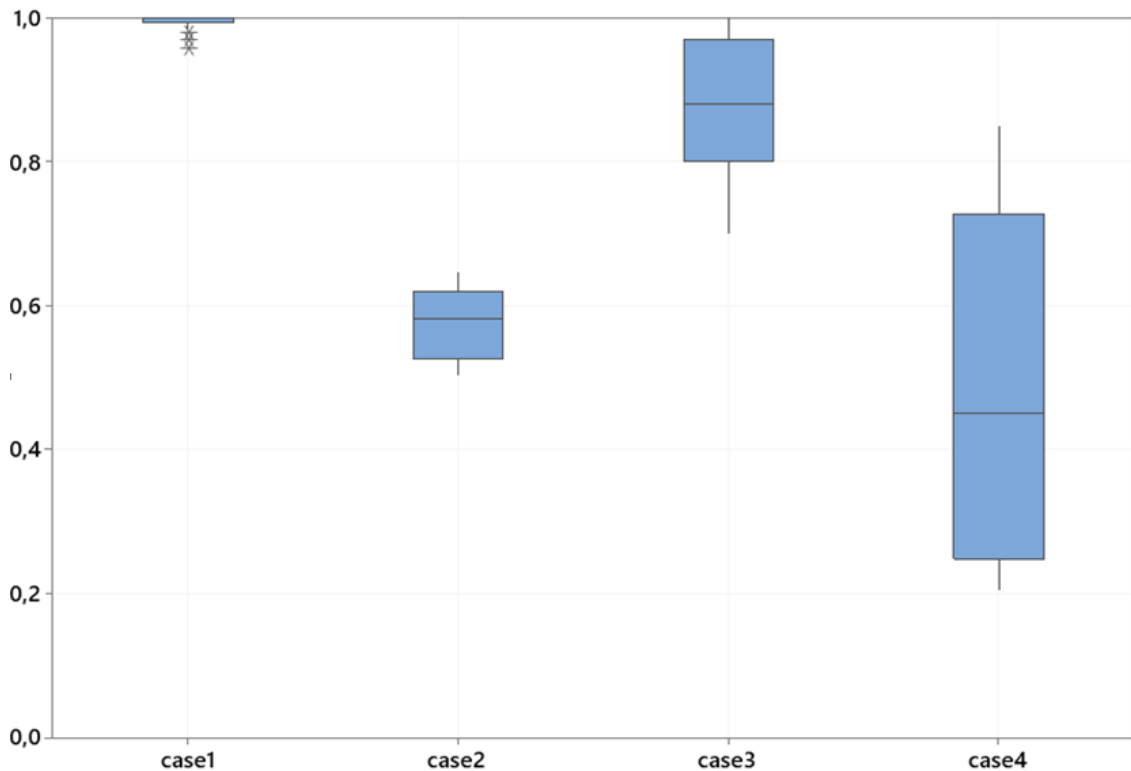
Kuvatulla menetelmällä voidaan mitata myös sellaisen robottijärjestelmän OEE:tä, jossa suoritteet voivat vaihtua ajon aikana. Jaksoajat voisivat olla keskenään erilaiset. Perinteisellä tavalla sekatuotannossa OEE mittauksen ongelma on eri suoritteiden jaksoaikojen ero, joka hankaloittaa laskentaa. Kuvatulla menetelmällä robottijärjestelmälle toimitetaan pyyntö tehdä suorite. Samalla toimitetaan järjestelmälle kyseisen suoritteet jaksoaika tai poimitaan tieto parametreista. Jaksoajan kulumisen jälkeen robottijärjestelmä raportoi suoriutumisensa OEE laskentaan edellä kuvatulla tavalla. Raportti toimitetaan jokaiselta jaksolta, kunnes suorite on luovutettu. Suoritteiden jälkeen voidaan tehdä eri suorite ja jaksoaika voidaan muuttaa jälleen. Näin voidaan laskea robottijärjestelmäkohtainen ja lisäksi tuotekohtainen OEE.

5.3 Saannon vaihtelu

Tuotantoprosessiin kuuluu sattumanvaraisuus, prosessi ei aina toimi samoin, vaan sattumanvaraisuus aiheuttaa vaihtelua saantoon. Saannon historian perusteella ja huomioimalla muut mahdolliset tekijät, voidaan saannolle laskea tai arvioida todennäköisyys. Jos on suuri todennäköisyys saannon suurelle vaihtelulle, voidaan sanoa järjestelmän olevan epävakaa ja vastaavasti, jos on suuri todennäköisyys saannon pienelle vaihtelulle, voidaan järjestelmän sanoa olevan vakaa. Vaihtelun suuruus ei kuitenkaan huomioi saannon tasoa. Järjestelmä voi vakaasti tuottaa heikkoa saantoa.

Kuviosta 20 voidaan päätellä neljästä eri tapauksesta tuotantoajojen vakautta ja suhteellisen saannon tasoa. Sitä kuinka vakaata saannon toistuminen on tietyllä tasolla. Case1 on vakaa ja luotettava, Case2 on vakaa ja epäluotettava, Case3 on epävakaa ja melko luotettava, Case4 on epävakaa ja epäluotettava. Tuotantoprosessia voidaan arvioida sekä vakaudella, että

saantosuhteen tasoilla. Saannon todennäköisyys perustuu historiatietoon ja mahdollisesti tiedossa oleviin ympäristömuuttujiin.



KUVIO 20. Tuotantoerien suhteellisia saantoja

Luotettavuuden perusmittaukseen voidaan käyttää saantosuhdetta eli OEE:tä. Kun halutaan tuotantoprosessin luotettavuudesta laajempi käsitys, sen muodostamiseen tarvitaan myös vaihtelun mittaaminen. Tämä tulee kyseeseen erityisesti tapauksissa, jossa halutaan selvittää olemassa olevan järjestelmän tilaa kehittämisen näkökulmasta.

Tuotantoprosessin kehittämisen näkökulmasta olisi ensiarvoisen tärkeää saada kuvion 20 mukaista mittausdataa sekä kehitettävän tuotantoprosessin, että siinä sijaitsevien robottijärjestelmien ja robottijärjestelmästä katsottuna ulkoisien tekijöiden keskinäisestä tasosta ja vaihtelusta. Olisi mahdollista, että tuotantoprosessin, jossa on robottijärjestelmä, toteuttaa kuvion 20 case4:n tuloksia. Tämän perusteella voidaan muodostaa virheellistä mielikuvaa robottijärjestelmän kyvykkyydestä, vaikka se itsessään toteuttaisi case1 tuloksia.

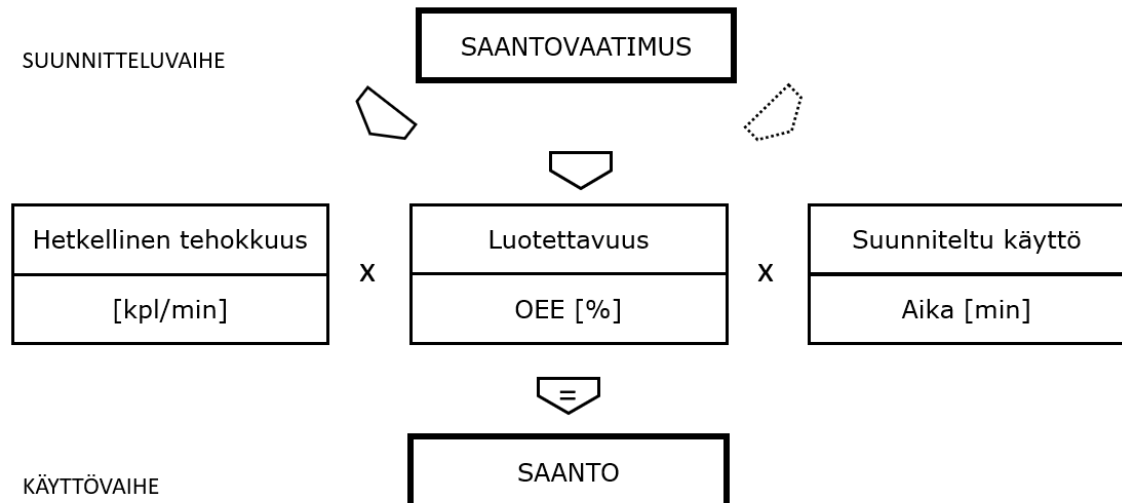
6 ROBOTISOIDUN TUOTANTOPROSESSIN LUOTETTAVUUDEN SUUNNITTELU

6.1 Suunnittelun lähtötilanne

Robottijärjestelmän suunnittelu on iteratiivinen prosessi. Suunnittelu alkaa alun perin jostain yksittäisestä ajatuksesta toteuttaa tuotantovaihe robotisoidusti. Tämän jälkeen asiasta keskustellaan varsin epämuodollisesti, ideoidaan lisää, pohditaan kannattavuutta, mietitään tilankäyttöä ja niin edelleen. Jossain vaiheessa ajatukset alkavat saada kirjallisia muotoja luonnoksina, suunnitelmina, reunaehtoja tuottovaatimuksista, tilankäytöstä ja budjetista. Asioiden edetessä tullaan tilanteeseen, jossa asiat määrittelevät toisiaan: Järjestelmän tehokkuus ja kokoluokka määrittävät budjettia. Toisaalta voi olla tietyt budjetin raamit, minkä rajoissa investointi voisi tulla kysymykseen ja tämä rajoittaa kokoluokkaa ja tehokkuutta. Iteraatiokierroksien jälkeen voidaan saada muuttujat toimimaan keskenään, niin että investointipäätökseen voidaan edetä.

Tärkeintä taloudellisessa mielessä ja investointia päätettäessä on saantovaatimuksen toteutuminen. Saantovaatimus toteutuu vain tuotantoprosessilla, jonka yksi tekijä on robottijärjestelmä. Olennaista on siis tunnistaa robottijärjestelmän toimituksen rajat suhteessa koko tuotantoprosessiin. Nämä rajat määrittelevät robottijärjestelmän vaatimusmäärittelyn ulottuvuuden. On mahdollista, ja usein tarkoituksen mukaista kirjata vaatimusmäärittely koko tuotantoprosessille. Tästä koko prosessin vaatimusmäärittelystä johdetaan vaatimusmäärittely robottijärjestelmälle.

Kuviossa 21 on esitetty robottijärjestelmän ylätasoinen saantovaatimus investoinnin kannattavuuden varmistamiseksi. Saantovaatimus jakautuu alemman tason muuttujiksi, joista lasketaan saanto; hetkelliseksi tehokkuudeksi, luotettavuudeksi ja suunnitellun käytön määräksi. Saantovaatimukselle valitaan tarkoituksenmukainen ajanjakso, jolle vaatimus halutaan asettaa. Suunniteltu käyttö on se käytön määrä, joka aiotaan käyttää, sillä ajalla jolle saantovaatimus on asetettu.



KUVIO 21. Saantoon vaikuttavat tekijät

Periaatteellisen investointipäätöksen jälkeen tilaaja joutuu päättämään missä määrin järjestelmää määritellään itse ja kuinka paljon sen annetaan määräytyä toimittajan toimesta. Saannon vähimmäistoteutuma tuotantoajoissa on tilaajan määriteltävä asia, vaikka juuri muuta ei määriteltäisikään. Kuvio 21 perusteella tilaajan tulee määritellä vähintään hetkellinen tehokkuus ja luotettavuus. Kolmas saantoon vaikuttava tekijä suunniteltu käyttöaika, määräytyy tilaajan oman tuotantoprosessin kautta.

Tilaava yritys voi tehdä pitkällekin vievää konseptisuunnitelmaa tulevasta järjestelmästä. Järjestelmä kannattaa hahmotella kolmiulotteisena mallina robotteineen ja muine toimilaitteineen, jos se on mahdollista. Vaikka malli ei olisi lopullinen, se auttaa tilaajaa arvioimaan omien asiantuntijoidensa kanssa siihen liittyviä riskitekijöitä, joilla on vaikutusta luotettavuuteen, tilankäyttöön, käytettävyyteen ja huollettavuuteen. Jossain vaiheessa mukaan tulee myös toimittaja, jonka kanssa vaatimuksia ja konseptia voidaan hienosäätää ja suunnittelu jatkuu iteratiivisena aina hankintasopimukseen saakka. Yrityksissä, joissa ei ole paljoa kokemusta robottijärjestelmien hankinnoista, tulee järjestelmän toimittaja aikaisemmassa vaiheessa mukaan.

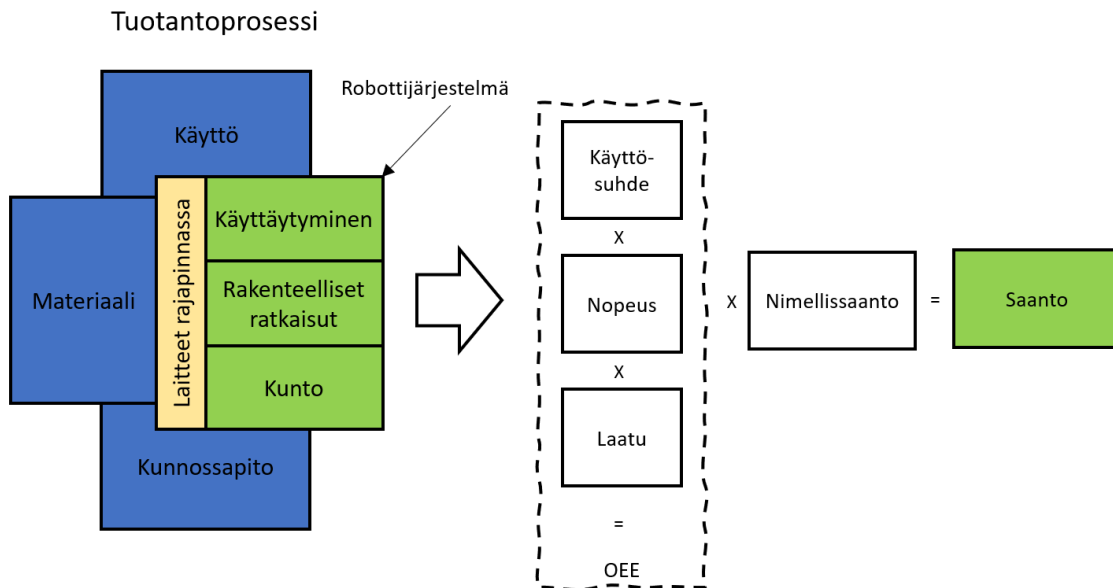
Suunnittelun edetessä, etenee myös riskienhallinta suunnitelmien rinnalla. Jos suunnitelmia muutetaan, on sillä vaikutusta yleensä riskeihin. Kun riskiasetelma muuttuu, voi se aiheuttaa tarvetta muuttaa jälleen suunnitelmaa. Tällaiset toisiaan määrittelevät muuttujat aiheuttavat useita iteraatiokierroksia.

6.2 Luotettavuuden rakenteet

Tuotantoprosessin saantoon vaikuttavat niin robottijärjestelmä, kuin sen ulkoiset tekijät. Kuviossa 22 on esitetty robottijärjestelmä tuotantoprosessin ytimenä. Ydin koostuu kolmesta päätekijästä: Käyttäytymisestä, rakenteellisista ratkaisuista ja järjestelmän kunnosta. Nämä kolme tekijää sisältävät kuvion 5 mukaan robottijärjestelmän kaikki ominaisuudet, joilla järjestelmän kyvykkyys, resilienssi määräytyy. Näihin kolmeen tekijään vaikutetaan suunnittelulla ja käytön aikaisella kunnossapidolla. Nämä tekijät luovat edellytykset robottijärjestelmän käytettävyydelle, nopeudelle ja laaduntuotolle.

Robottijärjestelmän rajapinnassa olevat koneet ja laitteet vaikuttavat osaltaan koko tuotantoprosessin saantoon. Nämä voitaisiin luokitella jopa ulkoisiksi tekijöiksi, mutta koska näillä on yhteinen kättely- ja/tai materiaalirajapinta ja niiden merkitys robottijärjestelmän luotettavuudelle on niin keskeinen, on ne syytä luokitella omaksi luokaksi, rajapintaluokaksi.

Robottijärjestelmällä on ulkoiset tekijät, jotka vaikuttavat koko tuotantoprosessin saantoon. Kuviossa 22 on esitelty kolme keskeisintä robottijärjestelmän ulkoista tekijää: Käyttö, materiaali ja kunnossapito. Käyttöön vaikuttaa sekä tuotannon suunnittelu, kuinka paljon järjestelmää aiotaan käyttää ja operaattoreiden toiminta. Häiriö- ja keskeytystilanteissa juuri operaattoreilla on merkittävä rooli vaikuttaa koko tuotantoprosessin OEE:hen niissä tilanteissa, kun järjestelmä pitää palauttaa tuottavaan tilaan. Materiaalin merkitys on tärkeä laadun ja sen keskeytymättömän saannin kannalta. Kunnossapidon merkitys on tärkeä vika- ja häiriötilanteissa palauttaa robottijärjestelmä nopeasti tuotantokelpoiseksi, sekä ennaltaehkäistä edellä mainittuja tiloja tarkkailu- ja huoltotoimilla.

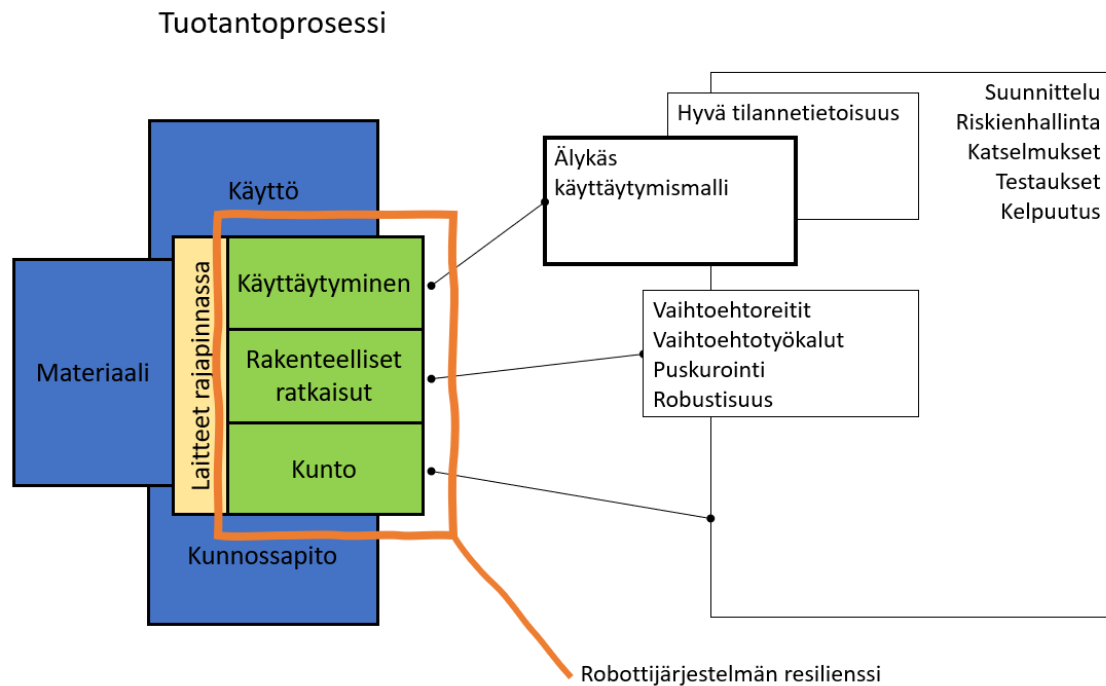


KUVIO 22. Saantoon vaikuttavat tekijät tuotantoprosessissa ja robottijärjestelmässä

Näillä kolmella robottijärjestelmän sisäisellä tekijällä, kolmella ulkoisella tekijällä sekä laitteistoilla rajapinnassa määräytyy tuotantoprosessin luotettavuus. Nämä tekijät toteuttavat tuotantoprosessin OEE:n, jolla myös saanto määräytyy. Näistä kolmesta robottijärjestelmän sisäisestä tekijästä jokainen voitaisiin vielä jakaa sekä ohjelmallisiin, että fyysisiin tekijöihin. Vaikka käyttäytymisen voisi ymmärtää pelkästään ohjelmallisena tekijänä, on käyttäytyminen kuitenkin aina fysiikan ja ohjauksen yhteinen ilmentymä. Rakenteelliset ratkaisut ja kunto voidaan nähdä niin fyysisissä osissa kuin ohjelmistoteknisissä ratkaisuissa.

6.3 Robottijärjestelmän resilienssin rakentaminen

Robottijärjestelmän hyvä resilienssi ja siitä seurannut vakaa ja korkea saanto antavat hyvän perustan kutsua robottijärjestelmää luotettavaksi. Resilienssiä voidaan ajatella erikseen robottijärjestelmän ominaisuudeksi tai koko tuotantoprosessin ominaisuudeksi. Jos operaattoreille ei saada sijaisuuksia sairaustapauksissa, kuvastaa se heikkoa tuotantoprosessin resilienssiä, mutta sillä ei kuitenkaan ole vaikutusta alemman tason robottijärjestelmän resilienssiin. Robottijärjestelmän resilienssi perustuu kuvion 23 mukaan järjestelmän hyviin fyysisiin ja funktionaalisiin ominaisuuksiin; käyttäytymiseen, rakenteellisiin ratkaisuihin ja robottijärjestelmän kuntoon.



KUVIO 23. Robottijärjestelmän resilienssi

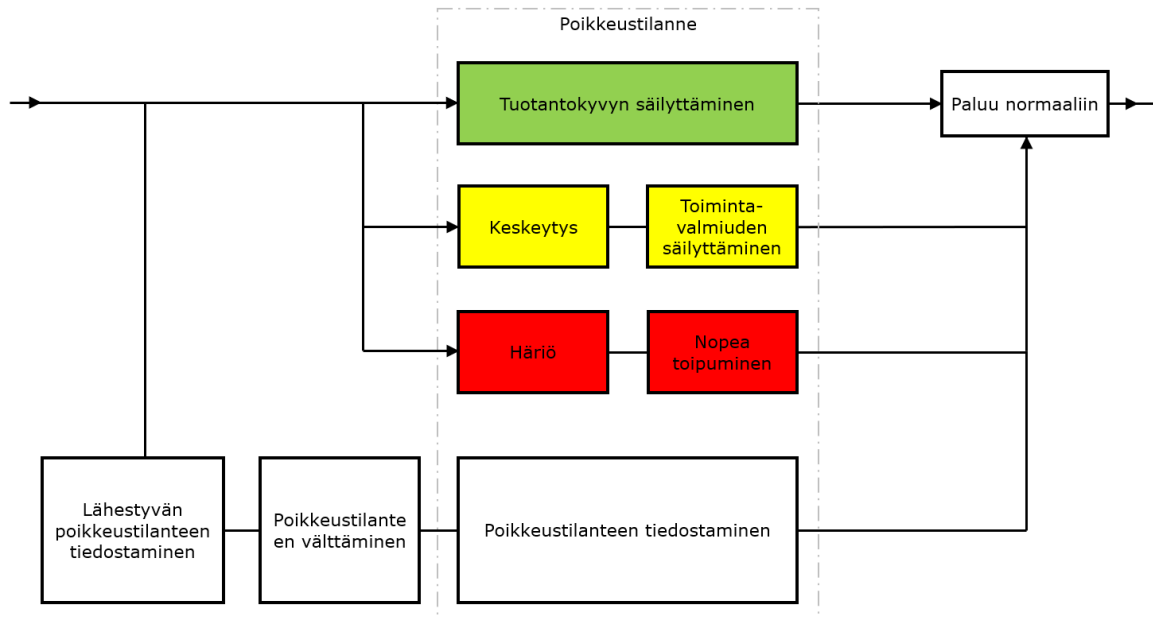
6.4 Käyttötyminen

Robottijärjestelmän käyttötymiseen on tarpeen kiinnittää huomiota. Oikeanlaisella tavalla voidaan käyttötymisellä vaikuttaa erityisen paljon järjestelmän kykyyn selvitä erilaisista tilanteista menettämättä toimintakykyä. Korkean resilienssin käyttötymismallia voisi kutsua älykkääksi käyttötymismalliksi.

Älykkään käyttötymismallin rakentaminen perustuu pitkälle poikkeavien tilanteiden hallintaan. Perusprosessityökierrot ovat normaali prosessia, mutta kaikki tapahtumat, jotka poikkeavat perusprosessityökierrosta ovat poikkeustilanteita. Osa poikkeustilanteista on säännöllisiä ja osa ennalta arvaamattomia. Tärkeintä on alussa tunnistaa kaikki mahdolliset poikkeustilanteet, sekä säännölliset, että ennalta arvaamattomat. Tämän jälkeen suunnittelun keinoin pyritään ne ensisijaisesti poistamaan. Osa poikkeustilanteista kuuluu osaksi valmistusprosessia, vaikka eivät ole perusprosessityökierroja, ei niitä voida välttämättä poistaa. Jos poistoa ei voida tehdä, pyritään niiden esiintymistä harventamaan. Harventamisen jälkeen pyritään niiden vaikutusta vielä minimoimaan.

Edellä mainittujen toimien jälkeen prosessiin jää edelleen tunnistettuja poikkeustilanteita. Niiden suunnittelu voidaan mukauttaa kuviossa 24 esitettyyn prosessiin ja suunnittelun tuloksena

määritellä robottijärjestelmään kyky toimintakunnossa pysymiseen kyseessä olevassa poikkeustilanteessa.



KUVIO 24. Resilienssin rakentamisen periaate, älykäs käyttäytymismalli

Hyvä resilienssi vaatii järjestelmältä hyvää tilannetietoisuutta. Tällä tietoisuudella voidaan suoraan ohjata järjestelmää käyttäytymään ennakoivasti ja/tai sillä voidaan kutsua apua ongelman selvittämiseen jo sen lähestymisen aikana. Pelkkä tilannetietoisuus ei vielä paranna tilannetta, vaan tilannetietoisuudesta johdetut oikeat toimenpiteet.

6.4.1 Lähestyvän poikkeustilanteen tiedostaminen

Ennakoinnin perusedellytys on tilannetietoisuus ja tämän edellytys on kattava anturointi. Yleisesti ottaen nykyisellä tekniikan tasolla ennakointi on yksinkertaista ja suoraviivaista, sisäänrakennettuja loogisia ehtoja anturitietoihin perustuen. Myös erilaisia testauksia voi ohjelman työkierrossa olla tilanteiden ennakoimiseksi esimerkiksi tietyn tapahtuman kestoajan muutos voi ennakoida muutosta toimintavarmuudessa. Anturoinnin ja erilaisten kestoajojen mittauksien perusteella voidaan tiedostaa poikkeustilanteet, jotka ovat lähestymässä. Vaatimusmäärittelyssä pitäisi myös huomioida riittävän aikainen ennakointi lähestyvälle poikkeustilanteelle. Tällainen voisi olla yksinkertaisimmillaan materiaalin loppumisen ennakointi. Ennakointi pitäisi tapahtua niin aikaisin,

että käyttäjät ehtivät reagoida ja estää toiminnallaan materiaalin loppumisen. Poikkeustilanteen ennakointina voi olla myös tieto syntyvästä tuotoksesta, ettei se ole vaatimustenmukainen.

Joissain tilanteissa tekoälyn koneoppiminen voisi olla poikkeustilanteiden ennakointiin erityisen tehokas. Järjestelmässä on paljon antureita ja myös aikariippuvia tapahtumia. Aikariippuvat tapahtumat voivat olla kalenteriaikasisäisiä tai järjestelmän sisäisiä kestoajoja. Monitoroinnin piirissä voisi olla myös ulkoisia tekijöitä, kuten raaka-aine, -erä, paineilman taso, ilman kosteus, valon määrä, vuodenaika tms. Monitorointijärjestelmä kykenisi ilmaisemaan vaikkapa säännöllisesti puhki kuluvan letkun todennäköisen vikaantumisasjankohdan.

6.4.2 Poikkeustilanteen välttäminen

Välttämiseen voidaan pyrkiä kahdella eri tavalla, suunnittelulla välttämiseen ja toimintatavoilla välttämiseen. Suunnittelun avulla voidaan tunnistaa järjestelmässä olevia poikkeustilanteita ja tunnistamisen jälkeen mahdollisesti poistaa, harventaa ja/tai siirtää niitä järjestelmän ulkopuolelle. Tällaisia voisi olla esimerkiksi erilaisten materiaalien lisääminen järjestelmän ulkopuolella, josta materiaalit kulkeutuvat järjestelmän sisälle. Tai työvaiheita kuten tarroittaminen, joka voidaan tehdä järjestelmän ulkopuolella sen sijaan, että ne olisivat sisäpuolella aiheuttamassa poikkeustilanteita.

Jos suunnittelulla ei ole syntyviä poikkeustilanteita voitu poistaa tai siirtää, niiden kanssa on tultava toimeen mahdollisimman hyvin. Tämä on toiminnallista välttämistä. Kun järjestelmä on tietoinen lähestyvistä poikkeustilanteista, pyritään se siis välttämään kaikin keinoin ennakkoon. Yleinen tapa on avun kutsuminen. Avun kutsuminen pitäisi tapahtua riittävän ajoissa ja riittävän selvästi, että apu olisi paikalla ennen poikkeustilanteen toteutumista. Avun tarve on usein materiaalihuoltoon tai kunnossapitoon liittyvää.

Poikkeustilanteen välttäminen perustuu tilannetietoisuuteen. Tilannetietoisuutta ei kannata rakentaa säästösyistä epäsuoraan vaan suoraan tietoon. Epäsuora tieto voi olla vaikkapa päättely resetoinnin jälkeisestä tilanteesta työkappaleiden sijainneista ja niiden asennoista. Päättely antaa mahdollisuuden virheille varsinkin sellaisissa tilanteissa, että siihen liittyy solussa käynti käyttäjien, kunnossapidon, puhtaanapidon tai kenen tahansa toimesta. Kappaleita ei enää olekaan välttämättä siellä missä päättelyperustaisesti pitäisi olla tai niitä voi olla siellä missä niitä ei pitäisi. Tällaisessa tilanteessa, jossa kappaleet eivät enää olekaan niin, kuin niiden pitäisi olla, on

poikkeustilanteen tekijät jo olemassa. Suoralla anturoinnilla järjestelmä voi toimia tarkoituksen mukaisella tavalla muuntuneeseen tilanteeseen, jossa työkappaleet ovat eri asetelmassa. Tilanne ei suora-anturointijärjestelmän näkökulmasta välttämättä edes ole poikkeustilanne tai ei muodostu sellaiseksi. On myös mahdollista, että kappaleiden sijainnit ovat epäloogisesti niin, ettei oikeanlaisen toiminnan edellytyksiä ole, voi järjestelmä suoralla tiedolla estää käynnistymisen ja välttää näin pahemman tilanteen.

6.4.3 Poikkeustilanteen läsnäolon tiedostaminen

Poikkeustilanteen läsnäolon tiedostaminenkin perustuu hyvään tilannetietoisuuteen ja tämä anturointiin ja/tai tapahtumien keston mittaamiseen. Poikkeustilanteen lähestyminen on voinut olla ennakkoon tiedossa, mutta tilanteen ollessa läsnä, se tiedostetaan. Poikkeustilanteen tiedostaminen on edellytys rakentaa resilienssin seuraavaa porrasta eli tuotantokyvyn säilyttämistä poikkeustilanteissa. Poikkeustilanteena voidaan pitää myös ei-vaatimustenmukaisien tuotoksien syntyminen silloin, jos tuotoksen ei-vaatimustenmukaisuus tiedostetaan ja sen perusteella järjestelmä käyttäytyy normaali työkierrosta poikkeavalla tavalla.

Poikkeustilanteen läsnäolon tiedostamisella voidaan välttää järjestelmän ajautuminen pahempaan tilanteeseen. Jos järjestelmällä ei olisi kykyä selviytyä tiedostetusta poikkeustilanteesta, voidaan prosessi kuitenkin pysäyttää ja ennalta ehkäistä isommat ongelmat. On myös mahdollista, ettei järjestelmä tunnista poikkeustilannetta. Tämän seurauksena robotti voisi pyrkiä asettamaan kappaleita, jo olemassa olevien kappaleiden sijalle. Törmäyksen seurauksena robotin servomootoreiden virta- ja valvonta pysäyttäisi prosessin. Tässä huomion arvoisena asiana on se, että *robotin* tilannetietoisuus pysäyttää prosessin, vaikka se kuuluisi *robottijärjestelmän* tehtäväksi.

6.4.4 Tuotantokyvyn säilyttäminen

Kun poikkeustilanne on tiedostettu, täytyy järjestelmään olla suunniteltuna sellaiset ominaisuudet, joilla poikkeustilanteesta huolimatta voidaan toimia normaalisti tai mahdollisimman normaalisti. Järjestelmässä täytyy olla rakenteelliset valmiudet halutun poikkeustilanteen hallintaan, sekä kyky ohjelmallisesti mukautumaan tilanteeseen. Tätä kutsutaan myös vikasietoisuudeksi. (24 kohta G5.) Näistä on kerrottu enemmän kohdassa rakenteelliset ratkaisut. Esimerkkinä voisi olla ei-

vaatimustenmukaisen tuotoksen syntyminen ja sen käsittely itsenäisesti, niin että tuotantokyky säilyisi.

6.4.5 Toimintavalmiuden säilyttäminen

Jos poikkeustilanteessa ei ole voitu säilyttää tuotantokykyä tai sitä ei ole voitu säilyttää riittävän pitkään, joudutaan prosessi pysäyttämään. Tällainen tilanne on keskeytys. Pysäyttäminen ei kuitenkaan aina tarkoita sitä, että järjestelmä pitäisi ajaa alas, vaan usein voidaan jäädä odottamaan toimintavalmiina tilanteen korjautumista. Tällaisia voisi olla esimerkiksi tulevan materiaalin tilapäinen loppuminen. Järjestelmällä pitäisi olla kyky jatkaa juuri siitä tilanteesta, johon se keskeytyksen tullessa on jäänyt. Ilman, että sitä tarvitsee tyhjentää, käynnistää tai resetoita. Esimerkiksi materiaalin tilapäisen loppumisen tai vastaavan tilanteen vuoksi, ei kannata pysäyttää järjestelmää häiriötilaan, ettei sitä tarvitse erikseen käynnistää käyttäjän toimesta. Kuviossa 19 tilanne on havainnollisesti esitetty.

6.4.6 Nopea toipuminen

Pahin poikkeustilanne on sellainen, että järjestelmä on kokonaan lakannut toimimasta ja on myös menettänyt toimintavalmiuden. Järjestelmä on häiriössä. Näissä tilanteissa ei järjestelmä kykene itse hoitamaan poikkeustilannetta ja niinpä toipuminen on ulkoisen avun varassa. Nopeaan toipumiseen liittyy esimerkiksi kattava, lähellä sijaitseva varaosavarasto sekä riittävä ja ammattitaitoinen käyttö- ja kunnossapitohenkilöstö. Robottijärjestelmän kannalta nopeaan toipumiseen voidaan vaikuttaa sen käyttäytymisellä samoin kuin toimintavalmiuden säilyttämisessä. Tässä tilanteessa, vaikka robottijärjestelmän sisällä pitäisi käydä tekemässä pikaisia huolto tai korjaustöitä, tiedostetaan työkappaleiden sijainnit ja määrät, vaikka niihin olisi tullut sisällä käynnin yhteydessä muutoksia.

6.5 Rakenteelliset ratkaisut

Rakenteellisilla ratkaisuilla pyritään kahteen tarkoitukseen; robustisuuteen ja rakenteellisiin edellytyksiin vikasietoisien tilojen toteuttamiseksi. Rakenteiden robustisuudella saadaan järjestelmän kestoa ja tarkkuutta pääsääntöisesti paremmaksi. Näiden hallinta kuuluu hyvään tekniseen suunnitteluun.

Vikasietoinen tilanne voi olla aikarajallinen tai rajaton. Jos poikkeustilanteessa joudutaan esimerkiksi turvautumaan puskurointiin alavirran toimintakyvyn palauttamisen ajaksi, on vikasietoinen tila aikarajallinen, puskuri täyttyy ennen pitkää. Molemmilla vikasietoisilla tiloilla pyritään välitön vikakorjaaminen muuttamaan siirretyksi vikakorjaamiseksi. Aikarajallisella vikasietoisuudella siirretty vikakorjaaminen on toteuduttava puskurin täyttymisen aikana tai järjestelmä pysähtyy sen täytyttyä.

Jos kyseessä on yksittäisen toimilaitteen vaurioituminen varalle rakennettu vaihtoehtoinen toiminto, kyseessä on aikarajaton vikasietotila. Tämä voidaan toteuttaa rinnakkaistoiminnon lisäämisellä. Vioittunut toimilaitte voidaan korjata tuotantoa keskeyttämättä seuraavan työnvaihdon, huollon yhteydessä tai seuraavan kerran käyttäjän tullessa paikalle. Vikasietoisella ominaisuudella voi olla suuri vaikutus resilienssiin. Toistuvasta järjestelmän pysäyttävästä poikkeustilanteesta palauttaminen tuotantoon voi olla hyvinkin nopeaa sen jälkeen, kun apu on saatu paikalle, mutta avun paikalle saanti voi kestää hyvinkin pitkään. Näin pienestä, nopeasti korjattavissa olevasta poikkeustilanteesta voisi tulla iso tuotantomenetys. Siirretyllä vikakorjauksella voidaan avun paikalle saannin odottelu, sekä tuotantokelpoisuuden palauttamiseen käytetty aika, käyttää tuottavaan työhön.

6.6 Kunto

Robottijärjestelmän hyvään kuntoon voidaan ajatella kuuluvan sekä fyysiset että ohjelmatekniset tekijät. Järjestelmän kuntoa ajatellen, voidaan sitä peilata kumpaan tekijään tahansa, samat yleistyksen pätevät molempiin.

Kunnolla ja suunnitelmissa on yhteistä. Jos suunnitelmat ovat oikein tehdyt ja mitoitettut, ja jos toteutus vastaa suunnitelmia, niin järjestelmän kunto pitäisi olla hyvä. Huono kunto kertoo joko todellisuuden epäsuhdasta suunnitelmien kanssa tai siitä, että suunnitelmat ovat huonot. Järjestelmän kunto muuntuu ajan saatossa luonnostaan heikompaan suuntaan kulumisen ja vaurioiden myötä. Samalla kunnossapito tai ylläpito pyrkii pitämään järjestelmää alkuperäisellä tasolla tai jopa kehittämään sitä.

On ensiarvoisen tärkeää, että suunnittelu on hyvä laatuista ja toteutus vastaa suunnitelmia. Silloin käyttöönotossa ammekäyrän alku alkaa matalammalta, eikä ole tarvetta uudelleen suunnittelulle ja kehityskierroksille. Tähän voidaan vaikuttaa toimittajavalinnalla, riskien hallinnalla, vaatimusmäärittelyllä, katselmuksilla ja käyttöönoton yhteydessä erilaisilla varmentamisilla.

Toimitus- ja käyttöönottovaiheen jälkeen kunnossapidon rooli kasvaa. Lähtötaso järjestelmän kunnolle on määräytynyt projektin aikaisilla ratkaisuilla. Robottijärjestelmän käyttöönoton jälkeen kunnan ylläpitovastuu siirtyy yleensä toimittajalta tilaajalle ja edelleen tilaajan kunnossapitoprosessille.

7 VAATIMUSMÄÄRITTELY

Vaatimusmäärittely on dokumentaatio, jolla määritellään robottijärjestelmän tekniset ominaisuudet. Jossain tilanteissa voidaan vaatimusmäärittelyä ajatella väljemmin sisällyttäen siihen myös toimitusta koskevia vaatimuksia. Huolellisesti laadittu vaatimusmäärittely on hyvä työkalu tarjouspyyntövaiheessa, jolloin eri toimittajakandidaattien tarjoukset ovat yleensä helpommin vertailtavissa.

Yrityksissä, joissa on vähän kokemusta teollisuusrobottijärjestelmän määrittelyistä, on tarpeen tehdä määrittelyä yhdessä toimittajan kanssa. Toimittajien kanssa keskustellessa saa paremman käsityksen yksittäisten riskienhallintatoimien kustannuksista tai vaihtoehtoisista toteutustavoista. Olipa vaatimusmäärittely tehty enemmän omatoimisesti tai yhteistyössä toimittajan kanssa, se on dokumentti, joka määrittelee koko järjestelmän ja usein myös toimitusta.

Vaatimusmäärittelyn jokainen vaatimus voidaan jakaa omaan ryhmäänsä sen perusteella millainen vaatimuksen tyyppi. Jako voidaan tehdä kolmeen päätyyppiin; konkretiaa, toiminnallisuutta ja suorituskykyä määritteleviin tyypeihin. Jakaminen mahdollistaa järjestelmällisemmän tavan vastaanottovaiheessa tehdä hyväksyntätarkastus. Näistä jokainen voidaan halutessa jakaa vielä kriittisyysluokkaan, esimerkiksi sen suhteen millainen vaikutus näillä on tuotelaatuun. Kriittisyysluokitus kannattaa tehdä siitä syystä, jos vastaanottovaiheessa ilmenee toteutuksissa poikkeamia suhteessa vaatimusmäärittelyyn, voidaan poikkeamille valita erilaiset poikkeamankäsittelyprotokollat. Jos tuotelaatuun vaikuttavat poikkeamat käsitellään laatuorganisaatiossa, ei ole tarpeen jokaista poikkeamaa, joilla ei ole tuotelaadun kanssa mitään tekemistä, toimittaa laatuorganisaation käsiteltäväksi. Ei-tuotelaatuun vaikuttavat vaatimukset voidaan luokitella kaupallisiksi vaatimuksiksi, jolloin niiden käsittely voidaan toteuttaa projektihallinnan puitteissa. Vaatimusten ryhmittely voidaan tehdä myöhemminkin, vaikka hankintasopimuksen allekirjoittamisen jälkeen. Ryhmittely on lähinnä tilaajan työkalu, mutta sen olemassaolosta voi toimittajallekin olla hyötyä. Laatu-kriittisissä järjestelmissä ainakin laatu-kriittisyysluokitukseen on syytä olla yhteinen näkemys laadusta vastaavan tahon kanssa ja tästä näkemyksestä on tarpeen luoda tallenne.

Vaatimusmäärittelydokumentti on hyvä ylläpitää koko järjestelmän elinkaaren ajan, samoin kuin riskienhallinta dokumentaatiotakin. Dokumentti on elävä ja siksi versionhallinnanalainen.

Hankintasopimuksessa viitataan vaatimusmäärittelyn tiettyyn versionumeroon, jonka mukaan järjestelmä toteutetaan ja versiointi jäätyy toimitukseen saakka.

Runko tai muistilista vaatimusmäärittelyyn voisi olla;

- toimitukseen liittyvät vaatimukset
 - o tilan käyttö
 - o olemassa olevat laitteistot ja niiden liittämiset
 - o toimitussisältö
 - oikeus immateriaalisiin tuotoksiin
 - o kuljettamisvastuut
 - o asennusvastuut
 - o kuljettamisen ja asentamisen mahdolliset rajoitteet
 - o luovutusvalmiuden kriteerit
 - o koulutus
 - o varaosat
 - o varaosien saatavuus
 - o toimituksen laatuvaatimukset
 - o katselmukset
 - hyväksyntäkriteerit
 - o dokumentaatio
 - suunnitelmat
 - huolto- ja käyttöohjeet
 - testauspöytäkirjat
 - sertifikaatit
- järjestelmään liittyvät vaatimukset
 - o rakenne
 - ohjaus- ja sähkökaappien sijoittelu
 - seinät, ovet
 - o turvallisuus
 - o valaistus, meluraja
 - o toimintaympäristön vaatimukset
 - o tiettyjen robotti- tai komponenttimerkkien käyttäminen
 - o rajapinnat muihin laitteisiin
 - o tulevien materiaalien määrittely

- materiaalin tulo ja lähtösuunnat suhteessa robottijärjestelmään ja tuotantotilaan
- materiaalin tulo- ja lähtöasennot ja -asetelmat
- tulevien ja lähtevien materiaalien puskurointikoot
- tulevien materiaalien lisääminen
- lähtevien materiaalien poistaminen
- IT
 - käyttäjäryhmät, käyttäjät ja niiden oikeudet
 - ulkoiset yhteydet ja oikeudet
 - rajapinnat ja protokollat tietojärjestelmiin
 - logitiedot
 - versionhallinta
 - varmuuskopiointi
 - tuotantotallenteet
 - järjestelmän raportointi
- käytettävyys
 - käyttöliitymät HMI ja GUI
 - huollettavuus, puhdistettavuus
 - kulkuväylät
 - puhtaanapito
- yleiset toiminnalliset ominaisuudet
 - prosessin ja/tai laadunvalvonnan monitorointi
 - häiriöstä toipumiset
 - parametrien muutosmahdollisuudet
 - käyttäjien informointi, varoitukset, hälytykset
 - näytteiden antaminen
 - siivous- ja huoltoasennot roboteilla
 - resetoinnin määrittäminen
- tuotekohtaiset toiminnalliset ominaisuudet
 - prosessikuvaukset
 - suorituskykyvaatimukset
 - hetkellinen tehokkuus
 - mahdolliset käsittelyrajoitteet tai ohjeet materiaaleille
- prosessin laadunhallinta

- tulevan materiaalin laadun määrittäminen
- tulevan materiaalin laadun varmistaminen ja poikkeamien käsittely
- tuotoksien laadun määrittäminen
- laadun varmistaminen ja laatupoikkeavien kappaleiden käsittely
- olosuhdevalvonta

Vaatimusmäärittelyn ja hankintasopimuksen ero

Hankintasopimuksessa määritellään kaupalliset asiat ja vaatimusmäärittelyssä määritellään järjestelmän tekniset asiat. Joidenkin asioiden osalta ei välttämättä voida sanoa kumpaan dokumenttiin ne varsinaisesti kuuluvat. Erityisesti silloin, jos vaatimusmäärittelyssä määritellään osittain myös toimitusta, ei pelkästään järjestelmän teknisiä ominaisuuksia. Tällaisia voisi olla jotkin asennukseen, ylläpitoon, varaosiin ja kelpuutuksiin liittyvät vaatimukset. (37 s.36.)(38 kohta 2.0.)

Hankintasopimuksessa on oltava toteamus, jossa järjestelmän toimittaja sitoutuu *vaatimusmäärittelyn* mukaisen järjestelmän toimitukseen, sisältäen dokumentin versionumeron. On olemassa riski, että hankintasopimuksessa hankitaan toimittajan tarjouksen mukainen järjestelmä, mutta tarjouksessa ei ole sitoutumista vaatimusmäärittelyyn. Tällöin toimitus voi olla mitä vain ja vaatimusmäärittelydokumentilla ei ole mitään arvoa.

8 RISKIENHALLINTA ROBOTTIJÄRJESTELMÄN HANKINNASSA

”Riskejä pyritään yleensä hallitsemaan tervettä järkeä, tietoa, kokemusta ja vaistoa apuna käyttäen. Näin toimien saattaa kuitenkin tärkeitä osa-alueita jäädä vaille huomiota (25).”

Riskienhallinta on riskien tunnistamista, niiden välttämistä, siirtämistä, vaikutusten minimoimista, ja/tai sietämistä. Riskienhallintaa yleensä voidaan soveltaa järjestelmän käyttöturvallisuuteen, tuotelaadun varmistamiseen, yritysriskeihin, projektiriskeihin tai mihin tahansa riskeihin.

Robottijärjestelmä tulee riskienarvioitavaksi vähintäänkin työturvallisuuslain kautta. (26.)(27.) Järjestelmän käyttöturvallisuus on osaltaan vaikuttamassa myös järjestelmän saantoon, mutta työturvallisuuteen liittyvät riskienhallintamenettelyt jätetään tässä tarkastelun ulkopuolelle. Lähtökohtana on, että järjestelmän turvallistamisvastuu kuuluu robottijärjestelmän toimittajalle. Näin tuleekin sopia toimituksen yhteydessä silloin, jos tilaajalla ei ole kykyä hallita koneturvallisuuslainsäädäntöä (26, 10§). (28 s.91..113.)

Riskit ovat ei-toivottuja mahdollisia tapahtumia. Kaikki tapahtumat ovat aina vain osa pidempää tapahtumaketjua. Mitään ei tapahdu ilman edellistä tapahtumaa, eikä ei-toivottu tapahtuma toteutuessaan pääätä tapahtumaketjua. Ei-toivottu tapahtuma on luonnollisesti harvinainen, poikkeustilanne, joka tapahtuessaan avaa mahdollisuuden uusille ei-toivotuille tapahtumille. Usein riskien arviointi tai tunnistus päättyy käytännössä poikkeustilanteeseen, huipputapahtumaan. (29.) (7.)

Tuotantoprosessin luotettavuutta arvioidaan yrityksen näkökulmasta tuotantoerien saantojen toteutumisenä. Riskienhallinnan kautta tunnistetaan ja arvioidaan ne tekijät, jotka robottijärjestelmässä vaikuttavat osaltaan koko tuotantoprosessin saannon toteutumiseen. Asiaa lähestytään tässä yhteydessä pelkästään robottijärjestelmän kautta ja huomioidaan siihen vaikuttavat myös ulkoiset tekijät. Sellaisia robottijärjestelmän ulkoisia tekijöitä ei huomioida, jotka ovat osa tuotantoprosessia, mutta joihin robottijärjestelmän ominaisuuksilla ei ole juurikaan vaikutusta. Tällaisia ovat esimerkiksi logistiikka ja tuotannon suunnittelu.

Riskienhallinta on myös osa järjestelmätoimittajan työtä, vaikkakaan ei ehkä niin muodollista. Tilaaja voi määritellä yksittäiselle toiminnolle, vaikka konenäköjärjestelmän kyvyille luotettavuuden tason. Toimittaja joutuu omassa suunnitteluvaiheessa arvioimaan, mitkä tekijät vaikuttavat sen saavuttamiseen, ja mitkä aiheuttavat riskiä sen epäonnistumiseen.

Robottijärjestelmä voidaan tilata hyvinkin vähäisillä vaatimuksilla, kuten tehokkuus tai saantovaatimuksilla. Silloin riskienhallinta jää käytännössä järjestelmän toimittajalle, kuinka tavoitteisiin voidaan päästä. On siis makuasia, millä tasolla vaatimusmäärittely tehdään. Kyse on oikeastaan siitä, missä suhteessa riskienhallinnan työ jaetaan tilaajan ja toimittajan välillä.

Riskienhallintadokumentaatio yhdessä prosessikuvauksen ja vaatimusmäärittelyn kanssa on syytä ylläpitää koko järjestelmän elinkaaren ajan, ja näin ollen pitää ne myös versionhallinnan alaisina.

Riskianalyysimenetelmän valintaan voidaan käyttää apuna standardoituja malleja SFS-IEC 60300-3-9. (30 Luku 9.)

Riskienhallinnan eri vaiheet robottijärjestelmän suunnittelussa ja toteutuksessa ovat:

- luotettavuusvaatimuksien selvittäminen, joiden toteutumisen varmistamiseksi riskienhallintaa tehdään
- prosessin kuvaaminen
- poikkeustilanteiden tunnistaminen
- riskien tunnistaminen
- riskien arviointi
- riittävien hallintatoimien suunnittelu
- hallintatoimien vaikutusten arviointi
- hallintatoimista päättäminen
- hallintatoimien lisäys vaatimusmäärittelyyn
- suunnittelun arviointi
- toteutuksen todentaminen

8.1 Luotettavuusvaatimusten selvittäminen

Kun robottijärjestelmän hankintaa ryhdytään toteuttamaan, on yleensä yrityksen lähtövaatimuksina vähintään saantovaatimus ja tilankäytön raja. Muita vaatimuksia on yleensä sidosryhmillä kuten tuotannolla, laadulla, kunnossapidolla ja logistiikalla. (28 s.80.)

Mahdollisia ovat myös erilaiset regulatiiviset tai viranomaisvaatimukset erityisesti elintarvike, lääkelaitte ja –aine valmistuksessa. Näissä prosessin luotettavuus korostuu erityisesti, mutta tuotteen laadullisessa näkökulmassa. Robottijärjestelmän toiminnallinen luotettavuus, on myös vahvasti sidonnainen tuotelaadun toteutumiseen, mutta tässä yhteydessä sitä ei käsitellä tarkemmin.

8.2 Robottijärjestelmän prosessinkuvaus

Robottijärjestelmän prosessin systemaattiseksi läpikäymiseksi täytyy tuotantoprosessi kuvata jonkinlaisella prosessikaaviolla. Prosessivaiheet yksilöidään numeroimalla ja/tai nimeämällä, jolloin yksittäiset riskit voidaan yhdistää sekä riskienhallinnasta ja prosessikaaviosta. Jos halutaan tarkastella työkiertot myös yksittäisen robotin tasolla, voidaan siihen lisätä säännölliset poikkeustilanteet. Prosessikuvaus on iteroituva dokumentti ja sitä olisi syytä ylläpitää koko järjestelmän elinkaaren ajan.

8.3 Riskien tunnistaminen

Tunnistamiseen tulisi ottaa laajahko osallistujakirjo useilta toimialueilta; operaattorit, kunnossapito, työnjohto, tuotannonkehitys, jotta riittävän laaja näkemys asiasta saataisiin esille (30 kohta 5.1.1). Riskien tunnistuksessa nousee esille usein sellaisia riskejä, jotka ilman järjestelmällistä läpikäyntiä olisivat jääneet huomiotta. Tunnistamisessa tulisi käydä läpi itse robottijärjestelmä, sen rajapinnat ja ympäröivät ulkoiset tekijät, jotka kaikki yhdessä muodostavat tuotantoprosessin. Ulkoisista tekijöistä huomioidaan vain sellaiset, joihin robottijärjestelmän ominaisuuksilla voidaan vaikuttaa. (30 kohta 5.2.)

Robottijärjestelmän riskien tunnistamisen lähteitä ovat mm.:

- hankintaprojektin aikaiset valinnat

- prosessin kuvaus
- poikkeustilanteet
- sisäiset tekijät
- ulkoiset tekijät
- rajapintatekijät
- lessons learned
- benchmarking

8.3.1 Hankintaprojektin vaikutukset luotettavuuteen

Hankintaprojektilla ja sen aikaisilla ratkaisuilla on iso merkitys lopullisen toteutuksen luotettavuuteen. Nämä ovat syytä tunnistaa osana riskienhallinnan tunnistusvaihetta. Vaikutukset ovat merkityksellisimpiä elinkaaren alussa, jossa keskeytykset ja muut ongelmat ovat yleisempiä. Tähän elinkaaren alun ammekäyrän muotoon, voidaan vaikuttaa erilaisilla projektin aikaisilla ratkaisuilla.

Valittuun toimittajaan voi liittyä toimituksen jälkeisiä ylläpidollisia epävarmuustekijöitä: Riittääkö huoltohenkilöstö, mikä on vikatilanteiden vasteaika, millainen varaosavarasto toimittajalla on, tarvitaanko huoltosopimusta jne. Jos tilaavalla yrityksellä ei ole vahvaa automaatio-osaamista ja ollaan hankkimassa kompleksista järjestelmää, on hyvä myös arvioida toimittajan kykyä palvella koko järjestelmän oletetun elinkaaren ajan.

Huoltosopimukset ovat tärkeitä tehdä jo hankintavaiheessa. Lisäksi on hyvä varmistaa, että järjestelmän toteutukseen on käytetty yleisiä tuotemerkkejä, koodaukset ovat avoimia ja kommentoituja. Näillä varmistetaan, että myöhemmin pitkän elinkaaren aikana on jotain mahdollisuuksia myös ulkopuolisilla päästä käsiksi järjestelmään, kuin pelkästään alkuperäisellä toimittajalla. Harvinaisia tuotemerkkejä käytettäessä voi varaosien saanti hankaloitua myöhemmässä elinkaaren vaiheessa. Tilaajan varaosavaraostoa ajatellen, vaikkapa paineilmakomponenttien osalta, on hyvä suosia jotain tiettyä merkkiä. Tällöin todennäköisyys kasvaa, että varaosatarpeeseen löytyy komponentti omasta varastosta.

Voi olla tilanteita, että toimittaja on väärän kokoinen, joko liian pieni tai liian suuri. Liian suurella toimittajalla voi olla ylläpidon aikana intressit suuremmissa asiakkaissa ja palvelun laatu voi kärsiä. Yleensä suuremmissa toimittajassa voi olla kuitenkin enemmän hyötyjä kuin riskejä. Liian pieneen toimittajaan liittyy luonnollisesti enemmän epävarmuustekijöitä kuin suureen mm. osaamisen, tuen, järjestelmällisen toimintatavan ja pysyvyyden suhteen.

8.3.2 Robottijärjestelmän prosessinkuvaus

Robottijärjestelmän prosessikuvausta voidaan käyttää riskien tunnistamisen apuvälineenä. Tämä prosessinkuvaus on jo muodostettu riskienhallintaprosessin yhtenä vaiheena. Tässä se toimii ainoastaan tunnistuksen lähteenä ja sillä voidaan varmentaa, että jokainen vaihe käydään systemaattisesti läpi. Kuvaus voi elää suunnitteluprosessin edetessä (31).

8.3.3 Poikkeustilanteet

Poikkeustilanteet ovat tilanteita, jotka poikkeavat normaalista perusprosessista. Poikkeustilanteilla ei pelkästään ymmärretä keskeytyksiä tai häiriöitä, vaan ne voivat olla mitä tahansa perusprosessista poikkeavia tilanteita, kuten näytteenantaminen, huolto, materiaalin loppuminen tai sen täydentäminen tms.

Laadun ja luotettavuustekniikan yksi keskeisimpiä tavoitteita on vaihtelun vähentäminen (32 s.172). Poikkeustilanteet, jotka jo nimensä mukaisesti kertovat vaihtelusta, ovat ei-toivottuja tapahtumia. Usein poikkeustilanteet aiheuttavat uusia poikkeustilanteita tai edesauttavat niiden syntymistä. Poikkeustilanteet tulisi poistaa tai harventaa riskien hallintakeinoin, mutta jäljelle jäävien kanssa pitäisi pystyä toimimaan mahdollisimman hyvin. Tulisi pyrkiä säilyttämään tuotanto- tai toimintakyky poikkeustilanteesta huolimatta.

Poikkeustilanteista helpointa on tunnistaa ulkoiset ja rajapinnoissa olevat poikkeavat tilanteet niiden rajallisuuden vuoksi. Järjestelmän sisällä muuttujien määrä on suuri, joten se vaatii riskien tunnistamisen osalta enemmän huomiota.

Robottijärjestelmän prosessissa on kahdenlaisia poikkeustilanteita:

- tilanteet, jotka poikkeavat normaalityökierrosta säännöllisesti. Ne aiheuttavat yleensä saannon menetystä ovat *säännöllisiä poikkeustilanteita*. Säännöllisiä poikkeustilanteita ovat mm. tarrarullan loppuminen, hitsauslangan loppuminen ja materiaalin lisääminen. Näitä voi tunnistaa toimilaite- tai robottikohtaisesti.
- tilanteet, jotka ovat ennalta arvaamattomia ja aiheuttavat yleensä saannon menetyksen ovat *satunnaisia poikkeustilanteita*. Tällaisia ovat mm. kappaleen tippuminen tarttujasta, imukuppien tai paineilmaletkujen puhki kulumisen. Nämä johtavat usein keskeytys- tai häiriötilanteisiin. Letkujen puhki kulumisenkin voi olla säännöllistä, mutta se ei ole tuotantoprosessiin kuuluva normaali tapahtuma ja lisäksi epätarkasti ennustettavissa. Tästä syystä se on satunnainen poikkeustilanne.

Poikkeustilanteiden tunnistaminen ennakkoon suunnitteluvaiheessa on yksi keskeisimpiä luotettavuussuunnittelun tekijöitä.

8.3.4 Robottijärjestelmän sisäiset riskitekijät

Sisäisinä riskitekijöinä voidaan nähdä kaikki ne asiat, jotka vaikuttavat vaatimusmäärittelyrajauksen sisäpuolella ja joilla on vaikutus käyttökunnossa pysymiseen, nopeuteen ja laaduntuottoon. Nämä tekijät ovat samoja kuin OEE laskennassa. Näitä ominaisuuksia on tarkasteltava edellytyksien näkökulmasta. Järjestelmä on suunniteltava ja rakennettava siten, että sillä on edellytykset käyttökunnossa pysymiseen, maksimaaliseen nopeuteen ja vaatimustenmukaisien tuotoksien syntymiseen.

Riskejä voidaan jakaa lisäksi käytön aikaisiin ja ei-käytön aikaisiin riskeihin. Ei-käytön aikaisiin kuuluvat sellaiset riskitekijät, joista voi johtua tarpeettoman pitkiä huolto- tai työnvaihdon kestoajoja. Jos suunnitteluvaiheessa ei tunnisteta huoltokohteita, niiden huoltamisen hankaluus voi pidentää ei-käytön aikaisia tuottamattomuusaikoja.

Seuraavassa tarkastellaan tarkemmin käyttökunnossa pysymistä, nopeutta ja laaduntuottoa sisäisien riskitekijöiden näkökulmasta.

Käyttökunnossa pysyminen

Käyttökunnossa pysymiseen liittyy kaksi eri tekijää. Käynnissä ollessa järjestelmän pysyminen käyntitilassa ja käyttämättömänä ollessa järjestelmän kykyä olla käytettävissä sitä tarvittaessa. Käytön toteuttaa yleensä ulkoiset tekijät eli operaattorit, mutta käytön edellytykset ja käynnissä pysyminen ovat järjestelmän sisäisiä ominaisuuksia, joihin voidaan vaikuttaa.

Robotit ovat pitkälle standardoituja, sarjavalmistettavia, pitkän valmistushistorian omaavia kokonaisuuksia. Teollisuusrobotit ovat näistä seikoista johtuen erittäin luotettavia. Kaikki mikä niiden ympärille rakennetaan, lähtökohtaisesti heikentää kokonaisluotettavuutta. Integraattorin puolelta tulevat laiterakenteet eivät välttämättä ole kovin standardoituja tai pitkän valmistushistorian omaavia.

Jos alustavasta robotijärjestelmän hahmotelmasta on olemassa pelkistetty kolmiulotteinen malli ja prosessikuvaus, voi näiden avulla paremmin hahmottaa millaiset fyysiset laitteet ja komponentit voivat olla vaikuttamassa käyttökunnossa pysymiseen.

Suunnitteluvaiheessa voidaan tunnistaa riski tarttujan rikkoutumisesta tai tarttujan toimintahäiriöstä. Kun tällainen riski tunnistetaan, voidaan riskin hallintakeinoksi valita automaattinen vaihto rinnakkaistarttujaan. Vaikka automaattista vaihtoa ei olisi, jo varaosatarttujatarpeen tunnistaminen ja sen seurauksena varatarttujan olemassaolo, voi lyhentää järjestelmän toimintakyvyttömyysaika merkittävästi ja siten kasvattaa tuotantoprosessin resilienssiä. Varaosatarttujalla voidaan lyhentää häiriöaika, mutta automaattisella vaihdolla voidaan vikasietoisella toimintatavalla poistaa häiriöaika lähes kokonaan. Jos varaosatarttujan tarvetta ei ylipäätään tunnisteta, eikä sitä näin ollen hankita, voi tarttujan vaurioitumisesta seurata pitkäkin tuotannon menetysaika.

Nopeus

Nopeuden poikkeaminen tavoitearvosta on enemmän systemaattinen kuin satunnaisvirhe, ts. jos suunnitellulla järjestelmällä on päästy haluttuun nopeuteen, niin harvemmin on syitä, jotka pakottaisivat nopeutta pudottamaan hetkellisesti. Tällaisia voisivat kuitenkin olla tilanteet, jossa nopeuden kustannuksella haetaan tarkkuutta ja hyväksytään menetetty nopeustavoite.

Monirobottijärjestelmässä robottien työkiertokohtainen käyttöaste määrittelee myös nopeuden vaikutuksen saantoon. Jos robotilla ei ole odotusaikoja työkierrossa ollenkaan, sen nopeuden lasku vaikuttaa suoraan saantoon. Roboteilla, joiden työkiertokohtainen käyttöaste on matala, voidaan nopeuden laskua yleensä tehdä sen kuitenkaan vaikuttamatta saantoon.

Nopeuteen vaikuttavia tekijöitä:

- liiketarkkuusvaatimus
- koreografian sulavuus, liikeradat, välipisteiden määrä
- tarkkuuden parantaminen nopeuden kustannuksella
- liikkeiden monimutkaisuus, singulariteetin välttäminen
- robotin kokoluokka
- robotin maksimiulottuvuudella työskentely
- robotin tarttujan inertian hallinta
- nopeuden kriittiseksi mitoitus tai tavoitenopeuden alimitoitus
- poiminnan, kiinnipidon tms. varmuuden parantaminen nopeuden kustannuksella

Jos nopeusvaatimuksen toteuttamiseen tehty suunnitelma epäonnistuu, voi sen korjaaminen jälkeenpäin olla kallista. Tästä syystä nopeustekijään liittyy suuri suunnittelun riski, ei niinkään käytön aikainen riski.

Laaduntuotto

Laaduntuottoon vaikuttavat tekijät ovat vahvasti tapauskohtaisia. Yleistyksinä laadunvarmistukseen liittyviä tekijöitä voisi olla esim. laatua varmistetaan konenäöllä, mutta epävarma tai yliherkkä järjestelmä voi hylätä myös hyviä kappaleita. Konenäköjärjestelmän haavoittuvuuteen taas voi vaikuttaa ympäristötekijät valaistus, värinä, kameran kiinnitys jne.

Muita laaduntuottoon vaikuttavia yleistason riskejä voisi olla mm.:

- epätäsmälliset laatukriteerit
- epävarma laadunvarmistus, mittausepävarmuuden huomiotta jättäminen
- epätäsmällisesti määritelty laadunvalvonta
- laadunvalvonnan heikko validointi ja ylläpito
- tuotantotyyppille ominaiset laaduttomuusriskit
- poikkeustilanteet esim. lämmön tms. hallinta

- tulevan materiaalin laatuongelmat

Nämä voivat vaikuttaa myös prosessin nopeuteen tai käytettävyyteen.

8.3.5 Robottijärjestelmän ulkoiset tekijät

Ulkoiset tekijät tulisi olla kunnossa jo robottijärjestelmän käyttöönoton alkuvaiheessa, koska nämä osaltaan rakentavat koko tuotantoprosessin alkuvaiheen luotettavuutta, joka yleensä on muutenkin heikompaa kuin elinkaaren keskivaiheilla. Robottijärjestelmä itsessään vaatii paljon huomiota sen elinkaaren alkuvaiheessa. Jos ulkoiset tekijät ovat käyttöönsaattovaiheessa epäjärjestyksessä, voi käyttöönotosta muodostua varsin ongelmallista.

Ulkoisina tekijöinä voidaan tunnistaa mm.:

- käyttö
 - o vasteajat järjestelmän tarpeisiin
 - o osaaminen
 - o työnvaihtojen kestot
- kunnossapito
 - o varaosavarasto
 - o huolto- ja kunnossapidon osaaminen
 - o kunnossapidon etätuki käyttäjille
 - o kunnossapidon läsnäolo (ilta/yö/vkonloppu)
 - o kunnossapidon vasteajat
 - o toimittajan taustatuki
 - o huoltomäärien oikeellisuus
 - o huoltojen kestoajat
- IT
 - o varmuuskopiointi
 - o versiohallinta
 - o varaosat
 - o tietoturva
 - o tietoliikennesuorat
 - o käyttöoikeuksien hallinta
 - o tietojärjestelmät, ERP, MES, Internet
- materiaalivirrat

- esteettömyys, tulevat ja lähtevät
- keskeytymättömyys
- puskuroinnit, riittävät tilat
- materiaalin laadun vaihtelu
- energian laatu
 - sähkökatkot ja niiden vaikutukset
 - alipaine ja paineilma; taso, vakaus, riittävyys
 - paineilman puhtaus
- ulkoiset laitteet
 - käyntivarmuustasot
 - parametrien säätö
 - määrä
 - korvautuvuus

Nämä ovat yleisiä ulkoisia tekijöitä robottijärjestelmän näkökulmasta katsottuna. Muita ulkoisia tekijöitä voi nousta riskien tunnistusvaiheessa esille, kun huomioidaan suunnittelun kohteena olevat järjestelmän erityistarpeet.

8.3.6 Robottijärjestelmän riskit rajapinnoissa

Rajapintatekijät löytyvät sisäisten ja ulkoisten tekijöiden väliltä. Joskus rajanveto ulkoisen- ja rajapintatekijöiden välillä voi olla häilyvää. Rajapintoihin liittyy yleensä suurimmat yllätyksellisyydet, erityisesti jos määrittelyt jäävät heikolle tai ne jäävät liian itsestään selvinä pidettyjen oletuksien varaan. Rajapintatekijät ovat merkittäviä riskitekijöitä ammekäyrän alkuvaiheessa, mutta merkitys vähenee elinkaareen edetessä. Yleensä rajapinnoissa löytyy vähintään seuraavia riskitekijöitä:

- rajapinta järjestelmän käyttäjiin
 - käyttöliittymät HMI ja GUI
 - merkinantolaitteisto, kutsut
 - parametrien säätö + oheislaitteet
- tietoliikenne
 - ERP / MES
 - Internet
 - ulkoiset koneet

- tulevien raaka-aine ja/tai puolivalmisteiden rajapinta
- valmisteiden poiston rajapinta
- olemassa olevat laitteet
 - o fyysinen rajapinta ja kommunikointi
- energiarajapinnat
 - o sähkö
 - o paineilma
 - o alipaine

8.3.7 Opitut opit, Lessons learned

Tunnistamisen lisäksi on tärkeää käydä läpi edellisten vastaavanlaisien projektien opitut opit (Lessons learned), joista voi nousta sellaista abstraktioita, jotka eivät systemaattisen prosessin läpikäynnin yhteydessä tulisi välttämättä esille.

8.3.8 Benchmarking

Benchmarking eli vertaisarviointi on hyvä työkalu riskien tunnistamiseen. Jos on mahdollista vertaisarvioida samanlaista tai saman tyyppistä ratkaisua, voi näistä nousta esille helposti muuten huomiotta jääviä asioita. Benchmarking ei ole ainoastaan suunnitteluvaiheen riskien tunnistukseen, vaan sitä voidaan tehdä myös elinkaaren eri vaiheissa (33 s.4). Robottijärjestelmän toimittajakandidaatin kanssa voi usein sopia tutustumisia heidän toimittamiin järjestelmiin. Käyttäjäkokemukset ovat tärkeitä ja näistä voi ottaa oppia.

8.4 Riskien arviointi

Riskien tunnistamisvaiheen jälkeen riskit arvioidaan vähintään todennäköisyyden ja vaikuttavuuden perusteella. On mahdollista arvottaa riskit myös havaittavuuden mukaan erityisesti, jos kysymyksessä on laatuun vaikuttavat riskit. Havaittavuuden arvottamisen merkitys korostuu silloin, jos menetyksiä ei havaita välittömästi niiden synnyttyä, vaan vasta myöhemmin. Näennäisesti voidaan saada paljon tuotteita aikaiseksi, mutta jos ne joudutaan laadun tarkastuksen perusteella myöhemmin romuttamaan jää saanto heikoksi.

Tunnistettu riski on muuttuja, jonka merkityksen arvoksi voidaan laskea näiden arviointitekijöiden todennäköisyyden, vaikuttavuuden ja havaittavuuden tulo, RPN luku. RPN luvun laskemisen jälkeen voidaan paremmin ymmärtää riskin merkitystä ja sen vaatimaa huomiota. (7.)

Edellä kuvattu tapa on PFMEA tyyppinen prosessin vika- ja vaikutusanalyysin alkuvaihetta. (7.) Myös muita tapoja on kuten Mitä jos -analyysi tai HAZOP, näihin löytyy formaaleja malleja mm. SFS-EN 61882:2016 standardista. (34.)

8.5 Tunnistettujen riskien hallintatoimien suunnittelu

Tunnistamisen jälkeen voidaan suunnitella erilaisia keinoja, joilla riskiä voidaan pienentää. Hallintakeinoja arvioidessa täytyy myös arvioida niiden kustannusvaikutus. Kaikkia hallintakeinoja ei voida ottaa käyttöön, kun verrataan riskiluokkaa ja kustannuksia. Ei ole tarkoituksenmukaista maksaa epätodennäköisen, vähäisen ongelman aiheuttavan riskin hallintakeinosta kovin paljoa. Hallintakeinoja valittaessa on arvioitava kustannusvaikutus; mitä korkeammalle luotettavuus halutaan ja mitä monimutkaisemmasta järjestelmästä on kysymys, sen enemmän se yleensä tulee maksamaan kts. kuvio 15.

Riskitekijöitä voidaan osittain siirtää. Yleensä riskien siirtämisellä ymmärretään vakuutusyhtiöiden käyttämistä, mutta robottijärjestelmässä se käytännössä voisi merkitä järjestelmän sisällä olevien riskitekijöiden siirtämistä ulkopuolelle. Sisäiset riskitekijät ovat yleensä vaikutuksiltaan merkityksellisempiä kuin ulkoiset tekijät.

Robottijärjestelmään liittyviä riskien hallintakeinoja on yleisellä tasolla mukaellen kuviota 23 s.53 ja kuviota 24:

- **Käyttäytyminen:**
 - keskeytystilanteiden välttäminen
 - tilannetietoisuus
 - ennakointi
 - keskeytyksen juurisyiden poistaminen tai harventaminen
 - vika- tai keskeytyssietoisuus
 - vaihtoehtoisten työkalujen, laitteiden tai reittien käyttö

- puskurien käyttö ylä- ja/tai alavirran häiriö- tai keskeytystilanteisiin
 - järjestelmä ei mene häiriötilaan, jos kyse on keskeytyksestä
- vian tai keskeytyksen keston tai niiden vaikutuksen minimointi
 - avun tarpeen minimointi poikkeustilanteissa
 - ennakkovaroitus käytölle tai kunnossapidolle paikalle saapumisen tarpeesta
- vika- tai keskeytystilanteista toipuminen
 - yksinkertainen ja nopea palautuminen
 - jatkaminen siitä mihin on jäänyt. Jos ei ole tiedossa kaikki kappaleiden paikat, joudutaan pahimmillaan järjestelmä tyhjentämään keskeneräisestä tuotannosta ja resetoimaan. Tämä korostuu, jos keskeneräistä tuotantoa on paljon, kallista tai hitaasti uudelleen täyttyvä
 - automaattinen toipuminen
 - tuotantokyvyn säilyttäminen
 - nopea toipuminen
- **Rakenteelliset ratkaisut**
 - ylimitoitus
 - ulottuvuudet
 - robottien määrä (=> tehtävien alimitoitus)
 - teoreettisen työkierron kesto
 - väsymiskestävyys
 - paineilmaletkut, alipaineletkut ja liikkuvat tiedonsiirtokaapelit
 - kappaleiden käsittely
 - siirtojen ja otteiden määrän minimointi
 - kappaleiden täsmällinen sijainti tarttujassa
 - puskurointimahdollisuus
 - kahdentaminen
 - kahdentamista voidaan kriittisissä paikoissa hyödyntää, niin anturoinnin kuin toimilaitteiden osalta
 - vaihtoehtoreititys

- Kunto

- vastaanottotarkastukset
 - asennus
 - toiminta, tietotekniikka (35 s.74)(36)(24 kohta G5)
 - suorituskyky
- kunnonvalvonta
 - vuodot
 - tapahtumien kestoajat
 - virrankulutuksen muutokset

Edellä kuvatut tekijät edesauttavat rakentamaan järjestelmän resilienssin paremmaksi. Kun resilienssin rakentamisen fyysiset edellytykset ovat olemassa, voidaan ohjelmallisesti tehdä toiminnallisia ominaisuuksia (kuvio 23 s.53):

Vaikka järjestelmään lisätään toiminnallisia ominaisuuksia parantamaan resilienssiä, lisää se ohjelmiston kompleksisuutta ja sitä kautta voi nostaa tilapäisesti elinkaaren alun vikataajuutta.

8.6 Hallintatoimien arviointi ja hallintatoimista päättäminen

Tunnistetut riskit voidaan järjestää suhteessa toisiinsa, kuinka merkityksellisestä tai vähemmän merkityksellisestä riskistä on kysymys. Järjestämisessä voidaan käyttää RPN lukuun tai muuhun luokitteluun perustuvaa järjestämistä.

Pelkästään merkityksellisyysjärjestyksen perusteella ei voida luontevasti tehdä rajausta, mitkä hallintatoimet otetaan käyttöön ja mitä ei. Hallintatoimien valintaan vaikuttaa myös arvio hallintatoimen kustannuksesta. Arviointia voi tehdä riski kerrallaan ja päättää otetaanko hallintatoimet mukaan vai ei. Sen voi tehdä myös systemaattisemmin niin, että pisteyttää kunkin hallintatoimen kustannuksien ja vaikuttavuuden perusteella. Muuttuja hallintakeinon kustannustehokkuudesta on suoraan verrannollinen vaikuttavuuteen ja kääntäen verrannollinen kustannuksiin.

Hallintakeinon vaatimusmäärittelyihin mukaan ottamista voidaan matemaattisesti arvioida siten, että riskin RPN-luku ja kustannustehokkuus ovat suoraan verrannollisia tarpeeseen ottaa

hallintatoimi käyttöön. Arviointitapoja voi olla muunkinlaisia, mutta jonkinlainen arviointi on tarpeen. Ei ole tarkoituksen mukaista aivan kaikille riskeille kirjata hallintakeinoja vaatimusmäärittelyyn.

8.7 Hallintakeinot vaatimusmäärittelyyn

Kun riskien hallintakeinot on valittu, jotka robottijärjestelmään halutaan, täytyy ne kirjata robottijärjestelmän vaatimusmäärittelyyn. Hallintakeinoina voi olla rakenteelliset tai toiminnalliset ominaisuudet. Toiminnallisia ratkaisuja tarvitaan silloin, kun on tunnistettu poikkeustilanne, josta järjestelmä halutaan selviytyvän itsenäisesti. Usein poikkeustilanteista selviämiseksi tarvitaan yhdessä sekä rakenteellisia, että toiminnallisia ominaisuuksia.

8.8 Suunnittelukatselmus, Design Review

Hankintasopimuksen solmimisen jälkeen suunnittelun lähtötietoina ovat vaatimusmäärittelyyn kirjatut vaatimukset. Toimituksesta on hyvä pitää erillinen aloituskokous ns. kickoff, jossa vaatimusmäärittely käydään toimittavan yrityksen suunnittelijoiden ja projektihallinnon kanssa läpi. Tuntematta tuotantoa, johon järjestelmää suunnitellaan, suunnittelijat eivät välttämättä osaa ottaa huomioon kaikkia asioita tai juuri oikealla tavalla. Tämä on tuotantoprosessin niin sanottua hiljaista tietoa, joita suunnittelijoilla ei välttämättä ole tiedossa. Kun hankintaprojekti lähtee näin käyntiin, saadaan suunnitteluvaihe liikkeelle oikeilla lähtötiedoilla. Kun suunnitteluvaihe lähestyy päätösvaihetta ja suunnittelun tuloksia voidaan esitellä ennen komponenttien tilaamista, pidetään suunnittelukatselmus. Suunnittelukatselmus on yksi keskeisimpiä riskienhallinnan välineitä, jossa on molempien osapuolten yhteinen intressi. Tällä katselmuksella voidaan välttää suunnittelun ongelmia, jotka voisivat tulla ilmi vasta koeajotilanteissa tai asennusvaiheessa. Tässä vaiheessa havaittujen ongelmien korjaaminen on verrattain edullista kts. kuvio 14. Kuvion perusteella voidaan sanoa suunnittelukatselmuksen merkityksen korostamiseksi, että suunnittelukatselmukseen käytetty yksi tunti säästää kymmenen ylösajossa, vaikka suhde ei tarkka olekaan. Suunnittelukatselmuksella varmennetaan myös, että molemmilla osapuolilla tilaajalla ja toimittajalla on yhtenevä näkemys toteutuksesta.

Katselmuksessa varmistetaan, että suunnitelma vastaa vaatimusmäärittelyä ja katselmuksessa voidaan tarkentaa sijoittelua tai muita yksityiskohtia. Tässä vaiheessa nähdään yleensä ensimmäistä kertaa fyysinen laite ja mekaaniset ratkaisut virtuaalisesti. Katselmuksessa voi nousta

esiin sellaisia asioita, riskejä ja mahdollisuuksia, mitä ei ole ennen oivallettu. Tämä tilaisuus on mekaniikan ja ohjaustekniikan ratkaisujen osalta riskien tunnistusta, jota ei ole aiemmin voitu tehdä. Luonteeltaan katselmus voi olla varsin epämuodollista yhteistä pohdintaa siitä, saavutetaanko ratkaisuilla vaatimusmäärittelyjen vaatimukset. Katselmus voidaan tehdä myös systemaattisesti erilaisten tarkastuslistojen avulla. Jos arvioinnissa tulisi vahvaa ristiriitaa toteutustavoista tai ratkaisuista, niin toimittajalla on veto-oikeus niin pitkään, kuin hankintasopimus on voimassa ja toimittaja kokee voivansa suunnitelmien perusteella täyttää hankintasopimuksen ja sen liitteenä olevan vaatimusmäärittelyn vaatimukset.

8.9 Toteutuksen todentaminen

Kun toteutus etenee ja lähestyy sitä vaihetta, jolloin se pitäisi toimittaa asiakkaan tiloihin, tarkastetaan yleensä fyysinen toteutus ja toiminnallisuus soveltuvien osien valmistajan tiloissa. Tätä vaihetta kutsutaan tehdashyväksyntävaiheeksi (FAT). Tilaussopimuksessa on hyvä määritellä myös kriteerit FAT vaiheen hyväksynnälle ja toimitusluvalle. Joskus isommilla kokonaisuuksilla on syytä määritellä ennen FAT vaihetta joitain esikatselmoitteja (preFAT), joilla voidaan ennakoita ja osittain nopeuttaa FAT läpimenoa. Käyttöhenkilökunta voi olla mukana jo tässä vaiheessa saamassa alustavaa käyttökoulutusta. (35 s.74.)

Kun järjestelmä on toimitettu tehtaalle, asennettu ja laitettu käyttöön, alkaa arviointi toimituksen hyväksymisestä. Hyväksymistä on voitu aloittaa jo kokoonpanon aikana erilaisten fyysisten vaatimusten toteutumisen tarkastamisena. Tätä voidaan kutsua myös asennuskvalifioinniksi IQ (Installation Qualification).

Kun järjestelmä on toimittajan näkökulmasta luovutuskelpoinen, voidaan aloittaa vaatimusmäärittelyssä olleiden toiminnallisten vaatimusten todentaminen. Tätä vaihetta voidaan kutsua toiminnalliseksi tarkastamiseksi tai toimintojen tarkastamiseksi, OQ (Operational Qualification) vaiheeksi. Tarkastusta varten on vaatimusmäärittelystä eriteltynä toiminnalliset vaatimukset. Näitä ominaisuuksia testataan lyhyillä testiajoilla, joilla vaaditut toiminnot voidaan tarkastaa ja todentaa.

Toiminnallisten testauksien jälkeen seuraa suorituskykytestaukset eli PQ (Performance Qualification) vaihe. Näitä vaatimuksia ei yleensä ole määrällisesti kovin paljon, mutta niiden

todentamisen kestoajaksi voi vaihdella hyvinkin paljon. Tässä vaiheessa testataan järjestelmän todellinen tehokkuus ja luotettavuus.

Järjestelmän vastaanottovaiheessa käytetään usein ilmaisua SAT (Site Acceptance Test). SAT:llä ymmärretään sitä testaamista, joilla vastaanottaja hyväksyy toimituksen. SAT määrittellään vaatimusmäärittelyssä joko suorasti tai hankintasopimuksessa epäsuorasti. Vaatimusmäärittelyssä voidaan SAT kuvata, mitä tähän testaukseen liittyy, joilla toimitus hyväksytään. Jos taas hankintasopimuksessa on vaatimuksena kaikkien vaatimusmäärittelydokumentin vaatimusten täyttyminen, tulee SAT määrittelyksi epäsuorasti tätä kautta. Yleensä SAT kattaa nämä edellä kuvatut IQ, OQ ja PQ vaiheet tai osan niistä.

Työnantajalla on työturvallisuusvastuu käytössä olevasta kalustostaan. Tämän vuoksi myös työnantajan edustajan on syytä katselmoida järjestelmä työturvallisuuden näkökulmasta. Tämä siitään huolimatta, vaikka järjestelmällä on toimittajan myöntämä vaatimustenmukaisuusvakuutus. Katselmointi olisi hyvä tehdä muun, kuin hankintaprojektissa mukana olleiden toimesta eturistiriittilanteiden välttämiseksi.

Järjestelmän toimituksen kelpuus on tärkeässä roolissa järjestelmän käytön aikaisen luotettavuuden kanssa. Olennaista on varmistaa, että järjestelmä on tilauksen mukainen. Kelpuutuksessa lipsuminen kostaustuu helposti järjestelmän epäluotettavuutena myöhemmin. Kelpuutuksen perustana on todennukset, joihin mm. standardi SFS-EN 61511-2:2017 antaa opastusta. (35 Liite E.)

Vaatimusmäärittelyssä on tarpeen tuoda esille ne kriteerit, joilla järjestelmän toimitus katsotaan toteutuneeksi. Usein kriteerinä on kaikkien vaatimusten täyttyminen. Jos varmentamisen vaiheessa huomataan ongelmia, joita ei ole huomioitu vaatimusmäärittelyssä, ei varmentamisessa kuitenkaan voida muuttaa tai lisätä vaatimuksia. Järjestelmän kelpoisuus peilataan pelkästään vaatimusmäärittelydokumentin vaatimuksia vastaan. Tämänkin vuoksi huolella muodostettu vaatimusmäärittelydokumentaatio on ensiarvoisen tärkeä.

9 KÄYTTÖÖN SAATTAMINEN

Luotettavuuteen on kiinnitettävä huomiota koko sen elinkaaren ajan ja erityisesti sen käyttöönoton alkumetreillä, ammekäyrän alussa. Käyttöönsaaton englanninkielinen ilmaisu babysitting kuvastaa elinkaaren alun heikkoa resilienssiä varsin osuvasti.

Vaikka kelpuutus olisi tehty huolellisesti, jokainen vaatimusmäärittelyn vaatimus olisi varmennettu, on paljon erilaisia tapahtumakombinaatioita, joihin ei olla varauduttu. Vasta normaalissa tuotantokäytössä saadaan järjestelmän ilmiöistä ja sen käyttäytymisestä kokemusta sekä erilaiset poikkeavat tapahtumat esille. Ohjelmistoista, liikeradoista ja käyttäytymisestä voi löytyä piilossa olleita virheitä, jotka tulevat esille vain poikkeustilanteissa tai paremminkin poikkeustilanteiden poikkeustilanteissa. Tilanteita ei ole huomattu tai niitä ei ole tapahtunut käyttöönottovaiheessa. Tilanteen korjaaminen ja varsinkin ohjelmistoon kajoaminen voi aiheuttaa uusia ennakoimattomia käyttäytymismalleja.

Alkutaipaleen seurannalle on syytä varautua jo projektin alkuvaiheen suunnitelmissa. Tämä voidaan sopia toimittajan ja/tai oman henkilökunnan tehtäväksi. Elinkaaren alun seurannassa huomataan myös tilanteita, miten toimintaa kehittämällä voitaisiin saada järjestelmästä entistä luotettavampi, vaikka järjestelmä muuten jo toimisikin vaaditulla tavalla.

10 JOHTOPÄÄTÖKSET

10.1 Tutkimuskysymys, menetelmät ja tulokset

Tutkimuskysymyksenä oli selvittää, mitkä ovat keskeiset tekijät, jotka vaikuttavat robottijärjestelmien toiminnalliseen luotettavuuteen esisuunnittelun ja hankinnan vaiheissa.

Tutkimuksessa tietolähteinä käytettiin luotettavuus-, turvallisuus- ja laatutekniikan aineistoa. Työn tulokseksi saatiin, että robottijärjestelmän suunnittelu alkaa lähtövaatimuksista, joista keskeisin on saantovaatimus. Saantovaatimus toteutuu järjestelmän nimellissaannon ja luotettavuuden tulona.

Suunnittelu on iteratiivinen prosessi aina hankintasopimukseen saakka, jona aikana suunnittelu ja riskienhallinta käy vuoropuhelua keskenään. Järjestelmän suunnittelussa tulee ottaa huomioon koko tuotantoprosessi ja sen vaikutukset robottijärjestelmään sekä rajapintatekijät. Robottijärjestelmän luotettavuuden rakentamisen perusedellytys on älykäs käyttäytymismalli, rakenteelliset ratkaisut ja robottijärjestelmän kunto. Älykkääseen käyttäytymiseen liittyy hyvä tilannetietoisuus ja sen seurauksena kyky hälyttää apua ennakoivasti ja pyrkiä säilyttämään mahdollisimman korkea toimintavalmius jokaisessa poikkeustilanteessa, sekä palautumaan normaalin toimintamalliin mahdollisimman helposti poikkeustilanteen väistyttyä. Rakenteellisissa ratkaisuissa luodaan edellytykset vikasietoiselle toimintatavalle, jota älykäs toimintamalli käyttää. Kunto koostuu fyysisten laitteiden ominaisuuksista, mutta myös ohjelmien ominaisuuksista. Kunnan tarkastaminen ja sen kelvollisuuden todentaminen vaatimusmäärittelyn vaatimuksia vastaan on tärkeä osa järjestelmän hankintaprojektia ja järjestelmän luotettavuuden toteutumista. Näihin kaikkiin kolmeen keskeiseen tekijään käyttäytymiseen, rakenteellisiin ratkaisuihin ja kuntoon voidaan vaikuttaa toimittaja valinnalla, riskien hallinnalla, vaatimusmäärittelyllä, katselmuksilla ja käyttöönoton yhteydessä erilaisilla varmentamisilla.

10.2 Tulosten luotettavuus ja oikeellisuus

Ehdotetuilla keinoilla saadaan esille asioita, joilla on vaikutusta robottijärjestelmän luotettavuuteen. Vaikuttamalla niihin tekijöihin, jotka lopulta toteuttavat saannon, voidaan osoittaa myös matemaattisesti keinojen vaikutusmekanismi OEE laskennan kautta. Vaikuttamalla OEE:n

tulontekijöihin käyttösuhteeseen, nopeuteen ja laaduntuottokykyyn voidaan osoittaa näiden vaikuttavan järjestelmän luotettavuuteen.

Tuloksena esitetyt keinot luotettavuuden parantamiseksi ovat varsin yleisluontoisia. Työ johdattelee löytämään vaikutusmekanismeja ja tekijöitä, jotka vaikuttavat luotettavuuden rakentamiseen yleisesti robottijärjestelmissä. Työn soveltaminen käytäntöön vaatii kuitenkin huomioimaan suunnittelussa olevan järjestelmän erityispiirteet ja muuntamaan työssä olevat yleistukset spesifisemmälle tasolle.

10.3 Tulosten soveltamisalue ja hyödyllisyys

Tätä työtä voidaan soveltaa työnantajan robottijärjestelmien hankintavaiheessa, sekä yleisesti missä tahansa robottijärjestelmää hankkivassa organisaatiossa. Vaikka työ on ensisijaisesti tehty hankinnan tueksi, voidaan sitä hyödyntää myös käytössä olevien järjestelmien muutostöiden analysointiin, kehityskohteiden tunnistamiseen ja uudelleen määrittämiseen.

Luotettavuuteen on taloudellisesti kannattavaa panostaa suunnitteluvaiheessa: Suunnittelussa luotettavuutta lisäävät tekijät ovat yleensä edullisia toteuttaa. Samojen tekijöiden lisääminen valmiiseen järjestelmään ovat yleensä monin verroin kalliimpia. Luotettavuuteen tehty lisäinvestoinnin pääoman tuotto on moninkertainen kuin perusjärjestelmään tehdyn investoinnin, jossa ei ole kiinnitetty luotettavuuteen erityistä huomiota.

Luotettavuus robottijärjestelmässä on myös laadun näkökulmasta erityisen hyödyllistä. Kun robottijärjestelmä tai tuotantoprosessi toimii suunnitellulla tavalla toistuvasti, voidaan sitä pitää luotettavana. Laadun kehittämisen yksi keskeisimpiä tavoitteita on vaikuttaa tuotantoprosessien luotettavuuden parantamiseen. Vain luotettava tuotantoprosessi voi tuottaa laadukkaita tuotteita tai palveluja.

10.4 Tulosten rajoitteet

Työn tuloksena olevia keinojen hyödyntämisen edellytykset on jonkinlainen tuntemus robotiikasta ja sen ilmiöistä. Lähtökohtana voidaan kuitenkin olettaa, että robottijärjestelmän hankintaprojektista

vastaavalla tällaista kokemusta olisi. Kokemuksen puuttuessa voidaan riskienhallintaa siirtää enemmän integraattorille.

Tulokset ovat yleisellä tasolla olevia aiheita, mutta eivät tuo luotettavuutta parantavia käytännön ratkaisuja yksityiskohtaisemmalla tasolla esille, kuten koodaukseen tai mekaniikkaan liittyviä ratkaisuja.

10.5 Jatkotutkimus

Tässä tutkimuksessa robottijärjestelmien luotettavuuden rakentamisessa on aihepiiriä käyty läpi varsin yleisellä tasolla, koska aihepiiri on laaja. Aiheesta on verrattain vähän löydettävissä täsmäaineistoa. Teollisuudessa robotisointiasteen jatkuvasti kasvaessa, aineistolle olisi paljon tarvetta. Aihetta voisi tutkia syvällisemmin eri osa-alueilta kuten mekaniikan, väylien, rajapintojen, logiikkajärjestelmien, käyttäytymisen ja ohjelmallisten ratkaisujen vaikutuksista luotettavuuteen. Jokainen näistä voitaisiin vielä jakaa tarkempiin alakohtiin. Mekaniikassa voisi tutkia erikseen tarttujiin liittyviä luotettavuustekijöitä tai erikseen robottien kaapelointiin liittyviä luotettavuustekijöitä.

Yhtenä erityisenä lisätutkimuksen aihepiirinä olisi aiheellista tutkia tekoälyyn tai tilastotietomenetelmiin pohjautuvaa monitorointijärjestelmää, jolla voitaisiin arvioida ja ennakoida järjestelmän poikkeustilanteita lyhyellä ja pitkällä aikavälillä. Robottijärjestelmissä on paljon anturitietoa, joita käytetään ainoastaan tiettyinä hetkinä, mutta ei juurikaan aikaan sidottuina tapahtumina tai kestoina. On paljon tilanteita, joissa anturitiedoilla varmistetaan, että tilanne on edennyt oikein ja voidaan edetä seuraavaan vaiheeseen. Jos tilanne ei etene oikein tai tietyssä ajassa, aiheutuu siitä häiriö ja hälytys. Useimmissa näissä tilanteissa voitaisiin saada tietoa jo ennakkoon: Liikkeyksiköiden jumittaminen voitaisiin nähdä virrankulutuksen tai aikaviiveiden muutoksena tai alipainetasojen hidas muuntuminen kasvavan vuodon seurauksena. Robottijärjestelmä voi pysähtyä tilanteeseen, jossa alipaineella tapahtuva kappaleen poiminta epäonnistui ja se todennetaan tartuntatoiminnon jälkeisellä alipaineen virheellisenä tasona. Näin tieto kuluneesta imukupista saadaan yleensä vasta ensimmäisen häiriötoiminnan yhteydessä. Tämä olisi ollut ennakoitavissa jo paljon aiemmin hitaasti muuttuvista tartunnan aikaisista alipainetasoista. Monitorointijärjestelmä kykenisi huomioimaan järjestelmän käyttäytymistä ja kuntoa paljon syvällisemmin jo sen perusanturimäärän ja tapahtumien aikasidonnaisuuksien

avulla. Varsinaiselle järjestelmälle ei siis tarvittaisi välttämättä lisävarusteita vaan monitorointi perustuisi olemassa olevien antureilta saatavien tietojen laajempaan tiedon hyödyntämiseen. Järjestelmällä voitaisiin ennakoida avuntarpeet, jolloin varaosatilaukset ja huollon ennakkosuunnittelu helpottuisi ja oikean huoltovälin määrittely parantuisi.

11 YHTEENVETO

Luotettavuus on puhekielessä varsin yleisesti käytetty ilmaisu myös tuotantojärjestelmistä kommunikoidessa. Kuitenkaan sen määrittely ei ole täsmällinen, vaan jokainen ymmärtää sen omalla tavallaan. Jotta luotettavuutta voidaan suunnitella, toteuttaa ja mitata, täytyy se olla täsmällisesti määritelty. Luotettavuus on merkitykseltään tuotantotaloudellisessa näkökulmassa erittäin tärkeässä roolissa investoinnin kannattavuuden kannalta.

Tuotantoprosessin suorituskykytavoite voidaan määritellä seuraavasti: Tietyssä aikayksikössä, tietty määrä kelpollisia valmisteita. Tämä on tuotantoprosessin saantotavoite, jonka toistuvasta toteutumisesta voidaan tehdä luotettavuuden johtopäätös. Vaikka OEE on alun perin tehokkuusmittari, voidaan OEE:tä käyttää suoraan ilmaisemaan kuinka hyvin saantotavoitteeseen on päästy ja tällä muodostamaan käsitys tuotantoprosessin luotettavuudesta. OEE:n kautta voidaan laskea saanto sen lukuarvon ja järjestelmän nimellisaannon tulona.

Robottijärjestelmän luotettavuuden rakentamiseen täytyy huomioida ympäröivät, kaikki saantotavoitteeseen vaikuttavat tekijät eli koko tuotantoprosessi, robottijärjestelmä on aina vain osa tuotantoprosessia. Robottijärjestelmän sisältävä tuotantoprosessi voidaan jakaa robottijärjestelmän näkökulmasta sisäisiin, ulkoihin ja rajapinnoissa oleviin tekijöihin, joilla vaikutetaan koko tuotantoprosessin luotettavuuteen. Luotettavuuteen voidaan vaikuttaa myös projektin aikaisilla ratkaisuilla, järjestelmän toiminnallisilla ominaisuuksilla ja tekijöillä, joilla on yhteys käytettävyyteen, nopeuteen ja laaduntuottoon. Luotettavuustekijöiden tunnistamiseen voidaan käyttää erilaisia formaaleja riskienhallintatapoja.

Tunnistuksen jälkeen suunnitellaan hallintakeinot robottijärjestelmälle ja -järjestelmän ulkoisille tekijöille. Robottijärjestelmää koskevat hallintakeinot kirjataan järjestelmän vaatimusmäärittelydokumentaatioon. Vaatimusmäärittelydokumentaatio on robottijärjestelmän hankinnassa kaikkein keskeisin dokumentti. Hankintasopimuksen jälkeen projektia seurataan katselmuksilla, joilla varmistetaan, että vaatimusmäärittelyn vaatimukset tulevat toteutetuksi ja oikealla tavalla. Toteutuksen todentamisessa verrataan vaatimusmäärittelyä ja toteutusta keskenään.

LÄHTEET

- (1) Tarantino, Anthony, 2022. Smart Manufacturing: The Lean Six Sigma Way. Hoboken. New Jersey : Wiley
- (2) SFS-ISO 10218-2:2011 2011. Robots and robotic devices. 3. Painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- (3) Woods, David D, Leveson, Nancy, Hollnagel, Erik 2017. Resilience Engineering: Concepts and Precepts. 12. Painos. Boca Raton: CRC Press
- (4) SFS-ISO 31000:2018 2018. Riskienhallinta. Ohjeet. 2. Painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- (5) ISO 8373:2021(en) Robotics — Vocabulary. Geneve: International Organization for Standardization. Hakupäivä 29.8.2023. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-3:v1:en:term:4.17>
- (6) SFS-EN ISO 10218-1:2009 2013, Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset. Osa 1 : Teollisuusrobotit. 3. Painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- (7) SFS-EN IEC 60812:2018 2018, Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA), 1. Painos, Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- (8) SFS-EN IEC 31010:2019 2020. Riskienhallinta. Riskien arviointimenetelmät. 2. Painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- (9) PSK 6201 2022. Kunnossapito. Käsitteet ja määritelmät. 4. Painos. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry
- (10) SFS-EN 15341:2019 +A1:2022 2022. Maintenance Key Performance Indicators. 3. Painos, Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- (11) Finto. Suomalainen asiasanasto ja ontologiapalvelu. Luotettavuus. Hakupäivä 16.8.2023. <https://finto.fi/kto/fi/search?clang=en&q=reliability>
- (12) O'Connor, Patrick D. T., Kleyner, Andre 2012. Practical reliability engineering. 5. Painos. John Wiley & Sons, Ltd.
- (13) Kapur, Kailash C, Pecht, Michael 2014. Reliability Engineering. 1. Painos. Hoboken, New Jersey : Wiley
- (14) KvantiMOTV 2007. Mittaaminen. Yhteiskuntatieteellinen tietoaarkisto. Menetelmäopetuksen tietovaranto. Hakupäivä 14.6.2023. <https://www.fsd.tuni.fi/menetelmaopetus/mittaaminen/mittaaminen.html>.

- (15) Sanastokeskus ry. TEPA-termipankki. Luotettavuus. Hakupäivä 7.6.2023
<https://termipankki.fi/tepa/fi/haku/luotettavuus>
- (16) SFS-EN 13306:2017 2019. Kunnossapito. Kunnossapidon terminologia. 3. Painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- (17) Sihvonen, Vilma 2021. Metalliteollisuuden tilaajayritysten toimitusketjujen resilienssi. Oulun yliopiston julkaisuarkisto Jultika. Tuotantotalous. Kandidaattityö. Hakupäivä 15.9.2023.
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-202105187869>
- (18) Hollnagel, Erik, Woods, David D., Leveson, Nancy, 2006, Resilience Engineering : Concepts and Precepts. 1. Painos. Boca Raton: CRC Press
- (19) Sanastokeskus TSK ry. 2018. Kyberturvallisuuden sanasto (TSK 52). ISBN 978-952-5608-49-6. Hakupäivä 14.8.2023. https://sanastokeskus.fi/tiedostot/pdf/Kyberturvallisuuden_sanasto.pdf
- (20) Mishra, R. C., Sandilya, Ankit 2009. Quality and Reliability management. New Delhi : New Age International (P) Ltd.
- (21) Haight, Joel M. 2013. Handbook of Loss Prevention Engineering. Volume 1. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- (22) Koskela, Jani 2013. Eforan arkittamon kunnossapitokustannusten ja tuotantoa rajoittavien tekijöiden selvitys sekä kehitystoimenpiteiden esittäminen. Kemi-Tornion Ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 15.9.2023.
<https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201303283745>
- (23) Zafarzadeh, Masoud 2013. A Guideline for Efficient Implementation of Automation in Lean Manufacturing Environment. KPP231. Master Thesis. Hakupäivä 23.8.2023.
urn:nbn:se:mdh:diva-20876
- (24) SFS-käsikirja 631-5:2021 2021. Automaatio. Osa5: Prosessiteollisuuden toiminnallinen turvallisuus. 1. Painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- (25) Kuusela, Hannu, Ollikainen, Reijo (toim.) 2005. Riskit ja riskienhallinta. 2009. 2. Painos, Tampere: Tampere University Press
- (26) Työturvallisuuslaki 23.8.2002/738. Hakupäivä 15.9.2023.
<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2002/20020738>
- (27) Valtioneuvoston asetus työvälaineiden turvallisesta käytöstä ja tarkastamisesta 12.6.2008/403. Hakupäivä 15.9.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2008/20080403>
- (28) Välimäki, Kari, Niemelä, Marketta (toim.) 2023. Teollisuuden robotiikka. 1. Painos. Helsinki: Suomen Robotiikkayhdistys Ry
- (29) IEC 61025 2006. Fault tree analysis (FTA). 2. Painos. Geneve: International Electrotechnical Commission

- (30) SFS-IEC 60300-3-9 2000. Luotettavuusjohtaminen. Osa 3 : Käyttöopas: Teknisten järjestelmien riskianalyysi. 1. Painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- (31) Timonen, Lotta 2018. Prosessikuvaukset toimintatapojen yhtenäistämisen tukena. Haaga-Helia ammattikorkeakoulu. Liiketoiminnan kehittämisen koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 14.8.2023. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2018111917458>
- (32) Misra, Krishna B. 2008. Handbook of Performability Engineering. 1. Painos. Springer London, Ltd.
- (33) Kanoun, Karama, Spainhower, Lisa 2008. Dependability Benchmarking for Computer System. 1. Painos. U.S.A : A John Wiley & Sons
- (34) SFS-EN 61882:2016 2016. Hazard and operability studies (HAZOP studies) – Application guide, 1. Painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- (35) SFS-EN 61511-2:2017 2017, Toiminnallinen turvallisuus. Turva-automaatiojärjestelmät prosessiteollisuussektorille. Osa2: Ohjeita standardin IEC 61511-1:2016 soveltamiseen. 1. Painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry
- (36) ISO/IEC90003:2018 2018. Software engineering – Guidelines for the application of ISO 9001:2015 to computer software. 1. Painos, Geneve: International Organization for Standardization
- (37) Ajo, Risto, Hakonen, Seppo, Harju, Hannu, Järvi, Jouko, Kaskes, Kari, Lenardic, Eini, Niukkanen, Erkki, Nurminen, Teppo, Ritala, Pekka, Tolppanen, Mirja & Tommila, Teemu. Laatu automaatiossa. Parhaat käytännöt. SAS. Suomen Automaation Tuki Oy:n ja VTT Automaation ASVA-projekti. Hakupäivä 15.9.2023. <https://www.automaatioseura.fi/site/assets/files/1426/laatuautomaatiossa.pdf>.
- (38) PSK Standardi PSK 2601 2022. Teollisuuden laitteet ja niiden asennus. Hankinta-asiakirjat. 5. Painos. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.
- (39) iStockphoto.com, tekijä: microolga, kuvapankkitunnus 156642859, lis. 2092658927
- (40) iStockphoto.com, tekijä: Clandy-Images, kuvapankkitunnus 506067446, lis. 2093323601
- (41) PSK Standardi PSK 7501 2010. Prosessiteollisuuden kunnossapidon tunnusluvut. 2. Painos. PSK Standardisoimisyhdistys ry