

Aalto-yliopisto
Perustieteiden korkeakoulu
Teknillisen fysiikan ja matematiikan koulutusohjelma

Huoltosuunnitelman optimointi teknisten järjestelmien vikaantumisten ennaltaehkäisemiseksi

Mat-2.4108 Sovelletun matematiikan erikoistyöt
22.5.2016

Tomi Jussila

Ohjaaja: DI Antti Toppila
Valvoja: Prof. Ahti Salo

Työn saa tallentaa ja julkistaa Aalto-yliopiston avoimilla verkkosivuilla. Muilta osilta oikeudet pidätetään

Sisällysluettelo

1.	Johdanto	1
2.	Menetelmät	2
3.	Komponenttien huoltamisen optimointi	7
3.1.	Järjestelmän käytettävyyden mallintaminen	10
3.2.	Optimointimalli	12
4.	Tulokset	14
4.1.	Esimerkkijärjestelmän tapaukset	15
4.2.	Resurssien määrän vaikutus	15
4.3.	Huoltoajankohtien vaikutus	17
4.4.	Vertailu eräperusteiseen korjauspolitiikkaan	19
4.5.	Jakauman parametrien vaikutus	22
5.	Yhteenveto	25

1. Johdanto

Teknisten järjestelmien vikaantuminen voi johtaa vakaviin seurauksiin kuten esimerkiksi henkilövahinkoihin (Dekker, 1996). Lisäksi järjestelmän yllättävä vikaantuminen voi aiheuttaa suuret kustannukset, koska vikaantuneen järjestelmän korjaaminen voi olla kallista (Chitra, 2003) ja koska vikaantunut järjestelmä ei ole korjaamisen aikana käytettävissä (Wu et al, 2016). Eräs keskeinen tapa vähentää yllättäviä vikaantumisia on järjestelmän ennaltaehkäisevä huoltaminen (Doostparast et al, 2014). Ennaltaehkäisevässä huollossa komponentit tarkastetaan ja vaihdetaan mahdollisesti uusiin ennen niiden vikaantumista. Näin ollen järjestelmän vikaantumisalttius vähenee, sillä sen uudet ja toimivaksi todetut komponentit eivät vikaannu yhtä herkästi kuin ikääntyneet ja kuluneet komponentit.

Järjestelmän ennaltaehkäisevän huoltamisen aiheuttamien kustannuksien suuruus riippuu siitä, miten ennaltaehkäisevä huolto suunnitellaan. Nykyisin nämä järjestelmät saattavat olla erittäin monimutkaisia, jonka vuoksi huoltosuunnitelmalla voi olla huomattava vaikutus huollon kokonaiskustannuksiin (Chan ja Asgarpoor, 2006). Tämän lisäksi huoltosuunnitelmalla voi olla suuri vaikutus siihen, kuinka paljon järjestelmän yllättävän vikaantumisen riski laskee ennaltaehkäisevän huoltamisen ansiosta. Koska huoltamiseen käytettävissä olevat resurssit ovat usein rajallisia, kannattaa huoltosuunnitelma optimoida kohdentamalla ja ajoittamalla huolto siten, että yllättävän vikaantumisen riski olisi mahdollisimman pieni annetuilla resursseilla.

Tässä erikoistyössä on tarkasteltu menetelmiä teknisen järjestelmän huoltosuunnitelman optimoimiseksi. Lisäksi työssä toteutetaan menetelmä, jolla voidaan ratkaista, mitkä järjestelmän komponentit kannattaa huoltaa tietyillä ajanhetkillä, jotta järjestelmän keskimääräinen käytettävyys eli todennäköisyys sille, että se on toimiva, olisi mahdollisimman suuri tietyn aikavälin aikana. Menetelmässä ennaltaehkäisevän huollon aiheuttamat kustannukset otetaan huomioon siten, että jokaisen komponentin huoltamiselle voidaan asettaa jokin tietty kustannus, ja näiden kustannuksien summa ei voi olla suurempi kuin ennalta päätetty käytettävissä olevien resurssien määrä.

Työssä tutkitaan huoltamiseen käytettävissä olevien resurssien määrän vaikutusta siihen, kuinka tehokkaasti järjestelmän keskimääräistä käytettävyyttä voidaan parantaa

ennaltaehkäisevän huoltamisen avulla. Työssä tutkitaan myös komponenttien ikääntymistavan vaikutusta huoltojen ajoittamiseen. Tämän lisäksi työssä verrataan optimointimallilla saadun huoltosuunnitelman toimivuutta erääseen yksinkertaiseen huoltosuunnitelmaan, jossa kaikki järjestelmän komponentit huolletaan tietyn aikavälin kuluttua.

Näiden ilmiöiden tutkimista varten työssä esitellään viidestä komponentista koostuva tekninen järjestelmä, jonka huolto suunnitellaan työssä muodostetulla optimointimenetelmällä. Järjestelmän komponenttien ikääntymistä mallinnetaan useiden eri oletuksien avulla. Lisäksi huoltosuunnitelma lasketaan eri aikaväleille useilla eri resurssimäärillä. Menetelmän soveltamisen pohjalta päätuloksena huomataan, että komponenttien ikääntymistavalla on suuri merkitys siihen, miten järjestelmä kannattaa huoltaa. Lisäksi huoltamiseen käytettävissä olevien resurssien kasvattamisesta on hyötyä enemmän silloin, kun resursseja huoltamiseen on pieni määrä.

Tämä erikoistyö rakentuu siten, että luvussa kaksi tehdään kirjallisuuskatsaus menetelmiin, joita voi hyödyntää teknisen järjestelmän ennaltaehkäisevän huoltamisen suunnittelemisessa. Luvussa kolme esitellään tässä erikoistyössä tehty menetelmä teknisen järjestelmän huoltamisen optimoimiseksi, jonka avulla järjestelmän keskimääräinen käytettävyys saadaan mahdollisimman suureksi aikavälillä huoltamiseen käytettävissä olevilla resursseilla. Luvussa neljä esitellään esimerkki teknisestä järjestelmästä, johon luvussa kolme esiteltyä menetelmää sovelletaan. Lisäksi luku neljä sisältää tuloksia menetelmän soveltamisesta. Lopuksi luvussa viisi on yhteenveto erikoistyöstä.

2. Menetelmät

Teknisen järjestelmän huoltosuunnitelmalla tarkoitetaan suunnitelmaa, jonka avulla määritetään mihin järjestelmän komponentteihin huoltotoimenpiteet kohdistetaan, milloin huoltotoimenpiteet toteutetaan ja kuinka hyvin komponentit huolletaan. Tässä luvussa tehdään kirjallisuuskatsaus, jossa tarkastellaan erilaisia kriteerejä, joita huoltosuunnitelman muodostamisessa voidaan huomioida. Lisäksi

kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan menetelmiä, joiden avulla nämä kriteerit huomioiva huoltosuunnitelma voidaan toteuttaa.

Teknisten järjestelmien huoltamisen suunnittelemisella voidaan tavoitella muun muassa huoltamiseen kuluien kustannuksien pienentämistä, järjestelmän vikaantumisien estämistä sekä järjestelmän luotettavuuden parantamista (Wang, 2002). Huomioon otettavia kustannuksia ovat muun muassa komponenttien suunniteltujen huoltojen tai yllättävien vikaantumisien huoltamisen aiheuttamat kustannukset (Tsai et al, 2004), komponenttien toimimisen tarkastamisen aiheuttamat kustannukset (Gao et al, 2015) ja vikaantuneen järjestelmän käyttämättömyyden aiheuttamat kustannukset (Doostparast et al, 2014). Järjestelmän luotettavuus on todennäköisyys sille, että järjestelmä suoriutuu suunnitelluista toiminnoista halutun ajan määritellyissä olosuhteissa. Eräs kriteeri huoltosuunnitelmalle järjestelmän luotettavuuden kannalta on parantaa järjestelmän käytettävyyttä $A(t)$ (Wang, 2002), joka on järjestelmän toimimisen todennäköisyys hetkellä t .

Komponentit voi huoltaa monella eri tavalla, jotka voidaan luokitella sen mukaan, kuinka hyvässä kunnossa komponentti on huoltamisen jälkeen. Tutkituimmat huoltotavat ovat täydellinen huolto, jonka jälkeen komponentti on uuden veroinen, ja minimaalinen huolto, jonka jälkeen vikaantunut komponentti on juuri yhtä hyvä kuin ennen vikaantumista (Mettas ja Zhao, 2005). Käytännössä komponenttien kunto huoltamisen jälkeen poikkeaa usein näistä vaihtoehdoista. Huoltamisia, joiden jälkeen komponentin kunto on jotakin näiden kahden vaihtoehdon välillä, kutsutaan epätäydelliseksi huolloksi (Pham ja Wang, 1996).

Huoltamiskustannus riippuu siitä, kuinka hyvässä kunnossa komponentti on huoltamisen jälkeen. Lisäksi huoltamisen kustannuksista voidaan ottaa huomioon se, että ne koostuvat sekä huoltamisajanhetkeen liittyvistä kiinteistä kustannuksista että huollettavien komponenttien määrästä riippuvista muuttuvista kustannuksista, jonka vuoksi voi olla kannattavaa huoltaa useita komponentteja samalla ajanhetkellä (Nicolai ja Dekker, 2006). Kiinteät kustannukset eivät riipu huoltotoimenpiteiden määrästä. Tällaisia on esimerkiksi huoltamiseen käytettävän laitteen hankkimisen aiheuttamat investointikustannukset. Muuttuvien kustannuksien suuruus taas riippuu huoltotoimenpiteiden määrästä. Tällaisia on esimerkiksi huoltamiseen kuluvat työvoimakulut. Huoltosuunnitelmalta voidaan vaatia myös, että esimerkiksi järjestelmän

käytettävyys on jonkin tietyn raja-arvon yläpuolella ja huoltamiseen kuluvat kustannukset ovat pienempiä kuin jokin tietty raja-arvo (Wang, 2002).

Järjestelmän suunniteltu käyttöaika vaikuttaa menetelmään, jota kannattaa käyttää järjestelmän huoltamiseen. Jos järjestelmän käytölle ei ole suunniteltu lopettamishetkeä, vaan ajatellaan, että sitä käytetään ikuisesti, järjestelmän huoltamiseen kannattaa käyttää periodista menetelmää (Grigoriev et al, 2006). Esimerkki tällaisesta on rakennuksen valaistus. Tällöin huoltosuunnitelma suunnitellaan jonkin ajanjakson pituiselle periodille, ja tätä suunnitelmaa toistetaan periodista toiseen. Jos taas tiedetään ajanhetki, jolloin järjestelmän käyttäminen lopetetaan, kannattaa hyödyntää ei-periodista huoltomenetelmää, sillä sellaisen avulla on mahdollista saada parempi käytettävyys järjestelmälle pienemmillä huoltokustannuksilla (Gao et al, 2015). Esimerkki tällaisesta on ydinvoimala, joka suunnitellaan purettavaksi 50 vuoden käytön jälkeen.

Järjestelmän luotettavuutta voidaan parantaa tarkastamalla sen komponenttien toimivuus (Taghipour et al, 2010), kun kyseessä on sellainen tekninen järjestelmä, jossa jonkin yksittäisen komponentin vikaantuminen ei välttämättä aiheuta koko järjestelmän vikaantumista ja tällöin komponenttien vikaantumisia ei havaita. Jos komponentti on vikaantunut, se huolletaan, ja jos komponentti on toimiva, ei tehdä mitään. Vaikka komponenttia ei huolleta, niin sen vikaantumisen todennäköisyyttä on päivitetty. Tarkastamisessa toimivaksi todetun komponentin vikaantumisen todennäköisyys muuttuu siten, että todennäköisyys sille, että komponentti, joka oli toimiva sitä tarkastettaessa hetkellä t_{ins} , toimii myös hetkellä $t_1 > t_{ins}$, saadaan ehdollisena todennäköisyytenä yhtälöstä

$$\mathbb{P}(T_{VIKA} \geq t_1 | T_{VIKA} \geq t_{ins}) = \frac{\mathbb{P}(T_{VIKA} \geq t_1)}{\mathbb{P}(T_{VIKA} \geq t_{ins})}, \quad (1)$$

jossa T_{VIKA} on satunnaismuuttuja, joka kertoo komponentin vikaantumisaajan.

Komponentit kulumat ikääntyessään, jolloin myös todennäköisyys niiden vikaantumiselle kasvaa. Komponenttien kulumisen mallintaminen on ollut merkittävä osa luotettavuusanalyysin kehittämistä (Li et al, 2012). Kulumismallit voidaan yleisesti ottaen jaotella simulaatiomalleihin (Barata et al, 2002) ja analyttisiin malleihin. Analyttisistä malleista yleisimmin käytettyjä ovat tilastolliset mallit komponenttien vikaantumisaajoille, joissa näiden elinikää mallinnetaan jonkin todennäköisyysjakauman,

kuten esimerkiksi Bernsteinin jakauman, avulla (Gebraeel et al, 2009). Todellisuudessa komponenteilla on usein monta muutakin toimimisen tasoa, kuin täydellinen toimiminen ja vikaantuminen. Viime vuosina on kehitetty paljon monitilamalleja, joissa komponenttien kulumisprosessia mallinnetaan Markovin ketjujen avulla (Li et al, 2012).

Teknisen järjestelmän rakenteella on merkitystä ennaltaehkäisevän huoltamisen suunnittelemisen kannalta. Tärkeimmät luokat ovat yhdestä komponentista koostuva järjestelmä, sarjaan tai rinnan kytketty järjestelmä, k n :stä järjestelmä ja koherentit järjestelmät. Yhden komponentin järjestelmät ovat olleet tärkeitä uusien korjauspolitiikkojen kehittämisessä (Wang, 2002). Sarjaan kytketyssä järjestelmässä järjestelmä vikaantuu kun yksikin siihen kuuluva komponentti vikaantuu. Duarten ym. (2006) esittelemän optimointimenetelmän avulla voidaan minimoida tällaisen järjestelmän huoltokustannukset siten, että järjestelmä on käytettävissä vähintään jonkin ennalta määrätyn osuuden ajasta. Rinnan kytketyssä järjestelmässä taas vikaantumiseen tarvitaan kaikkien sen sisältämien komponenttien vikaantuminen, jolloin yksittäisten komponenttien vikaantumista ei huomata ja niiden toimivuuden tarkastamisella on suuri merkitys järjestelmän luotettavuudelle (Zequeira ja Berenguer, 2004). Järjestelmä, joka sisältää n komponenttia ja vikaantuu silloin kun k komponenttia vikaantuu, on k n :stä järjestelmä (Mo et al, 2015). Esimerkki tällaisesta järjestelmästä on alue, jossa on kuusi generaattoria, joista neljän pitää toimia aina, että sähköä tuotetaan riittävästi. Näiden lisäksi on vielä yksi monien komponenttien järjestelmien luokka, joiden huoltamista on tutkittu paljon, joka on koherentit järjestelmät (Doostparast et al, 2014). Tekninen järjestelmä on koherentti silloin, kun siinä ei ole yhtään sen toiminnan kannalta turhaa komponenttia ja vikaantuneen komponentin korjaaminen voi parantaa mutta ei huonontaa järjestelmän käytettävyyttä.

Eräperusteinen korjauspolitiikka (Block Replacement Policy, BRP) on yleisesti käytetty menetelmä teknisen järjestelmän huoltamiseksi (Ke ja Yao, 2016). Sitä käytettäessä kaikki järjestelmän komponentit huolletaan tietyin aikavälein T_{BRP} , ja tämän lisäksi jokainen järjestelmän yksittäinen komponentti huolletaan niiden vikaantuessa (Barlow ja Hunter, 1960). Esimerkkinä tämän politiikan käytöstä on jonkin tien valojen huoltaminen, jossa kaikki lamput vaihdetaan uusiin lamppuihin ajanhetkillä kT_{BRP} , $k \in \mathbb{N}$ ja tämän lisäksi yksittäiset lamput vaihdetaan niiden vikaannuttua. Lamppujen vaihtaminen ennaltaehkäisevästi ajanhetkellä kT_{BRP} , $k \in \mathbb{N}$ aiheuttaa kustannuksen c_p ja vastaavasti

yllättäen vikaantunen lampun vaihtaminen aiheuttaa kustannuksen c_s , joka on suurempi kuin c_p .

Eräperusteista korjauspolitiikkaa käytettäessä on tärkeää päättää komponenttien vaihtamisen välillä kuluva aika T_{BRP} mahdollisimman hyvin. Mitä lyhyempi T_{BRP} on, sitä useammin komponentit huolletaan, jolloin ennaltaehkäisevän huollon kustannukset kasvavat. Toisaalta tällöin taas vikaantumistodennäköisyys laskee, jolloin yllättävien vikaantumisien huoltokustannukset laskevat. T_{BRP} kannattaa valita siten, että kokonaiskustannuksien odotusarvo on mahdollisimman pieni. Odotusarvo huoltoon kuluviin kustannuksiin aikavälin T_{BRP} aikana on

$$C(T_{BRP}) = c_p + c_s \mathbb{E}[N(T_{BRP})], \quad (2)$$

jossa $\mathbb{E}[N(T_{BRP})]$ on välin T_{BRP} aikana tapahtuvien vikaantumisien lukumäärän odotusarvo. Pitkän ajan aikana kustannukset minimoituvat valitsemalla T_{BRP} siten, että yhtälön (2) ja T_{BRP} :n suhde on mahdollisimman pieni. Eräperusteisen korjauspolitiikan etuja ovat yksinkertaisuus sekä se, että tehdyistä huolloista ei tarvitse pitää kirjaa, sillä aikaisemmin tehdyt huollot eivät vaikuta siihen, milloin seuraavia huoltoja suunnitellaan tehdä. Toisaalta sen huonona puolena on se, että sitä noudattamalla huollot kohdistuvat joskus jopa melkein täysin uusiin komponentteihin.

Ikäperusteinen korjauspolitiikka (Age Replacement Policy, ARP) on toinen yleisesti käytetty menetelmä huoltojen suunnittelemiseen. Sitä käyttämällä järjestelmän komponentit huolletaan joko silloin, kun ne vikaantuvat tai silloin, kun ne ovat ikääntyneet tiettyyn ennalta määrättyyn ikään T_{ARP} asti (Barlow ja Hunter, 1960). Suunniteltu huolto komponentin ikäännyttyä riittävästi aiheuttaa kustannuksen c_p ja suunnittelematon huolto komponentin vikaantuessa aiheuttaa kustannuksen c_s , joka on suurempi kuin c_p . Huoltokustannukset minimoituvat silloin, kun minimoidaan yhden korjausvälin kustannuksien odotusarvon ja korjausvälin pituuden odotusarvon välistä suhdetta.

Sekä eräperusteinen että ikäperusteinen korjauspolitiikka perustuvat vain järjestelmän huoltokustannuksien minimoimiseen. Näiden menetelmien rajoituksena onkin se, että ne huomioivat järjestelmän luotettavuuden vain välillisesti kustannusten kautta, eikä niihin voi esimerkiksi asettaa vaatimusta vähimmäiskäytävyydelle. Tämän lisäksi sekä ikäperusteisessa korjauspolitiikassa päätettävä elinikä, jossa komponentit huolletaan, että

eräperusteisessa korjauspolitiikassa korjausten välinen aikaväli riippuvat olennaisesti järjestelmän komponenttien vikaantumisien todennäköisyysjakaumasta. Näiden jakaumien määrittämiseen saattaa liittyä huomattavasti epävarmuutta, jonka johdosta molemmilla menetelmillä voidaan saada tulokseksi sellainen huoltosuunnitelma, jolla järjestelmän huoltamiseen kuluvat kustannukset eivät minimoidu. Zitroun ym. (2013) kehittämällä herkkyysanalyysimenetelmällä voidaan ottaa nämä epävarmuudet huomioon huoltosuunnitelmaa ratkaistaessa.

Teknisten järjestelmien huoltamiset voidaan suunnitella myös vikaantumisten rajoittamispolitiikan (Failure Limit Policy) avulla (Wang, 2002). Tätä käyttämällä valitaan jokin kynnsarvo, kuten esimerkiksi komponentin kulumisen, jollekin mitattavalle ominaisuudelle. Järjestelmän komponentit huolletaan ennaltaehkäisevästi vain silloin kun tämä kynnsaro ylittyy. Esimerkki tästä menetelmästä on sovellus, jossa järjestelmän komponentteja ei huolleta ennaltaehkäisevästi ennen kuin järjestelmässä komponentteja vikaantuu jollakin ennalta määrättyä tasoa suuremmalla taajuudella (Lie ja Chun, 1986).

3. Komponenttien huoltamisen optimointi

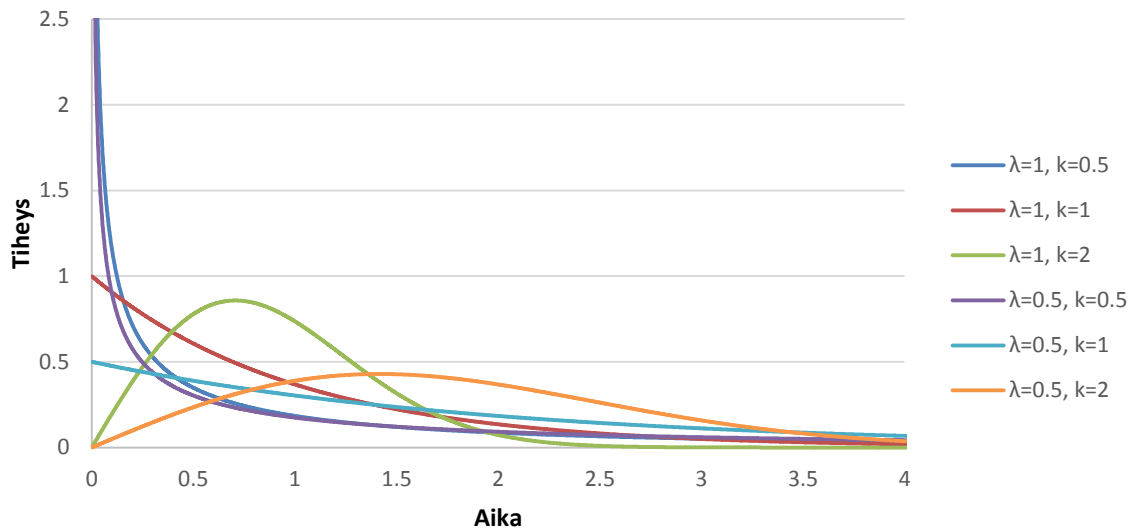
Tarkastellaan koherenttia teknistä järjestelmää, joka koostuu n komponentista. Komponentti i vikaantuu todennäköisyydellä p_i . Komponenttien vikaantumiset ovat toisistaan riippumattomat. Komponenttien vikaantumisalttius kasvaa komponentin ikääntymisen myötä johtuen muun muassa kulumisesta. Eräs yleisimmin käytetyistä menetelmistä ikääntymisen mallintamiseen on Weibullin jakauma (Pinder III et al, 1978), joka mallintaa komponentin vikaantumisaikaa satunnaismuuttujalla, jonka kertymäfunktio on

$$F(t; \lambda, k) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda t^k}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (3)$$

jossa k on jakauman muotoparametri ja λ skaalaparametri, ja tiheysfunktio on

$$f(t; \lambda, k) = \begin{cases} k\lambda t^{k-1} e^{-\lambda t^k}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Weibullin jakaumassa käytetään myös joskus vaihtoehtoisia parametrisaatioita. Lääketieteen yhteydessä käytetään skaalaparametria $b = \lambda^{-k}$ ja lisäksi joskus käytetään skaalaparametria $\beta = 1/\lambda$. Muotoparametri näissä vaihtoehtoisissa parametrisaatioissa on sama. Jakauman muotoparametrin arvon ollessa pienempi kuin yksi, komponentin vikaantumistaajuus laskee ajan edetessä ja vastaavasti sen ollessa suurempi kuin yksi, komponentin vikaantumistaajuus kasvaa ajan edetessä. Jakauman muotoparametrin arvon ollessa yksi, komponentin vikaantumistaajuus on vakio, ja kyseessä on eksponenttijakauma, joka kuvaa komponenttia, joka ei ikäänny. Kuvassa 1 on havainnollistettu Weibullin jakauman parametrien vaikutuksia jakauman muotoon.



Kuva 1. Weibullin jakauman tiheysfunktio eri parametrien arvoilla

Tarkastellaan järjestelmää, joka koostuu n :stä komponentista. Komponentin i elinikä noudattaa Weibullin jakaumaa parametrein k_i ja λ_i . Tarkastelun alkuhetkellä $t_0 = 0$ kaikki komponentit ovat uusia ja toimivia.

Komponenteille muodostetaan huoltosuunnitelma siten, että kukin komponentti voidaan huoltaa uuden veroiseksi yhden tai useamman kerran tarkastelujakson aikana. Tällöin todennäköisyys sille, että komponentti i ei toimi hetkellä t on

$$p_i(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda_i \tau_i^{k_i}}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (5)$$

jossa τ_i on ajanhetkestä t_{vi} kulunut aika, jolloin komponentin i tiedetään viimeksi olleen yhtä hyvässä kunnossa kuin täysin uusi komponentti. Tämä ajanhetki on joko komponentin viimeisimmän huollon ajanhetki tai aikavälin alkuajanhetki, jos komponenttia ei ole huollettu kertaakaan. Ajanhetkellä t tästä hetkestä kulunut aika on $\tau_i = t - t_{vi}$.

Olkoon $t_h, h \in \{1, 2, \dots, N\}$ ajanhetket, joilla komponentti voidaan huoltaa, jossa N on mahdollisten huoltoajankohtien lukumäärä. Tällöin huoltosuunnitelman määrittävät binäärimuuttujat x_{ij} , jotka saavat arvon 1, jos komponentti i huolletaan hetkellä j , ja vastaavasti arvon 0, jos tätä huoltamista ei toteuteta, kun $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, N$.

Olkoon l mahdollisten huoltojen lukumäärä ajanhetkeen t mennessä. Se voidaan esittää ajanhetkeä t edeltävän viimeisen mahdollisen huoltoajankohdan t_h indeksin h avulla siten, että se on

$$l = \max_{\substack{t > t_h \\ h = 1, \dots, N}} h \quad (6)$$

Komponentin i viimeisin huoltoajanhetki t_{vi} voidaan esittää näiden avulla yhtälöllä

$$t_{vi} = \sum_{u=1}^l \left(x_{iu} t_u \prod_{u < m \leq l} (1 - x_{im}) \right), \quad (7)$$

jossa tulo $\prod_{u < m \leq l} (1 - x_{im})$ varmistaa sen, että t_{vi} voi olla t_u vain silloin, kun komponenttia ei ole huollettu ajanhetken t_u jälkeen, ja $x_{iu} t_u$ varmistaa sen, että t_{vi} voi olla t_u vain silloin, kun komponentti on huollettu ajanhetkellä t_u . Komponentin i viimeisestä huollosta kulunut aika hetkellä t on

$$\tau_i = t - \sum_{u=1}^l \left(x_{iu} t_u \prod_{u < m \leq l} (1 - x_{im}) \right). \quad (8)$$

Kaikki komponentin i huoltoa koskevat binäärimuuttujat x_{ij} kuuluvat vektoriin $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{iN})$. Tällöin komponentti i , jonka elinikä noudattaa Weibullin jakaumaa parametrein k_i ja λ_i , on vikaantunut hetkellä t todennäköisyydellä

$$p_i(t, x_i) = 1 - e^{-\lambda_i(t - \sum_{u=1}^l (x_{iu} t_u \prod_{n < m \leq l} (1 - x_{im})))^{k_i}}. \quad (9)$$

3.1. Järjestelmän käytettävyyden mallintaminen

Järjestelmän hetkittäinen käytettävyys $A(t)$ on sen toimimisen todennäköisyys hetkellä t . Jos järjestelmän vikaantumisella on vakavat seuraukset, niin järjestelmän käytettävyyden maksimointi on erityisen tärkeä tavoite huoltosuunnitelmalle (Jiang et al, 2013). Tällaisia järjestelmiä ovat muun muassa ydinvoimalat ja tutkajärjestelmät. Järjestelmän käytettävyyttä voidaan mallintaa järjestelmän vikaantumisen todennäköisyyden avulla, joka saadaan sen komponenttien vikaantumisien todennäköisyyksien avulla. Järjestelmään kuuluvan komponentin i vikaantuminen on perustapahtuma E_i . Joidenkin perustapahtumien E_i yhdistelmistä seuraa koko järjestelmän vikaantuminen T , eli huipputapahtuman toteutuminen. Huipputapahtuman T todennäköisyyden mallintamiseen voidaan hyödyntää todennäköisyyspohjaista riskien arviointia, joka on systemaattinen tapa arvioida erilaisiin monimutkaisiin teknisiin järjestelmiin liittyviä riskejä (Modarres, 2006). Siihen liittyvä vikapuuanalyysi on menetelmä, jossa luodaan Boolean logiikkaa noudattava graafinen esitys siitä, miten eri perustapahtumien E_i yhdistelmistä seuraa koko järjestelmän vikaantuminen T .

Niitä perustapahtumien yhdistelmiä, jotka aiheuttavat koko järjestelmän vikaantumisen, sanotaan katkosjoukoiksi. Jos minkä tahansa perustapahtuman korjaaminen saa järjestelmän toimivaksi, se on myös minimikatkosjoukko (Barlow ja Proschan, 1975). Vikapuuanalyysin avulla voidaan määrittää järjestelmän minimikatkosjoukot $C_j \subseteq \{E_1, \dots, E_n\}$. Järjestelmä vikaantuu, jos yksikin järjestelmän minimikatkosjoukoista toteutuu, joten huipputapahtuma T voidaan esittää kaikkien järjestelmän sisältämien minimikatkosjoukkojen unionina, eli

$$T = \bigcup_{j=1}^{N_{Cut}} C_j, \quad (10)$$

jossa N_{Cut} on järjestelmän minimikatkosjoukkojen lukumäärä. Vastaavasti minimikatkosjoukko toteutuu silloin, kun kaikki siihen sisältyvät perustapahtumat toteutuvat, jolloin minimikatkosjoukko C_j on sen sisältämien perustapahtumien leikkaus, eli

$$C_j = \bigcap_{E_i \in C_j} E_i. \quad (11)$$

Järjestelmän vikaantumisen todennäköisyys voidaan esittää sen sisältämien minimikatkosjoukkojen unionin todennäköisyytenä, ja jokaisen minimikatkosjoukon todennäköisyys voidaan esittää sen sisältämien perustapahtumien todennäköisyytenä. Hetkellä t perustapahtuman E_i todennäköisyys $P(E_i) = p_i(t, x_i)$, jota mallinnetaan yhtälössä (9). Olkoon X matriisi, joka sisältää järjestelmän kaikkien komponenttien huoltojen ajankohdat määrittävät vektorit x_i . Järjestelmän käytettävyys hetkellä t on

$$A(p(t, X)) = 1 - P\left(\bigcup_{j=1}^{N_{Cut}} \left(\bigcap_{E_i \in C_j} E_i\right)\right). \quad (12)$$

Perustapahtumat ovat toisistaan riippumattomia, jolloin minimikatkosjoukon C_j tapahtumisen todennäköisyys on sen sisältämien perustapahtumien E_i todennäköisyyksien tulo. Toisaalta perustapahtuma E_i saattaa kuulua useaan minimikatkosjoukkoon, jonka vuoksi minimikatkosjoukkojen unionin todennäköisyyttä ei voi laskea jokaisen minimikatkosjoukon todennäköisyyden summana. Minimikatkosjoukkojen päällekkäisyys voidaan huomioida lisäys-poisto-periaatteella (Inclusion-Exclusion Principle). Tämän mukaan minimikatkosjoukkojen unionin todennäköisyys on

$$P\left(\bigcup_{j=1}^{N_{Cut}} C_j\right) = \sum_{w=1}^{N_{Cut}} \left((-1)^{w-1} \sum_{\substack{I \subset \{1, \dots, N_{Cut}\} \\ |I|=w}} P(C_I) \right), \quad (13)$$

jossa jälkimmäinen summa käy läpi kaikki minimikatkosjoukoista C_j indekseillä $1, \dots, N_{cut}$ muodostetut osajoukot I , joihin kuuluu täsmälleen w minimikatkosjoukkoa. C_I on näiden osajoukkojen leikkaus, eli $C_I = \bigcap_{j \in I} C_j$ ja $P(C_I)$ on tämän todennäköisyys.

3.2. Optimointimalli

Teknisen järjestelmän huoltamisella voidaan tavoitella sitä, että järjestelmä on mahdollisimman suurella todennäköisyydellä toimiva. Tämä toteutuu suunnittelemalla huoltamiset siten, että järjestelmän käytettävyys on mahdollisimman suuri jollakin aikavälillä, jonka loppuhetki on t_f . Tässä erikoistyössä luodussa menetelmässä teknisen järjestelmän huollot voidaan suunnitella optimointimallin avulla, jossa tavoitellaan järjestelmän keskimääräisen käytettävyyden A_{AVE} maksimointia. Tämä asetelma on päinvastainen yleensä käytettyihin menetelmiin, joissa huoltokustannuksia minimoidaan ja käytettävyyteen liittyvä tavoite mallinnetaan vähimmäistasona, jota ei saa alittaa (Wang, 2002). Järjestelmän keskimääräinen käytettävyys voidaan laskea integroimalla käytettävyysfunktioita aikavälin yli, ja jakamalla se aikavälin pituudella. Tällöin optimointimallin kohdefunktiona on $\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} A(p(t, X)) dt$.

Järjestelmän käytettävyys on paloittain määritelty funktio järjestelmän komponenttien huoltoajankohtien mukaan, jonka vuoksi myös optimointimallin kohdefunktio voidaan määrittellä paloittain huoltoajankohtien välisten ajanjaksojen integraalien summana. Kohdefunktio voidaan siis esittää myös $\frac{1}{t_N} \sum_{q=1}^N \int_{t_{q-1}}^{t_q} A(p(t, X_{\cdot q})) dt$, jossa $X_{\cdot q}$ on matriisi, joka sisältää jokaisen komponentin huoltoajankohdat määrittelevät vektorit $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{iq})$ ajanhetkeen t_q saakka. Koska viimeisen aikavälin integraaliin vaikuttaa kuitenkin kaikkien optimointitehtävän päätösmuuttujien arvo, niin tämän separoinnin avulla ei kuitenkaan pystytä ratkaisemaan optimointitehtävää tehokkaammin.

Teknisen järjestelmän komponenttien huoltaminen aiheuttaa kustannuksia. Koska useimmiten resursseja järjestelmän huoltamista varten on rajallisesti, tästä aiheutuu yksi rajoite tässä erikoistyössä muodostettuun optimointimalliin. Olkoon c_{ij} kustannus, joka syntyy, jos komponentti i huolletaan hetkellä j . Näiden kustannuksien summa ei voi olla suurempi kuin huoltamiseen käytettävissä oleva määrä resursseja c_{max} . Näiden johdosta

tässä erikoistyössä muodostettu optimointimalli teknisen järjestelmän huoltamisten optimoimiseksi on

$$\begin{aligned} & \max \frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} A(p(t, X)) dt \\ & \text{s. t. } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N c_{ij} x_{ij} \leq c_{max} \\ & x_{ij} = \{0,1\} \forall i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (14)$$

Tässä erikoistyössä tämä optimointitehtävä ratkaistiin brute force-menetelmää käyttämällä evaluoimalla kaikki käyvät ratkaisut ja valitsemalla niistä parhaan. Tämä menetelmä soveltuu vain pienille tehtäville, sillä jos järjestelmässä on n komponenttia ja N mahdollista huoltoajankohtaa, on huoltoportfolioita, jotka sisältävät k huoltoa, yhteensä $\binom{nN}{k}$ kappaletta. Esimerkiksi kun $n = 10$, $N = 10$ ja $k = 10$ on tällaisia portfolioita noin $1.7 \cdot 10^{13}$ kappaletta. Tässä erikoistyössä optimointitehtävän ratkaisemiseksi ei toteutettu varsinaista optimointialgoritmia, sillä pienien tehtävien perusteella pystyi havaitsemaan mielenkiintoisia ilmiöitä, kuten erikoistyön laskennallisista tuloksista ilmenee ja lisäksi huoltosuunnitelman optimoimiseen soveltuvan algoritmin toteuttaminen on haastavaa (Doostparast et al, 2014).

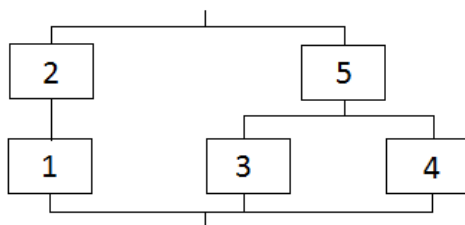
Yksi mahdollinen kehityskohde tälle optimointimallille olisi Liesiön (2014) implisiittisen enumerointi-algoritmin käyttäminen optimointitehtävän ratkaisemiseen. Tämä algoritmi ratkaisee optimointitehtävän tehokkaammin, sillä sitä käyttämällä kaikkia mahdollisia ratkaisuja ei tarvitse evaluoida. Tämä perustuu siihen, että implisiittinen enumerointi-algoritmi tunnistaa etukäteen osasta ratkaisuista ovatko ne ei-optimaalisia tai ei-käyviä. Myös luotettavuusfunktion tarkassa evaluoinnissa voi hyödyntää tehokkaampia menetelmiä, kuten esimerkiksi Jungin (2015) paranneltua katkosjoukkojen ylärajaestimaattoria.

4. Tulokset

Tarkastellaan seuraavaksi luvussa 3 esitettyä menetelmää esimerkkijärjestelmän avulla. Kyseinen järjestelmä koostuu 5 identtisestä komponentista, jotka vikaantuvat toisistaan riippumatta. Järjestelmän rakenne on esitettynä kuvassa 2, ja se toimii, kun siinä on ainakin yksi toimiva polku alkukohtasta loppukohtaan. Tämän perusteella järjestelmä toimii, kun joko sekä komponentit 1 ja 2 toimivat, tai kun komponentti 5 ja toinen komponenteista 3 tai 4 toimii. Vikapuuanalyysin avulla voidaan määrittää järjestelmän minimikatkosjoukot, jotka ovat $\{1,3,4\}$, $\{1,5\}$, $\{2,3,4\}$ ja $\{2,5\}$. Näiden todennäköisyydet ovat $p_1p_3p_4$, p_1p_5 , $p_2p_3p_4$ ja p_2p_5 , joissa p_i on todennäköisyys sille, että komponentti i on vikaantunut. Lisäys-poisto-periaatteen avulla järjestelmän käyttävyys on

$$A(p_1, \dots, p_5) = 1 - p_1p_3p_4 - p_1p_5 - p_2p_3p_4 - p_2p_5 + p_1p_2p_3p_4 + p_1p_2p_5 + p_1p_3p_4p_5 + p_2p_3p_4p_5 - p_1p_2p_3p_4p_5 \quad (15)$$

Tämän esimerkkijärjestelmän avulla tutkitaan resurssien määrän vaikutusta siihen, kuinka suuri vaikutus huoltamisella voi olla järjestelmän keskimääräiseen käytettävyyteen ja milloin järjestelmän komponentteja kannattaa huoltaa. Tämän lisäksi tässä erikoistyössä luotua menetelmän toimivuutta verrataan eräperusteisen korjauspolitiikan käyttämiseen. Näiden tutkimista varten esimerkkijärjestelmälle ratkaistaan optimointimenetelmällä huoltamissuunnitelmat kolmessa eri tapauksessa, jotka esitellään luvussa 4.1. Lopuksi tutkitaan miten komponenttien ikääntymistapa vaikuttaa komponenttien huoltoajankohtaan.



Kuva 2. Esimerkkijärjestelmä

4.1. Esimerkkijärjestelmän tapaukset

Järjestelmän komponenttien elinikä noudattaa Weibullin jakaumaa parametrein λ ja k , ne voidaan huoltaa ajanhetkellä $t_h, h \in \{1, 2, \dots, N\}$, ja järjestelmän huoltamiset suunnitellaan aikavälille, joka päättyy hetkellä t_f . Jokaisen komponentin ennaltaehkäisevä huoltaminen vie yhtä paljon resursseja. Tapauksessa 1 järjestelmän komponentit voidaan hoitaa kahtena eri ajankohtana ($N = 2$), ja komponentit eivät ikäänny, jolloin niiden vikaantumistaajuus on vakio. Tällainen komponentti voi esimerkiksi olla auton rengas, sillä sen puhkeaminen on satunnainen tapahtuma, joka ei riipu renkaan käyttöajan pituudesta. Tapaus 2 on muuten identtinen tapauksen 1 kanssa, mutta siinä huoltosuunnitelman aikavälin pituus on pidempi ja järjestelmän komponentit voidaan huoltaa kolmena eri ajankohtana ($N = 3$). Tapauksessa 3 mahdolliset huoltoajankohdat ja suunnitelman aikaväli on sama kuin tapauksessa 1, mutta siinä järjestelmän komponentit ikääntyvät, jolloin niiden vikaantumistaajuus kasvaa ajan edetessä. Tällaisia komponentteja ovat esimerkiksi venttiilit, jotka kuluvat käytössä, ja tämän vuoksi vikaantuvat sitä herkemmin mitä pidempään ne ovat olleet käytössä. Näiden kolmen tapauksen parametrit ovat esitettynä taulukossa 1.

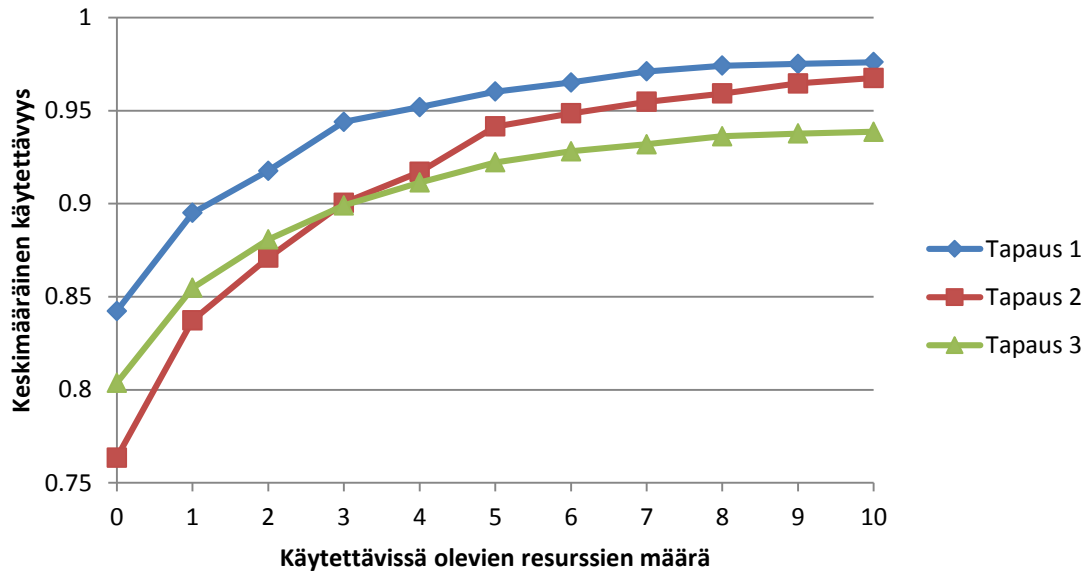
Taulukko 1. Tapauksien parametrit

	Tapaus 1	Tapaus 2	Tapaus 3
λ	5	5	3
k	1	1	2
t_h	{1,2}	{1,2,3}	{1,2}
t_f	3	4	3

4.2. Resurssien määrän vaikutus

Tutkitaan seuraavaksi järjestelmän huoltamiseen käytössä olevien resurssien määrän vaikutusta siihen, kuinka paljon järjestelmän keskimääräistä käytettävyyttä on mahdollista parantaa ennaltaehkäisevän huoltamisen avulla. Tämän tutkimista varten menetelmällä ratkaistaan optimaalinen suunnitelma esimerkkijärjestelmän huoltamiseksi tapauksissa 1, 2 ja 3 kun huoltamiseen käytössä olevien resurssien määrä riittää

pienimmillään yhden komponentin huoltamiseen ja suurimmillaan 10 komponentin huoltamiseen. Järjestelmän keskimääräiset käytettävyydet eri tapauksissa eri käytettävissä olevien resurssien määrillä on esitettyä kuvassa 3.

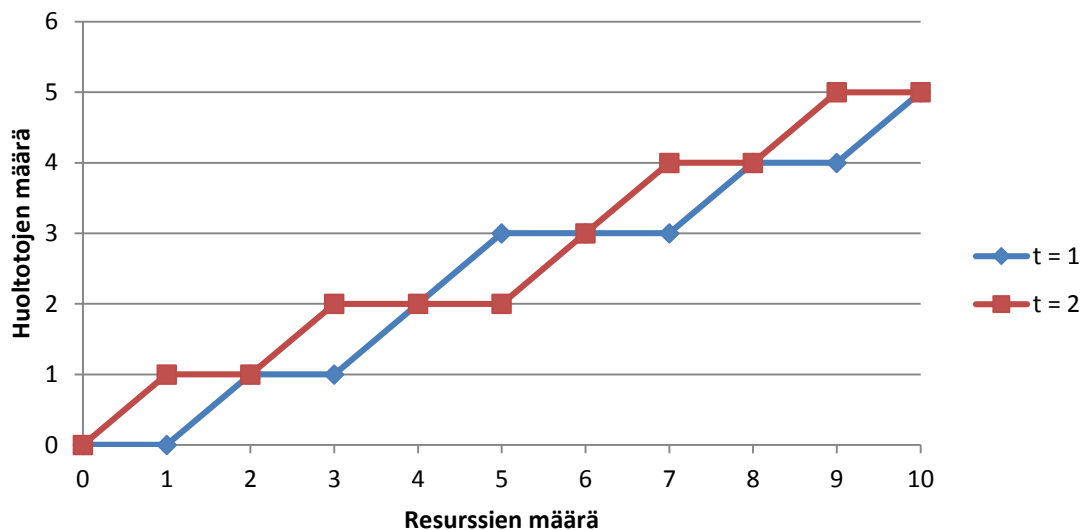


Kuva 3. Keskimääräinen käytettävyys aikavälillä eri tapauksissa

Kuvasta 3 huomataan, että mitä vähemmän resursseja järjestelmän huoltamiseen on käytettävissä, sitä enemmän resurssien kasvattamisesta pystytään hyötymään. Esimerkiksi ensimmäisen komponentin huoltaminen kasvattaa järjestelmän keskimääräistä käytettävyyttä tapauksissa 6.3 % - 9.7 % siihen verrattuna, että resurssit eivät riitä yhdenkään komponentin huoltamiseen. Vastaavasti resurssien määrän lisääminen yhdeksän komponentin huoltamiseen riittävästä määrästä kymmenen komponentin huoltamiseen riittävään määrään kasvattaa eri tapauksissa järjestelmän käytettävyyttä vain 0.1 % - 0.3 %. Tämä ilmiö selittyy sillä, että sekä eri järjestelmän komponenttien toimivuudella että mahdollisilla huoltoajankohdilla ei ole samaa vaikutusta järjestelmän käytettävyyteen. Resurssien määrän kasvattaminen yhden komponentin huoltamiseen riittävään määrään mahdollistaa järjestelmän käytettävyyden kannalta tärkeimmän komponentin huoltamisen. Vastaavasti resurssien määrän riittäessä yhdeksän komponentin huoltamiseen järjestelmän keskimääräinen käytettävyyden kannalta tärkeimmät huoltamiset on jo mahdollista suorittaa, jonka vuoksi resurssien määrän lisääminen kymmenen komponentin huoltamiseen riittävään määrään ei enää paranna järjestelmän keskimääräistä käytettävyyttä merkittävästi.

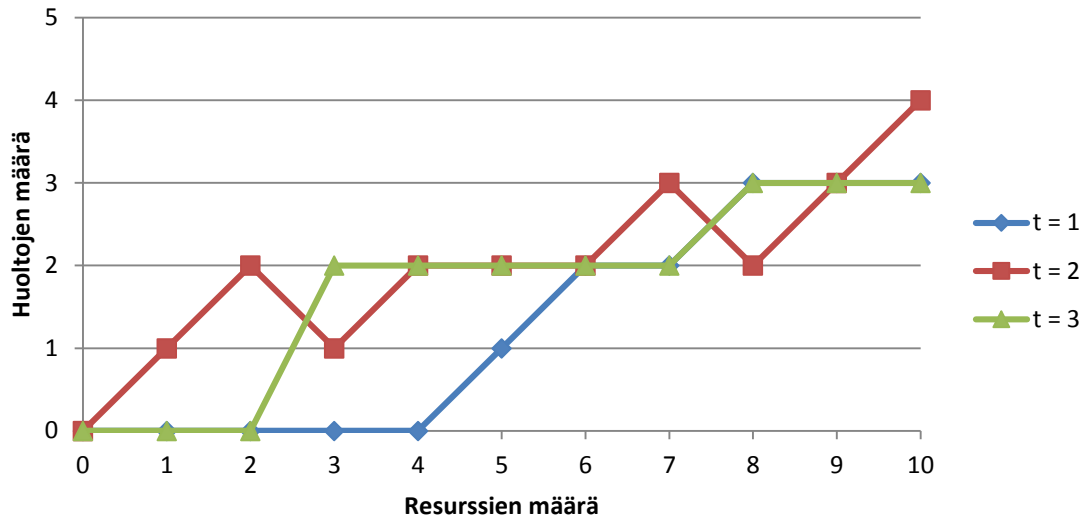
4.3. Huoltoajankohtien vaikutus

Tutkitaan seuraavaksi sitä, kuinka monta komponenttia kannattaa huoltaa jokaisella mahdollisella huoltoajankohdalla eri tapauksissa kun huoltamisiin käytettävissä olevien resurssien määrä vaihtelee. Tämä tehdään ratkaisemalla tämän erikoistyon menetelmällä optimaaliset suunnitelmat esimerkkijärjestelmän huoltamiseksi eri tapauksissa kun huoltamiseen käytössä olevien resurssien määrä riittää pienimmillään yhden komponentin huoltamiseen ja suurimmillaan 10 komponentin huoltamiseen. Optimaalisista huoltosuunnitelmista lasketaan jokaisella mahdollisella huoltoajankohdalla tehtyjen huoltamisien määrä. Tapauksen 1 tulokset esitetään kuvassa 4, tapauksen 2 tulokset esitetään kuvassa 5 ja tapauksen 3 tulokset esitetään kuvassa 6.



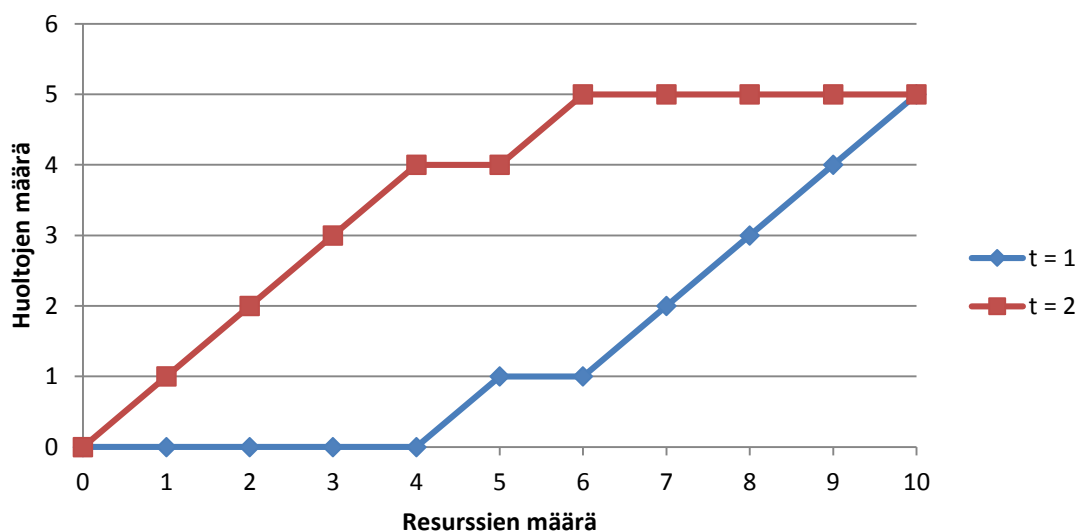
Kuva 4. Huoltojen lukumäärä eri ajanhetkillä ja resurssien määrällä tapauksessa 1

Tapauksessa 1 on kaksi mahdollista ajankohtaa järjestelmän komponenttien huoltamiselle. Kuvasta 4 huomataan, että kumpikin ajankohta on tärkeä järjestelmän keskimääräisen käytettävyyden kannalta. Yhdelläkään käytettävissä olevien resurssien määrällä eri ajankohtina tehtyjen huoltojen lukumäärä ei poikkea yli yhdellä. Lisäksi aina resurssien määrän ollessa parillinen, molemmilla ajankohdilla kannattaa huoltaa yhtä monta komponenttia. Tämä ilmiö selittyy sillä, että tapauksessa 1 järjestelmän komponenttien vikaantumistaajuus on vakio. Tämä tarkoittaa sitä, että komponentit eivät ikäänny, jonka vuoksi siis molemmilla ajankohdilla tehdyillä huolloilla on yhtä suuri merkitys järjestelmän keskimääräiselle käytettävyydelle.



Kuva 5. Huoltojen määrä eri ajanhetkillä ja resurssien määrällä tapauksessa 2

Tapauksessa 2 on kolme mahdollista ajankohtaa järjestelmän komponenttien huoltamille. Kuvasta 5 huomataan, että ajanhetkellä $t = 2$ kannattaa huoltaa melkein kaikilla käytettävissä olevien resurssien määrällä eniten komponentteja. Toisaalta yhdelläkään käytettävissä olevien resurssien määrällä eri ajankohdilla tehtävien huoltojen määrissä ei ole suurta eroa. Tämä ilmiö on havaittavissa myös tapauksen 1 tuloksista. Tämä johtuu siitä, että myös tapauksessa 2 järjestelmän komponenttien vikaantumistaajuus on vakio, joka tarkoittaa sitä, että ne eivät ikäänny. Ajanhetki $t = 2$ on järjestelmän huoltosuunnitelman puoliväli, joka selittää sen, miksi melkein kaikilla käytettävissä olevien resurssien määrillä kannattaa silloin huoltaa eniten komponentteja.

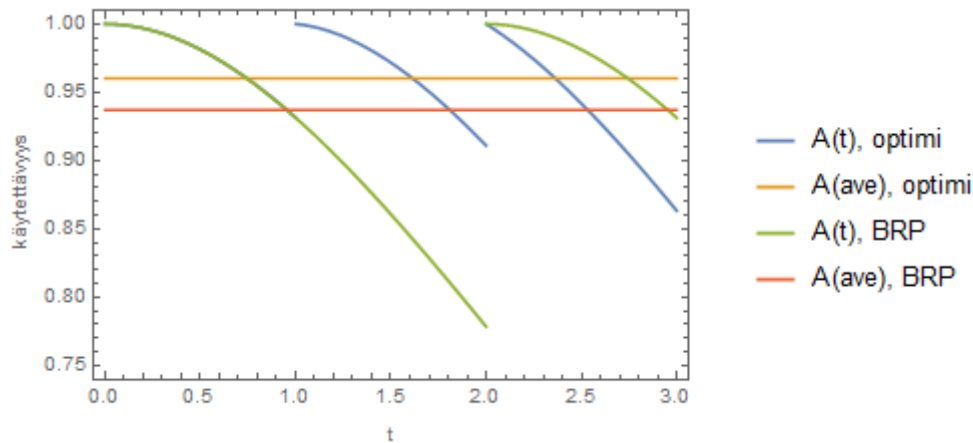


Kuva 6. Huoltojen määrä eri ajanhetkillä ja resurssien määrällä tapauksessa 3

Tapauksessa 3 on kaksi ajanhetkeä, jolloin järjestelmän komponentit on mahdollista huoltaa. Kuvasta 6 huomataan, että tässä tapauksessa eri ajankohtina tehtävien huoltojen määrät poikkeavat toisistaan huomattavasti. Ensimmäisellä mahdollisella huoltoajanhetkellä kannattaa huoltaa komponentteja vasta siinä vaiheessa, kun resurssit riittävät viiden komponentin huoltamiseen. Toisella mahdollisella huoltoajanhetkellä kannattaa huoltaa kaikki järjestelmän komponentit jo siinä vaiheessa, kun resurssit riittävät kuuden komponentin huoltamiseen. Suurimmillaan siis eri ajankohdilla tehtävien huoltamisien lukumäärät poikkeavat neljän komponentin huoltamisen verran. Tämä ilmiö johtuu siitä, että tapauksessa 3 komponenttien vikaantumistaajuus kasvaa ajan edetessä, eli ne ikääntyvät. Tämä tarkoittaa sitä, että komponenttien käytettävyyden on ensimmäisellä mahdollisella huoltoajankohdalla huomattavasti suurempi kuin toisella, jonka vuoksi silloin tehdyllä huoltamisella on pienempi merkitys koko järjestelmän käytettävyydelle.

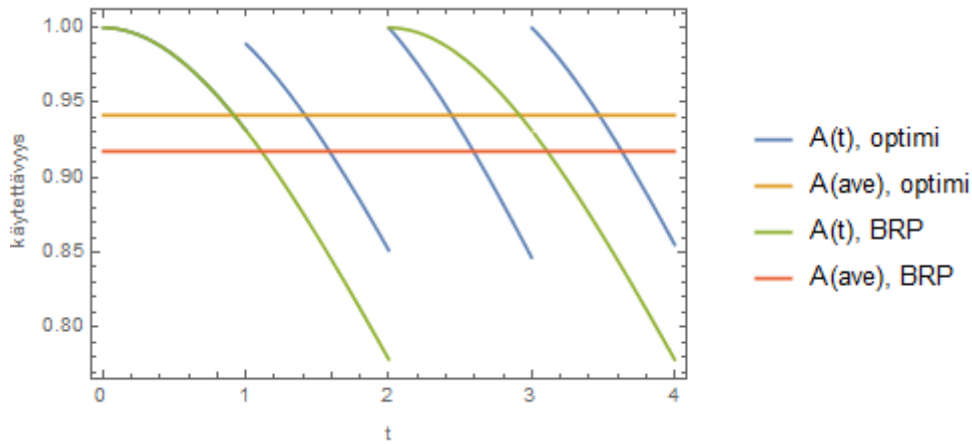
4.4. Vertailu eräperusteiseen korjauspolitiikkaan

Verrataan menetelmällä muodostettua huoltosuunnitelmaa eräperusteiseen korjauspolitiikkaan, jossa jokainen järjestelmän komponentti huolletaan ajanhetkellä $t = 2$. Tämä on toteutettu ratkaisemalla jokaisessa tapauksessa optimaaliset huoltosuunnitelmat kun käytössä on resursseja viiden komponentin huoltamiseen, jotta vertailussa menetelmien välillä ei ole eroa resurssien käytössä. Kuvissa 7, 8 ja 9 esitetään sekä järjestelmän käytettävyyden aikavälillä että järjestelmän keskimääräinen käytettävyyden koko aikavälin aikana kumpaakin menetelmää käyttäen aikavälillä eri tapauksissa.



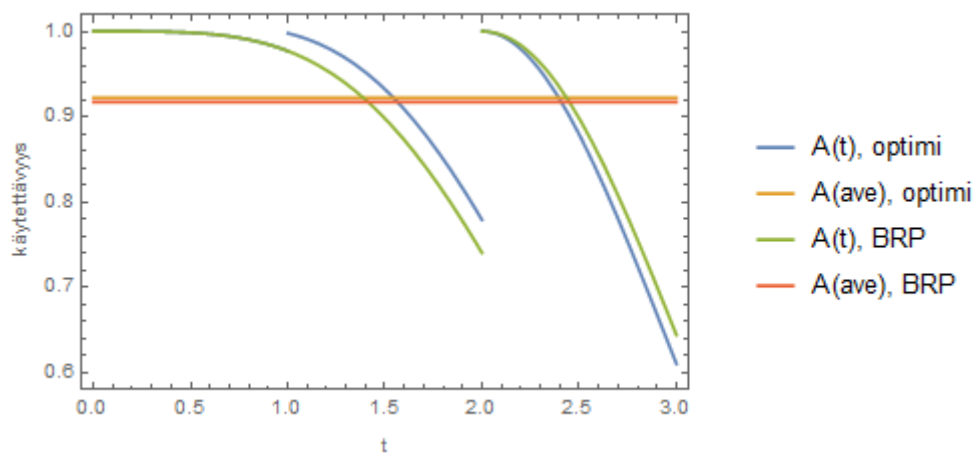
Kuva 7. Järjestelmän käytettävyys optimoituna ja BRP:tä käyttämällä tapauksessa 1

Tapauksessa 1 erikoistyon optimointimenetelmää käyttämällä järjestelmän keskimääräinen käytettävyys aikavälin aikana on 0.968 ja eräperusteista korjauspolitiikkaa käyttämällä se on 0.936. Eräperusteisen korjauspolitiikan keskimääräinen käytettävyys on mahdollista saavuttaa kolmen komponentin huoltamisella, sillä optimointimenetelmällä muodostetun huoltosuunnitelman keskimääräinen käytettävyys resurssien riittäessä kolmen komponentin huoltamiseen on 0.944. Tämän lisäksi optimointimenetelmällä järjestelmän käytettävyys ei laske yhdelläkään hetkellä 0.86 alapuolelle, kun vastaavasti eräperusteisesta korjauspolitiikkaa käyttämällä se on huonoimmillaan alle 0.78. Tämä selittyy sillä, että järjestelmän komponenteilla ei ole sama merkitys järjestelmän käytettävyyden kannalta, ja optimointimenetelmällä ratkaistussa huoltosuunnitelmassa tärkeämmät komponentit voidaan huoltaa kaksi kertaa. Lisäksi tapauksessa 1 molempina ajanhetkinä tehdyillä huolloilla oli yhtä suuri merkitys järjestelmän käytettävyyden kannalta, jonka vuoksi optimointimenetelmän huoltosuunnitelmassa hyödytään huoltamisien hajauttamisesta eri ajanhetkille. Ajanhetkeen $t = 1$ saakka järjestelmän hetkittäinen käytettävyys on sama molempia menetelmiä käyttämällä. Tämä johtuu siitä, että eri huoltosuunnitelmia käyttämällä järjestelmän hetkittäinen käytettävyys eroaa vasta ensimmäisen mahdollisen huoltoajankohdan $t = 1$ jälkeen. Sama ilmiö toistuu myös tapauksissa 2 ja 3.



Kuva 8. Järjestelmän käytettävyys optimoituna ja BRP:tä käyttämällä tapauksessa 2

Tapauksessa 2 erikoistyön optimointimallilla ratkaistua huoltosuunnitelmaa käyttämällä järjestelmän keskimääräinen käytettävyys on 0.942 ja eräperusteista korjauspolitiikkaa käyttämällä järjestelmän keskimääräinen käytettävyys on 0.917. Optimointimallilla muodostetulla huoltosuunnitelmalla järjestelmän keskimääräinen käytettävyys resurssien riittäessä neljän komponentin huoltamiseen on myös 0.917, joten eräperusteisen korjauspolitiikan keskimääräinen käytettävyys on mahdollista saavuttaa yhdellä resurssilla vähemmän. Tämän lisäksi optimoidun huoltosuunnitelman käytettävyys ei laske yhdelläkään ajanhetkellä 0.85 alapuolelle kun eräperusteista korjauspolitiikkaa käyttämällä se on huonoimmillaan alle 0.78. Tässäkin tapauksessa erot järjestelmän käytettävyydessä näitä menetelmiä käyttämällä selittyvät sillä, että optimoidussa huoltosuunnitelmassa tärkeämmät komponentit huolletaan useampia kertoja ja vastaavasti huoltamiset pystytään hajauttamaan eri ajanhetkille.

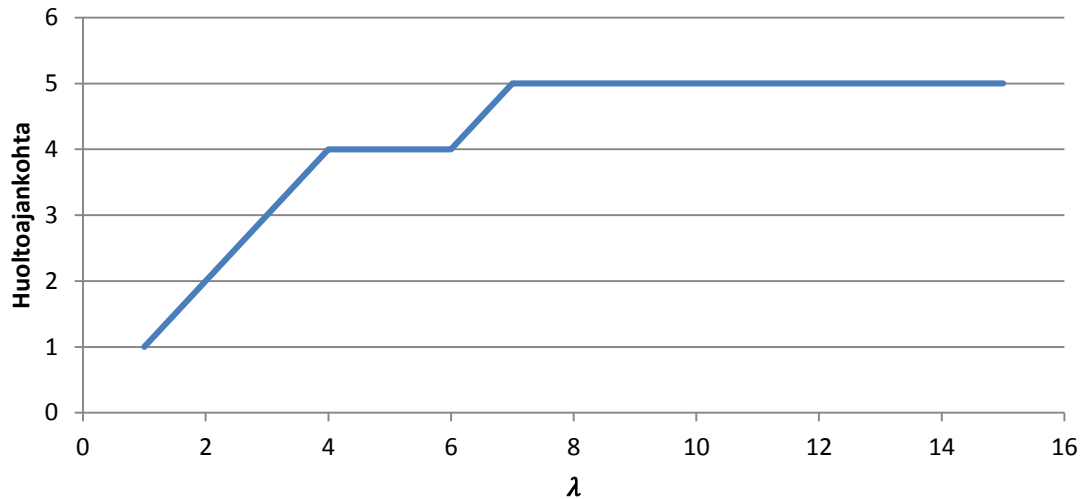


Kuva 9. Järjestelmän käytettävyys optimoituna ja BRP:tä käyttämällä tapauksessa 3

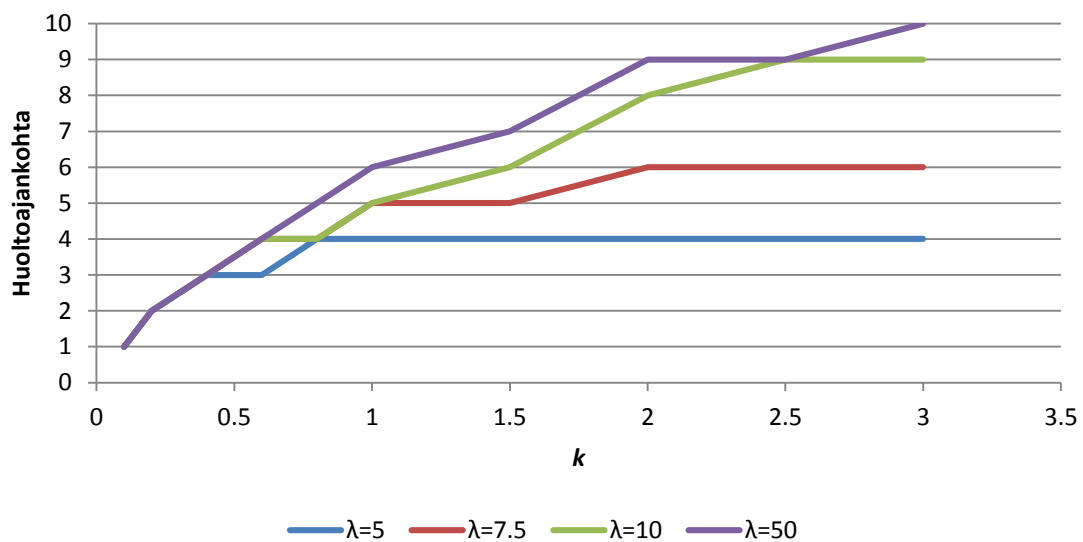
Tapauksessa 3 erikoistyössä muodostetun optimointimenetelmän avulla ratkaistua huoltosuunnitelmaa käyttämällä järjestelmän keskimääräinen käytettävyys on 0.922 ja eräperusteista korjauspolitiikkaa käyttämällä järjestelmän keskimääräinen käytettävyys on 0.917. Eräperusteisen korjauspolitiikan keskimääräistä käytettävyyttä ei voi saavuttaa vähemmillä resursseilla, sillä optimointimenetelmällä ratkaistua huoltosuunnitelmaa käyttämällä resurssien riittäessä neljän komponentin huoltamiseen järjestelmän keskimääräinen käytettävyys on 0.911. Tämän lisäksi millään ajanhetkellä järjestelmän käytettävyydessä ei ole suurta eroa näitä menetelmiä käyttämällä. Tämä johtuu siitä, että tapauksessa 3 järjestelmän komponenttien vikaantumistaajuus kasvaa ajan edetessä, jonka vuoksi toisen huoltoajankohdan merkitys järjestelmän käytettävyydelle on suurempi. Tämän takia optimointimenetelmällä ratkaistussa huoltosuunnitelmassa ajanhetkellä $t = 2$ huolletaan neljä komponenttia. Tämä tarkoittaa sitä, että eräperusteista korjauspolitiikkaa ja optimointimenetelmää käyttämällä huoltosuunnitelmat ovat melkein identtiset. Näiden menetelmien tulokset eroavat vain yhden huollon osalta.

4.5. Jakauman parametrien vaikutus

Tarkastellaan lopuksi Weibullin jakauman parametrien vaikutusta ajanhetkeen, jolloin järjestelmän komponenttien huoltamisesta on eniten hyötyä järjestelmän käytettävyyden parantamiseen. Tämä on toteutettu siten, että komponentit voidaan huoltaa ajanhetkillä $t_h = \{1, 2, \dots, 10\}$ ja huoltosuunnitelman loppuajanhetki on $t_f = 11$. Resurssit riittävät yhden komponentin huoltamiseen. Paras huoltoajanhetki ratkaistaan sekä eri Weibullin jakauman skaalaparametreilla λ muotoparametrin k ollessa 1, jonka tulokset esitetään kuvassa 7 ja eri muotoparametreilla k skaalaparametrin λ ollessa 5, 7.5, 10 ja 50. Tämän tulokset esitetään kuvassa 8.



Kuva 10. Huoltoajankohta Weibullin jakauman skaalaparametrin mukaan



Kuva 11. Huoltoajankohta Weibullin jakauman muotoparametrin mukaan

Kuvista 10 ja 11 huomataan, että sekä Weibullin jakauman skaalaparametrin että muotoparametrin kasvaessa ajankohta, joka on tärkein komponenttien huoltamiseen, siirtyy myöhemmäksi. Skaalaparametrin kasvaessa ajanhetkestä $t = 5$ tulee tärkein komponenttien huoltamisen kannalta eli silloin järjestelmän käytettävyyden kannalta tärkeintä on komponenttien huoltaminen mahdollisimman lähellä aikavälin puoliväliä. Vastaavasti järjestelmän muotoparametrin kasvaminen siirtää tärkeintä huoltoajankohtaa lähemmäksi huoltosuunnitelman loppuhetkeä. Skaalaparametrin suuruus myös vaikuttaa siihen, kuinka lähelle huoltosuunnitelman loppuhetkeä huoltoajankohta siirtyy

muotoparametrin kasvaessa. Tämä johtuu siitä, että muotoparametrin kasvaminen tarkoittaa vikaantumistaajuuden kasvamista ajan edetessä. Mitä suurempi muotoparametrin k arvo on, sitä enemmän komponenttien vikaantumiset painottuvat myöhempään ajanhetkeen. Lisäksi mitä suurempi skaalaparametrin λ arvo on, sitä pienemmällä todennäköisyydellä komponentit vikaantuvat aikaisessa vaiheessa. Tämän vuoksi komponenttien huoltamisesta aikaisessa vaiheessa ei ole yhtä suurta hyötyä kuin myöhäisemmällä ajanhetkellä suoritetuista huoltamisista.

Esimerkkijärjestelmän huoltosuunnitelmia laskettaessa järjestelmän komponentit voidaan huoltaa vain tiettyinä ajanhetkinä. Mahdollisten huoltoajankohtien valintaan käytetty diskretointi on jokseenkin karkea, jonka vuoksi tällä menetelmällä ratkaistut optimaaliset huoltosuunnitelmat saattavat poiketa tilanteesta, jossa komponentit voidaan huoltaa millä tahansa hetkellä huoltosuunnitelman aikavälin aikana. Esimerkiksi luvussa 4.1. esitetyissä tapauksissa 1 ja 3 aikavälin puoliväli $t = 1.5$ ei ole mahdollinen ajanhetki komponenttien huoltamiseen. Joillakin käytettävissä olevien resurssien määrillä sillä ajanhetkellä kannattaisi todennäköisesti huoltaa komponentteja, jos se olisi mahdollista. Käytetty karkea diskretointi mahdollistaa huoltosuunnitelman ratkaisemisen työssä esitetyllä menetelmällä. Optimointitehtävä huoltosuunnitelman ratkaisemiseksi olisi huomattavasti kompleksisempi, jos mahdollisten huoltoajankohtien valitseminen olisi jatkuva-aikaista.

Karkeasta diskretoinnista huolimatta erikoistyön tulokset ovat huomattujen ilmiöiden suhteen robusteja. Huoltamiseen käytettävissä olevien resurssien määrän kasvattamisella on laskeva rajahyöty siinäkin tapauksessa kun komponenttien voidaan huoltaa milloin tahansa huoltosuunnitelman aikavälin aikana. Karkeaa diskretointiakin käyttämällä huoltosuunnitelman optimoimisella on mahdollista saada järjestelmälle suurempi keskimääräinen käytettävyys aikavälille käyttämällä huoltamiseen vähemmän resursseja kuin vaihtamalla kaikki järjestelmän komponentit tietyllä ajanhetkellä. Järjestelmän keskimääräinen käytettävyys kasvaisi vielä enemmän optimoitua huoltosuunnitelmaa käyttämällä silloin, kun komponenttien mahdolliset huoltoajankohdat voidaan valita vapaasti. Lisäksi Weibullin jakauman muoto- ja skaalaparametrin kasvaminen todennäköisesti siirtäisi komponenttien huoltoajankohtia myöhäisemmäksi silloinkin, kun huoltoajankohdat voidaan valita vapaasti.

5. Yhteenveto

Tämän erikoistyön tavoitteena oli perehtyä teknisten järjestelmien huoltojen suunnitteluun ja esitellä menetelmä, jonka avulla on mahdollista ratkaista optimaalinen suunnitelma järjestelmän komponenttien huoltamiseksi. Tätä varten työssä tehtiin kirjallisuuskatsaus aikaisemmin käytettyihin menetelmiin teknisen järjestelmän huoltamiseksi. Työssä muodostettu menetelmä taas oli optimointimalli, jossa tavoitellaan järjestelmän keskimääräisen käytettävyyden maksimoimista tietyllä aikavälillä siten, että järjestelmän huoltamiseen kuuluvien resurssien määrä on rajoitettu. Menetelmän hyödyntäminen järjestelmän huoltosuunnitelman optimoimiseksi vaatii sekä järjestelmän rakenteen että järjestelmään kuuluvien komponenttien ikääntymisen mallintamisen.

Tämän optimointimenetelmän avulla tutkittiin huoltamiseen käytettävissä olevien resurssien määrän vaikutusta siihen, kuinka paljon järjestelmän keskimääräistä käytettävyyttä voidaan parantaa järjestelmän ennaltaehkäisevän huoltamisen avulla. Erikoistyössä havaittiin, että mitä enemmän huoltamiseen on käytettävissä resursseja, sitä vähemmän järjestelmän keskimääräistä käytettävyyttä voidaan parantaa lisäämällä resursseja. Erikoistyössä tutkittiin myös komponenttien ikääntymisen vaikutusta siihen, milloin järjestelmän komponentteja kannattaa huoltaa. Jos komponenttien vikaantumistaajuus on vakio, niin ajankohtien tärkeydessä järjestelmän käytettävyydelle ei ole suurta eroa. Jos taas järjestelmän komponenttien vikaantumistaajuus kasvaa ajan edetessä, komponenttien huoltaminen parantaa järjestelmän käytettävyyttä enemmän, kun ne tehdään myöhemmin.

Erikoistyössä muodostetun optimointimenetelmän tuloksia verrattiin myös yhteen yksinkertaiseen menetelmään komponenttien huoltamiseksi, jossa kaikki järjestelmän komponentit huolletaan samalla ajanhetkellä. Erikoistyössä muodostettu optimointimenetelmä on käyttökelpoinen tähän menetelmään verrattuna, sillä optimointimenetelmää käyttämällä saatiin samalla resurssimäärällä eri tapauksissa huoltosuunnitelma, jota käyttämällä järjestelmän keskimääräinen käytettävyys on samalla resurssimäärällä suurempi.

6. Viitteet

Barata, J., Soares, C. G., Marseguerra, M., & Zio, E. (2002). *Simulation modelling of repairable multi-component deteriorating systems for 'on condition' maintenance optimisation*. Reliability Engineering & System Safety, Vol 76, pp. 255-264.

Barlow, R., & Hunter, L. (1960). *Optimum preventive maintenance policies*. Operations research, Vol 8, pp. 90-100.

Barlow, R. E., & Proschan, F. (1975). *Importance of system components and fault tree events*. Stochastic processes and Their Applications, Vol 3, pp. 153-173.

Chan, G. K., & Asgarpoor, S. (2006). *Optimum maintenance policy with Markov processes*. Electric Power Systems Research, Vol 76, pp. 452-456.

Chitra, T. (2003). *Life based maintenance policy for minimum cost*. In Reliability and Maintainability Symposium, 2003. Proceedings. Annual, pp. 470-474. IEEE.

Dekker, R. (1996). *Applications of maintenance optimization models: A review and analysis*. Reliability Engineering & System Safety, Vol 51, pp. 229-240.

Doostparast, M., Kolahan, F., & Doostparast, M. (2014). *A reliability-based approach to optimize preventive maintenance scheduling for coherent systems*. Reliability Engineering & System Safety, Vol 126, pp. 98-106.

Duarte, J. A. C., Craveiro, J. C. T. A., & Trigo, T. P. (2006). *Optimization of the preventive maintenance plan of a series components system*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol 83, pp. 244-248.

Gao, Y., Feng, Y., Zhang, Z. & Tan, J. (2015). *An optimal dynamic interval preventive maintenance scheduling for series systems*. Reliability Engineering and System Safety, Vol 142, pp. 19-30.

Gebraeel, N., Elwany, A., & Pan, J. (2009). *Residual life predictions in the absence of prior degradation knowledge*. IEEE Transactions on Reliability, Vol 58, pp. 106-117.

Grigoriev, A., van de Klundert, J. & Spieksma, F.C.R. (2006). *Modeling and solving the periodic maintenance problem*. European Journal of Operational Research, Vol 172. pp. 783-797.

- Jiang, R., Kim, M.J. & Makis, V. (2013). *Availability maximization under partial observations*. OR Spectrum, Vol 35, pp. 691-710.
- Jung, W.S. (2015). *A method to improve cutset probability calculation in probabilistic safety assessment of nuclear power plants*. Reliability Engineering & System Safety, Vol 134, pp. 134-142.
- Ke, H. ja Yao, K. (2016). *Block replacement policy with uncertain lifetimes*. Reliability Engineering & System Safety, Vol 148, pp. 119-124.
- Li, Y.F, Zio, E., & Lin Y.H. (2012). *A multi-state physics model of component degradation based on stochastic petri nets and simulation*. IEEE Transactions on Reliability, Vol 61, pp. 921-931.
- Lie, C. H., & Chun, Y. H. (1986). *An algorithm for preventive maintenance policy*. IEEE Transactions on Reliability, Vol 35, pp. 71-75.
- Liesiö, J. (2014). *Measurable multiattribute value functions for portfolio decision analysis*. Decision Analysis, Vol 11, pp. 1-20.
- Mettas, A., & Zhao, W. (2005). *Modeling and analysis of repairable systems with general repair*. In Reliability and Maintainability Symposium, 2005. Proceedings. Annual, pp. 176-182. IEEE.
- Mo, Y., Xing, L., Amari, S.V. & Dugan, J.B. (2015). *Efficient analysis of multi-state k-out-of-n systems*. Reliability Engineering & System Safety, Vol 133, pp. 95-105.
- Modarres, M. (2006). *Risk analysis in engineering: Techniques, tools and trends*, Taylor & Francis Group. Boca Raton, FL.
- Nicolai, R.P. & Dekker, R. (2006). *Optimal maintenance of multi-component systems: A review*. Economic Institute Report, 31.8.2006.
- Pham, H., & Wang, H. (1996). *Imperfect maintenance*. European Journal of Operational Research, Vol 94, pp. 425-438.
- Pinder III, J. E., Wiener, J. G., & Smith, M. H. (1978). *The Weibull distribution: A new method of summarizing survivorship data*. Ecology, Vol 59, pp. 175-179.

Taghipour, S., Banjevic, D., & Jardine, A. K. (2010). *Periodic inspection optimization model for a complex repairable system*. Reliability Engineering & System Safety, Vol 95, pp. 944-952.

Tsai, Y-T., Wang, K-S. & Tsai, L-C. (2004). *A study of availability-centered preventive maintenance for multi-component systems*. Reliability Engineering & System Safety, Vol 84, pp. 261-270.

Wang, H. (2002). *A survey of maintenance policies of deteriorating systems*. European Journal of Operational Research, Vol 139, pp. 469-489.

Wu, S., Chen, Y., Wu, Q., & Wang, Z. (2016). *Linking component importance to optimisation of preventive maintenance policy*. Reliability Engineering & System Safety, Vol 146, pp. 26-32.

Zequeira, R. I., & Berenguer, C. (2004). *Maintenance cost analysis of a two-component parallel system with failure interaction*. In Reliability and Maintainability Symposium, 2004. Proceedings. Annual, pp. 220-225. IEEE.

Zitrou, A., Bedford, T., & Daneshkhah, A. (2013). *Robustness of maintenance decisions: Uncertainty modelling and value of information*. Reliability Engineering & System Safety, Vol 120, pp. 60-71.