

Norbert Papp

KOKOONPANTAVUUTEEN KESKITTYVÄ SUUNNITTELU

Suunnittelusäännöt automatisoidun kokoonpanon
helpottamiseen

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Yliopistotutkija Eeva Järvenpää
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Norbert Papp: Kokoonpantavuuteen keskittyvä suunnittelu – Suunnittelusäännöt automatisoidun kokoonpanon helpottamiseen

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Teknisten tieteiden kandidaattiohjelma, konetekniikka

Toukokuu 2021

Tuotteen kokoonpantavuus on merkittävä tekijä tuotannon kustannuksissa. Kokoonpantavuuteen pystyy vaikuttamaan parhaiten tuotteen suunnittelun aikana. Tuotteen suunnittelu kokoonpantavuuden näkökulmasta eli DFA (Design for Assembly) parantaa tuotteen kokoonpantavuutta merkittävästi. DFA-työkaluja on useita, mutta nykyisissä DFA-työkaluissa on erilaisia ongelmia, joiden takia niiden käyttö ei sovellu hyvin oman tuotteen suunnitteluun. Lisäksi nykyiset DFA-työkalut ovat monimutkaisia suunnittelukäyttöön, koska niissä on esimerkiksi pisteytysjärjestelmiä. Tämä on mahdollisesti este DFA-työkalujen käyttöön tuotteen suunnittelussa.

Tämän työn tavoitteena on laatia helppokäyttöinen DFA-tarkistuslista, jota mekaniikkasuunnittelija voi käyttää tuotesuunnittelun jokaisessa vaiheessa. DFA-tarkistuslistassa on lista väitteitä, joihin suunnittelija pystyy vastata "tosi" tai "epätosi". Useampi "tosi" vastaus tarkoittaa, että DFA-periaatteita on noudatettu hyvin tuotteen suunnittelussa. DFA-tarkistuslista on laadittu automatisoidun kokoonpanon näkökulmasta, mutta kyseinen tarkistuslista soveltuu hyvin myös manuaaliseen kokoonpanoon. DFA-tarkistuslistan väitteet jakautuivat viiteen kategoriaan. Nämä kategoriat ovat koko tuotteen taso, komponentteihin tarttuminen, komponenttien sovittaminen, komponenttien kiinnitys ja erikoistapaukset. Tarkistuslistan tärkeimmät periaatteet kokoonpantavuuden kannalta ovat komponenttien lukumäärä ja kokoonpanoon tarvittavien liikkeiden yksinkertaistaminen.

Tässä työssä tehtiin kirjallinen selvitys olemassa olevista DFA-työkaluista ja tutkittiin niiden periaatteita sekä niiden hyviä ja huonoja puolia. Näistä DFA-työkalujen periaatteista laadittiin DFA-tarkistuslista, jonka on tarkoitus olla helppokäyttöinen ja sopia useaan tuotekategoriaan. Lopuksi laadittua tarkastuslistaa sovellettiin olemassa olevaan tuotteeseen, joka oli Konecranes Oyj:n nosturin sähkömoottori.

Avainsanat: DFA, kokoonpantavuus, tuotesuunnittelu, kokoonpano

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	Johdanto	1
2.	Kokoonpantavuus ja sen analysointimenetelmät	3
2.1	Kvalitatiivinen tarkastelu	3
2.1.1	SINTEF-menettelmä	3
2.1.2	DFA-talo	4
2.1.3	Hitachin kokoonpanotarkastelumenettelmä	4
2.2	Kvantitatiivinen tarkastelu	5
2.2.1	Boothroydin ja Dewhurstin menettelmä.	5
2.2.2	Lucas-menettelmä.	6
2.2.3	Tarralappumenettelmä	7
3.	Suunnittelu kokoonpantavuuden näkökulmasta.	9
3.1	Komponenttitason DFA-periaatteet	9
3.1.1	Komponenttien käsittely	9
3.1.2	Komponenttien kiinnitys	11
3.1.3	Komponenttien lukumäärä	11
3.2	Tuotetason DFA-periaatteet.	12
4.	Kokoonpantavuuden tarkistuslista	14
5.	Tuote-esimerkki	17
6.	Yhteenveto	19
	Lähteet	20
	Liite A: Tarkistuslista englanniksi	21
	Liite B: Konecranes Oyj:n sähkömoottorin osat.	22
	Liite C: Tarkistuslistan soveltaminen Konecranes Oyj:n sähkömoottoriin	23

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AEM	Assembly evaluation method
BDI	Boothroyd & Dewhurst Incorporated
DFA	Design for assembly
DFM	Design for manufacturing
DFMA	Design for manufacturing and assembly

1. JOHDANTO

Yritysten välinen kilpailu asiakkaista lisää paineita asiakastyytyväisyyteen. Yksi merkittävä tekijä asiakkaiden tyytyväisyyteen on tuotteen hinta. Tuotteen hintaan pystyy vaikuttamaan suunnittelemalla tuote siten, että sen kokoonpano on kustannustehokasta. Kustannustehokkuus saavutetaan vähentämällä osien kustannuksia sekä niihin tarvittavien työkalujen kustannuksia. Kustannustehokkuuteen pystyy myös vaikuttamaan suunnittelemalla tuote nopeasti kokoonpantavaksi, tällöin tarvitaan vähemmän tuotantolinjoja, joka laskee tuotannon kustannuksia ja sitä kautta tuotteen hintaa. Jopa 85 % tuotteen valmistuskustannuksista määräytyy suunnitteluvaiheessa. (Jung & Billatos 1993, s. 245)

Kilpailukyvyn merkittävä tekijä on myös yrityksen nopeus saada tuote markkinoille, tai toimittaa asiakkaalle räätälöityä tuotetta (Eskilander 2001, s. 13). Tähän pystyy vaikuttaa välttämällä suunnitteluvaiheen virheitä, jotka johtaisivat useampaan iteraatioon. Monessa tuotteessa on yksi tai useampi piirre, joka vaikeuttaa tuotteen kokoonpanoa. Näitä virheitä voidaan välttää soveltamalla kokoonpantavuuteen keskittyvää suunnittelua (DFA, engl. Design for Assembly). Käsitettä DFA käytettiin ensimmäistä kertaa 1960-luvulla. (Bralla 1998, s. 1.67-1.68) Nykyään kokoonpantavuuteen keskittyvää suunnittelua (DFA) yhdistetään usein valmistukseen keskittyvään suunnitteluun (DFM, engl. Design for Manufacturing), jolloin käytetään käsitettä DFMA (Design for Manufacturing and Assembly). Esimerkiksi Boothroyd & Dewhurst (1987) ja Thompson et. al (2018) eivät käsittele DFA- ja DFM-periaatteita erikseen, vaan puhuvat niistä yhtenä.

1980-luvulla kehitettiin työkaluja, jotka helpottavat DFA-periaatteiden soveltamisen tuotteen suunnitteluvaiheessa (Dalglish et al. 2000, s. 18; Eskilander 2001, s. 21). Muun muassa Boothroyd & Dewhurst, Langmoen & Ramsli ja Hitachi Ltd ovat kehittäneet työkaluja DFA-periaatteiden soveltamiseen tuotteen suunnitteluvaiheessa (Leaney & Wittenberg 1992, s. 8). Tuotantotekniikan kehittyminen antaa lisää vapautta suunnittelijoille tuotteen suunnitteluun kokoonpantavuuden näkökulmasta, minkä seurauksena osa vanhoista DFA-työkaluista ovat vanhentuneita eivätkä enää sovellu nykyajan teollisuuteen. (Moultrie & Maier 2014, s. 44)

Tämän työn tavoitteena on laatia nopea ja helppokäyttöinen DFA-tarkistuslista, jonka mekaniikkasuunnittelija voi käyttää uuden tuotteen suunnittelussa tai olemassa olevan tuotteen kehittämisessä. Työssä vastataan seuraaviin kysymyksiin:

- Mitä ovat hyvät DFA:n periaatteet?
- Minkälaisia väitteitä kyseisistä DFA-periaatteista voidaan muotoilla DFA-tarkistuslistaa varten?

Tässä työssä tehdään kirjallinen selvitys olemassa olevista DFA-työkaluista, joista kerätään hyvät DFA-periaatteet tarkistuslistaa varten. Tarkistuslistassa esiintyy useita väitteitä, joihin suunnittelija voi vastata "tosi" tai "epätosi", jossa "tosi" tarkoittaa hyvää suunnittelua kokoonpantavuuden näkökulmasta. Tarkistuslistan on tarkoitus olla itsenäinen DFA-työkalu, tarkistuslistassa ei ole erillistä pisteytysjärjestelmää tai muita arviointikriteerejä. Tarkistuslistan kysymykset ovat muotoiltu siten, että ne samalla ohjeistavat hyvään tuotesuunnitteluun kokoonpantavuuden näkökulmasta. Tarkistuslistan on tarkoitus olla apu-työkalu, jolla suunnittelija pystyy määrittämään kuinka hyvin DFA-periaatteita on sovellettu tuotteen suunnittelussa. Tässä työssä myös testataan laadittua tarkastuslistaa olemassa olevan tuotteen analysointiin, joka on tässä tapauksessa nosturin moottori.

Tämä työ keskittyy ensisijaisesti tuotteen mekaanisiin ominaisuuksiin ja automatisoituun kokoonpanoon, vaikka suurin osa DFA-periaatteista soveltuu myös manuaaliseen kokoonpanoon. Lisäksi tämä työ ei ota huomioon taloudellisia eikä valmistusmenetelmällisiä näkökulmia.

Työn luvussa 2 kerrotaan kokoonpantavuudesta, sekä erilaisista kokoonpantavuuden tarkistusmenetelmistä. Luvussa 3 kerrotaan, mitä suunnitteluun liittyviä sääntöjä pystyy laatimaan luvun 2 tarkistusmenetelmistä, lisäksi kerrotaan mitä suunnitteluun liittyviä asioita luvun 2 tarkistusmenetelmät eivät käsittele. Luvussa 4 laaditaan DFA:n tarkistuslista ja kerrotaan, miksi kukin kysymys on lisätty mikäli nämä ei ole avattu luvussa 2 tai 3. Luvussa 5 sovelletaan luvussa 4 laadittua tarkistuslistaa olemassa olevaan tuotteeseen. Viimeinen luku on kandidaatintyön yhteenveto.

2. KOKOONPANTAVUUS JA SEN ANALYSOINTIMENETELMÄT

Kokoonpantavuus tarkoittaa, että kuinka nopea ja helppo on tuotteen kokoonpano. DFA ottaa huomioon suunnitteluvaiheessa kokoonpanoon liittyvät vaatimukset, kuten kustannuksen ja nopeuden. Suurin osa tuotteen kustannuksista määräytyy sen valmistuksesta, kun taas kokoonpanon kustannukset voivat olla jopa 30–50 % valmistuskustannuksista (Hosnedl et al. 2016, s. 372).

Boothroyd ja Redford (1968) tiedostivat, että DFA- ja DFM-periaatteiden noudattaminen suunnitteluvaiheessa vaikuttaa huomattavasti enemmän valmistus- ja asennuskustannuksiin kuin tuotantokoneiston hankkiminen (Bralla 1998, s. 1.68). DFA-periaatteiden soveltamiseen on useita menetelmiä. Eskilander (2001) jakaa DFA-analyysimenetelmät kahteen pääryhmään: kvalitatiivisiin tarkastusmenetelmiin ja kvantitatiivisiin tarkastusmenetelmiin. Menetelmäkategoriat ja esimerkkejä kummastakin kategoriasta käsitellään tulevissa aliluvuissa.

2.1 Kvalitatiivinen tarkastelu

Eskilander (2001) määrittelee kvalitatiivisen tarkastelun olevan kriteerilista, joilla määritellään, kuinka helppoa on tuotteen kokoonpano. Tuotetta on mahdollista parantaa DFA:n näkökulmasta, jos joku kvalitatiivisen tarkastelun kriteereistä ei täyty. Kvalitatiivisen tarkastelun vaatimukset antavat tietoa ratkaisuksista, jotka noudattavat DFA-periaatetta hyvin. Tämä voi olla hyödyllistä tuotteen suunnittelun alkuvaiheessa. (Eskilander 2001, s. 39) Esimerkkejä kvalitatiivisista tarkastelumenetelmistä ovat SINTEF, DFA-talo ja Hitachi AEM.

2.1.1 SINTEF-menetelmä

Langmoen ja Ramsli (1983) ovat laatineet kriteerejä kokoonpantavuuteen. Tämän menetelmä on nimeltään SINTEF-menetelmä. SINTEF-menetelmä perustuu pisteytysjärjestelmään, jossa tarkistetaan, mitä tuotteen kokoonpanoon liittyviä ominaisuuksia on kyseisessä tuotteessa ja jossa jokaiselle ominaisuudelle on oma lukuarvo sen mukaan, kuinka helppoa sitä olisi automatisoida. Mahdolliset pisteet yksittäiselle ominaisuudelle ovat 0, 1,

2, 4 ja 8. (Eskilander 2001, s. 41) Esimerkkejä tuotteen kokoonpantoon liittyivistä ominaisuuksista ovat komponentin massa tai komponentin iskunkestävyys (Eskilander 2001, s. 42).

Numero 0 tarkoittaa, että tarkasteltava ominaisuus on helppo automatisoida ja isompi numero tarkoittaa vaikeampaa automatisointia. Numero 8 tarkoittaa, että ominaisuus on helpompi toteuttaa manuaalisesti. Kokoonpanoon liittyivistä ominaisuuksista on olemassa oma pisteytystaulukkonsa sekä osan että koko tuotteen tasolla. Mikäli yksikin osan arviointikriteereistä saa neljä tai kahdeksan pistettä tai tuotteen ja osien keskiarvopisteet ovat yli kaksi, tuotteen uudelleensuunnittelu saattaa olla tarpeellinen automatisoituun kokoonpanoon. SINTEF-menetelmän ongelma on, että se ei pysty määrittämään jotain automatisoidun kokoonpanon haasteita. Lisäksi SINTEF-menetelmä ei tarjoa mahdollisia parannuksia suunnitteluun. (Langmoen & Ramsli 1983, Eskilander 2001 mukaan)

2.1.2 DFA-talo

Rampersadin (1993) kehittämä DFA-House eli DFA-talo -menetelmä perustuu SINTEF-menetelmään ja alaluvussa 2.4 käsiteltävään Boothroydin ja Dewhurst DFMA:n DFA-menetelmään (Eskilander 2001, s. 44). DFA-talo -menetelmässä pisteytystaulukko on erilainen kuin SINTEF-menetelmässä, koska mahdolliset pisteet ovat 1, 2, 4 ja 6. Pisteytystaulukkoja on kahden sijaan kolme, ja ne jakautuvat kokoonpano, komponentti-, ja prosessiominaisuuksien mukaan. (Rampersad 1993, s. 30)

Toisin kuin SINTEF-menetelmässä, DFA-talo -menetelmässä osa kriteereistä on painotettu merkittävämmäksi kuin toiset. Tuotteen eri ominaisuuksille on olemassa omia objektiivisia arvoja, jotka ovat annettu Rampersadin laatimassa laajassa taulukossa (Rampersad 1993, s. 31). Tällä objektiivisella arvolla kerrotaan ominaisuuden vaikeuspiste. Esimerkiksi joustava komponentti saa 4 pistettä taulukosta, ja sen objektiivinen arvo on 96, joten sen kokonaispiste on $4 \cdot 96 = 384$ pistettä (Rampersad 1993, s. 33). DFA-talo -menetelmässä on samat ongelmat kuin SINTEF-menetelmässä (Eskilander 2001, s. 47).

2.1.3 Hitachin kokoonpanotarkastelumenetelmä

Vuonna 1967 Hitachin kehittämä kokoonpanotarkastelumenetelmään (AEM, engl. Assembly Evaluation Method) tehtiin parannuksia noin kymmenen vuotta myöhemmin. Uudistettu AEM sisältää Hitachin arviointilomakkeeseen, johon syötetään tuotteen komponenttien nimet, niiden lukumäärät ja muut kiinnitykseen olennaiset tiedot. Tietokone laskee näiden perusteella tuotteen kaksi indeksiä: kokoonpantavuusindeksi ja kokoonpanon hinnan suhdeluku. Kokoonpantavuusindeksi voi saada lukuarvon 0-100, jossa 100 tarkoittaa ideaalitulannetta eli tuotteen komponenttien kokoonpanoon riittää yksi lineaarinen liike komponenttia kohden. Kokoonpanon hinnan suhdeluku kertoo, kuinka suuri prosentuaa-

linen säästö on mahdollista parantamalla tuotteen kokoonpantavuutta. (Leaney & Wittenberg 1992, s. 9-11)

Hitachi AEM ottaa huomioon pelkästään komponentin sovituksen, komponentin syöttö ja kiinnitys jäävät huomioimatta. Tämän seurauksena on mahdollista, että tuotteen kokoonpantavuuden parantamisessa jää selkeitä puutteita. Lisäksi Hitachi AEM ei anna parannusehdotuksia tuotteen suunnittelulle. (Eskilander 2001, s. 49)

2.2 Kvantitatiivinen tarkastelu

Eskilander (2001) määrittelee, että kvantitatiivinen tarkastelu tarkoittaa tuotteen tarkastelua siten, että kuinka kauan kestää tuotteen kokoonpanossa tai kuinka paljon resursseja tuotteen kokoonpanoon tarvitaan. Kvantitatiivinen eli määrällinen tarkastelu ei ota kantaa toivotuista tuloksista, eikä kvantitatiivisella tarkastelulla saa lisätietoa suunnittelun toivotusta toteuttamistavasta. Kvantitatiivinen tarkastelu soveltuu vain valmiin tuotteen analysoimiseen, sillä määrälliset ominaisuudet eivät ole tiedossa vielä suunnittelun alkuvaiheessa. Esimerkkejä kvantitatiivisista tarkastelumenetelmistä ovat BDI:n DFA-menetelmät, Lucas-DFA ja tarralappumenetelmä. (Eskilander 2001, s. 39)

2.2.1 Boothroydin ja Dewhurstin menetelmä

Boothroyd ja Dewhurst Incorporated eli BDI on kehittänyt useampia DFA-menetelmiä erilaisiin kokoonpanoihin, kuten manuaalinen ja automatisoitu. Jokainen DFA-menetelmä analysoi, onko tuotteen komponentteja mahdollista integroida toisiin komponentteihin tai eliminoida kokonaan, sekä mahdollisuuden komponentin uudelleensuunnitteluun kokoonpantavuuden parantamiseksi. Molempien ominaisuuksien tarkasteluun on kolme kysymystä avuksi:

- Onko komponentin tarkoitus olla liikkuva suhteessa toisiin komponentteihin tuotteen normaalin toiminnan aikana?
- Täytyykö komponentin olla valmistettu tietyistä materiaalista eli onko tarpeen pitää komponentti erillään muista komponenteista?
- Pitääkö komponentin olla erillinen muista komponenteista, koska tuotteen kokoonpano tai purku olisi mahdotonta muuten?

Komponentti on mahdollista eliminoida tai integroida toiseen komponenttiin, mikäli vastaus jokaiseen yllä mainitusta kysymyksistä on "ei". (Boothroyd 1987, s. 3)

BDI:n DFA-analyysi manuaalisen kokoonpanon tapauksessa perustuu komponenttien geometriseen analyysiin. Analyysissä katsotaan, kuinka pitkään kestää komponentin kokoonpano, joka muodostuu käsittelystä ja paikalle laittamisesta. Komponentin monimutkaisuus lisää sen kokoonpanoaikaa. Komponenttien geometrisen analyysin jälkeen summataan

komponenttien kokoonpanoajat ja tarkastellaan tilannetta, jossa komponenttien lukumäärä on vähennetty yllä mainitun kolmen kysymyksen perusteella. Näiden lukuarvojen avulla pystyy laskemaan indeksin, DFA-indeksin. DFA-indeksi lasketaan seuraavan kaavan avulla (Eskilander 2001, s. 52):

$$DFA - indeksin = \frac{3 * komponenttien\ teoreettinen\ lukumaara}{kokoonpanoaikojen\ summa} \quad (2.1)$$

Komponenttien teoreettinen lukumäärä tarkoittaa, että kuinka monta sellaista komponenttia on tuotteessa, jota ei pysty eliminoida tai integroida toiseen komponenttiin yllä mainittujen kysymysten perusteella. Matala DFA-indeksi kertoo tuotteen olevan vaikeasti kokoonpantavissa sekä kokoonpantavuuden parantamisen mahdollisuudesta. Kokoonpantavuutta pystyy parantaa vähentämällä kokoonpanoaikojen summaa, sillä se on DFA-indeksin kaavan nimittäjä. BDI:n DFA-indeksissä numero 3 on ideaalisen komponentin kokoonpanoaika sekunteina. Automatisoidussa kokoonpanossa BDI:n DFA-menetelmä eroaa manuaalisesta kokoonpanosta hieman. DFA-indeksiä laskiessa ei käytetä kokoonpanoaikojen summaa, vaan komponentin automatisoidun käsittelyn ja asettamisen kustannuksia. BDI:n tietokannasta löytyy manuaalisen kokoonpanon kokoonpanoajat sekä automatisoidun kokoonpanon kustannukset eri kappaleille. (Boothroyd & Dewhurst 1984, Eskilander 2001 mukaan)

2.2.2 Lucas-menetelmä

Lucas-DFA perustuu BDI:n DFA-menetelmään, molemmat keskittyvät komponenttien lukumäärän vähentämiseen ja komponenttien geometriseen analyysiin. Lucas DFA koostuu kolmesta analyysin vaiheesta: toiminnallinen analyysi, syöttöanalyysi ja sovitusanalyysi. Jokainen analyysin vaihe palauttaa oman indeksin, joiden avulla kvantitatiivinen tarkastelu toteutuu. (Leaney & Wittenberg 1992, s. 14)

Toiminnallinen analyysi tarkoittaa komponenttien jako A- ja B-kategoriaan. Kategorian A komponentit ovat välttämättömiä tuotteen vaatimusten toteutumiseen, joten niitä ei ole mahdollista eliminoida. Kategorian B komponentit eivät ole välttämättömiä ja voi eliminoida suunnitteleamalla tuote eri tavalla. Kategorisoinnin jälkeen pystyy laskea suunnittelun hyötysuhteen indeksi seuraavan kaavan mukaisesti:

$$Suunnittelun\ hyötysuhteen\ indeksi = \frac{A}{A + B} \quad (2.2)$$

jossa A ja B ovat kummankin kategorian komponenttien lukumäärä. Alle 60 % suunnittelun hyötysuhteen indeksi kertoo, että tuotetta pystyisi suunnitella paremmin kokoonpantavuuden näkökulmasta (Egan 1997, Eskilander 2001 mukaan).

Syöttöanalyysi tarkoittaa komponentin syöttämisen tai käsittelyn haastavuuden tarkastelua. Automatisoidussa kokoonpanossa komponentti täytyy syöttää tavalla, jonka kokoonpanojärjestelmä osaa käsitellä ilman ajallisia lisäkustannuksia. Jokaiselle komponentille on olemassa syöttöindeksi, jonka minimiarvo on yksi. Korkeampi syöttöindeksin arvo tarkoittaa, että komponenttia on hankalampaa syöttää oikein tuotantojärjestelmälle. Komponenttien syöttöindekseistä ja A komponenteista pystyy laskea syöttösuhteen seuraavan kaavan avulla:

$$\text{Syöttösuhde} = \frac{\text{Syöttöindeksien summa}}{A \text{ komponenttien lukumaara}} \quad (2.3)$$

Syöttösuhteelle yli 2,5:n lukuarvo tarkoittaa, että tuotteen komponentteja pitäisi suunnitella paremmin, jotta tuotantolinjalle syöttö olisi sujuvampi. (Leaney & Wittenberg 1992, s. 14)

Sovitusanalyysi tarkoittaa tarkastelua, kuinka hankalaa on syötetty komponentti sovittaa tuotteeseen. Sovitusanalyysi toteutetaan samanlailla kuin syöttöanalyysi, mutta komponenttien syöttöindeksien sijaan käytetään komponenttien sovitusindeksiä. Sovitusindeksin minimiarvo on yksi ja korkeampi arvo tarkoittaa komponentin hankalampaa sovittamista tuotteeseen. Sovitussuhde lasketaan kaavan

$$\text{Sovitussuhde} = \frac{\text{Sovitusindeksien summa}}{A \text{ komponenttien lukumaara}} \quad (2.4)$$

mukaisesti. Myös sovitussuhteelle yli 2,5:n lukuarvo tarkoittaa parantamisen mahdollisuutta tuotteen suunnittelussa. (Leaney & Wittenberg 1992, s. 14)

Lucas-DFA tarkastelee tuotteen kokoonpantavuutta pelkästään tuotteen komponenttien tasolla, koko tuotteen tason tarkastelu puuttuu kokonaan. Tämän lisäksi Lucas-DFA ei ole tarpeeksi tarkka määrittämään, että missä vaiheessa tuotteen kokoonpanossa on haasteita. (Eskilander 2001, s. 55)

2.2.3 Tarralappumenetelmä

Vuonna 2000 Appleton ja Garside kehittivät DFA-menetelmän, joka on Cambridgen yliopistossa tunnettu nimellä tarralappumenetelmä (engl. post-it note method). Tarralappumenetelmä on ensisijaisesti suunniteltu tiimikäyttöön soveltuvaksi. Tarralappumenetelmässä on useampi vaihe, joista jokainen muodostaa oman rivin matriisissa. Ensimmäinen vaihe on purkaa tuote palasiksi ja järjestellä komponentit räjäytyskuvamaisesti. Jokainen komponentti nimetään keltaiselle tarralapulle ja asetetaan kyseisen komponentin viereen. Tämän jälkeen jokaisen komponentin kokoonpanoaika mitataan ja kirjataan vaaleanpunaiselle tarralapulle. Oransseille tarralapuille merkataan komponenttiin liittyviä

huomioita, esimerkiksi jos komponenttia on vaikea sovittaa tuotteeseen. Seuraava vaihe on komponenttien jaottelu korvaamattomiin ja korvattaviin, tämä on samanlainen kuin Lucas-DFA menetelmän A- ja B- komponentteihin jakoa. A-komponentit merkataan punaisella pisteellä ja B-komponentit vihreällä pisteellä. B-komponenttien parannusehdotukset muodostetaan BDI:n kysymysten mukaisesti ja kirjataan siniselle tarralapulle. Seuraava rivi muodostuu A-komponenttien tarralapuista. B-komponenttien parannukset aiheuttavat muutosta kokoonpano prosessissa, jonka seurauksena seuraava rivi on uudistettu kokoonpano. Lopuksi jokaiselle komponentille tehdään Lucas-DFA menetelmän mukaan syöttö- ja sovitusanalyysi. Syöttöanalyysissä merkataan helposti syötettävät kappaleet vihreällä H-kirjaimella, ja hankalasti syötettävät punaisella, sovitusanalyysissä toistetaan sama I-kirjaimella. Matriisin viimeinen rivi muodostaa syöttö- ja sovitusanalyysin jälkeisistä parannuksista. (Appleton & Garside 2000, Moultrie & Maier 2014 mukaan)

Tarralappumenetelmä ei tuo esille uusia DFA-periaatteita, vaan soveltaa olemassa olevia DFA-menetelmiä ja niiden periaatteita. Tarralappumenetelmä yhdistää DFA-talon ja BDI:n hyvät puolet, tarralappumenetelmän huono puoli on sen pitkäkestoisuus, sillä yhteensä tehdään kolme erilaista analyysiä yhden iteraation aikana. (Moultrie & Maier 2014, s. 48)

Moultrie (2014) kehitti yksinkertaistetun tarralappumenetelmän, johon on kehitetty oma pisteytysjärjestelmä, jotta syöttö- ja sovitusanalyysit olisivat mahdollisia ilman muiden menetelmien työkaluja. Pisteytysjärjestelmä perustuu Smithin (1998) DFA-periaatteiden opeusmenetelmään. Yhdistetyssä tarralappumenetelmässä tarralappuja käytetään eri tavalla, käytetään vain yhdenvärisiä tarralappuja eikä niistä muodosteta matriiseja. Jokaiselle komponentille, alikokoonpanolle ja prosessille on oma tarralappu. Komponenttien ja alikokoonpanojen tarralappuihin merkataan, onko osa välttämätön sekä kuinka hankala on komponentin syöttö, sovitusta ja kiinnitys. Prosessien tarralappuihin merkataan prosessin tyyppi ja sykli aika. Moultrien kehittämä pisteytysjärjestelmä on tukena syöttö-, sovitusta ja kiinnitysanalyysiin sen varalta että suunnittelutiimin jäsenillä on erimielisyyksiä, kuinka hankala tuote on käsitellä. Tämän jälkeen tehdään DFA-analyysi, joka koostuu seuraavista vaiheista: aseta tavoitteet, pura tuote, määrittele A-komponentit, kokoa tuote uudestaan ja ajasta kokoonpano, kritisoi nykyistä toteutusta, suunnittele tuote uudelleen. Yksinkertaistettu tarralappumenetelmä soveltuu parhaiten alle 10 hengen suunnittelutiimiin. Perinteinen tarralappumenetelmä soveltuu paremmin yli 10 hengen suunnittelutiimiin. (Moultrie & Maier 2014, s. 50 – 55)

3. SUUNNITTELU KOKOONPANTAVUUDEN NÄKÖKULMASTA

Luvussa 2 esiintyvät DFA-menetelmät tarkastelevat DFA-periaatteiden noudattamista eri tavoilla. Kvantitatiivisia menetelmiä yhdistää tarve ylimääräisten komponenttien minimointiin. Kvalitatiivisissa menetelmissä on erilaisia arviointimenetelmiä. Parhaiten soveltuva kvalitatiivinen menetelmä riippuu kyseessä olevasta tuotteesta.

Eskilander (2001) väittää, että pelkästään sääntölista ei toimi DFA-työkaluna. Sääntölistan laatiessa säännöt jäävät joko liian yleistäviksi tai sääntöjä on liikaa, jolloin sääntölista ei ole hyödyllinen suunnittelijan DFA-työkaluna. Eskilanderin (2001) mielestä ideaalinen DFA-työkalu perustuu kvalitatiivisten menetelmien yhdistelmään ja kvantitatiivisista menetelmistä kerätystä sääntölistasta, joka täydentää kyseisen DFA-työkalun kvalitatiivisen tarkastelun.

3.1 Komponenttitason DFA-periaatteet

Tuotteen komponenteissa on useita seikkoja, joita tulisi huomioida DFA-periaatteita noudattaessa. Tuotteen komponenttien suunnittelulla pystyy vaikuttamaan merkittävimmin tuotteen kokoonpantavuuteen. Suurin osa kvantitatiivisista ja kvalitatiivisista tarkastelumenetelmistä keskittyvät enemmän yksittäisiin komponentteihin kuin koko tuotteeseen.

3.1.1 Komponenttien käsittely

Komponenttien käsittely tarkoittaa komponentin syöttöä tuotantojärjestelmään ja komponentin siirtämistä tuotantojärjestelmän sisällä oikeaan paikkaan kokoonpanossa. Lucas DFA-menetelmässä näitä esitetään syöttö- ja sovitusindekseillä. Langmoen ja Ramsli määrittelevät joustavan automatisoidun tuotantojärjestelmän koostuvan vähintään yhdestä robotista ja muutamasta syöttölaitteesta (Langmoen & Ramsli 1983, Eskilander 2001 mukaan). Robotti vastaa komponentin käsittelystä ja syöttölaitteet vastaavat komponentin syötöstä.

SINTEF-menetelmän komponentin pisteytystaulukon mukaan komponentin syöttö on helppoa, jos komponentti on valmiiksi oikeassa orientaatioissa ja se on toimitettu useam-

man kappaleen erässä samassa paketissa. Jokaisen kappaleen erillinen paketointi ja väärä orientaatio hankaloittavat syöttöä tuotantojärjestelmään. (Langmoen & Ramsli 1983, Eskilander 2001, s. 43 mukaan) DFA-talo menetelmän komponentin pisteytystaulukon mukaan komponentin syöttö on helpompaa, jos syötettävät komponentit eivät ole päällekkäin tai solmussa (Rampersad 1993, s. 33). Joustavat kappaleet menevät helposti solmuun käsittelyssä (Bralla 1998, s. 7.15).

On mahdollista, että eri komponenttien geometriset piirteet ovat niin erilaisia, että yhdellä työkalulla ei pysty ottaa kaikista kiinni. Tällöin työkalunvaihto on tarpeellinen, joka nostaa kokoonpanoaikaa (Eversheim et al 1982, Eskilander 2001, s. 176 mukaan).

Komponentin sovitukseen kuuluvat komponentin tarttuminen, siirtäminen ja paikalle asettaminen. Komponentin tarttumiseen vaikuttavat tekijät ovat komponentin geometriset piirteet ja komponentin materiaalin ominaisuudet. Komponenttiin tarttuminen on helpompaa, jos sillä on selkeitä tarttumispintoja. Tarttumispintojen pitäisi olla samansuuntaiset ja hyvin sijoiteltuja komponentin massakeskipisten suhteen. (Rampersad 1996, s. 14) Tiivistäminen ja kaapelit ovat materiaaliominaisuuksiensa takia vaikeita ottaa kiinni, sillä ne ovat elastisia kappaleita, jolloin robotin tarttujan kohdistama voima riittää elastiseen muodonmuutokseen. Kaapeleiden korvaaminen piirilevyillä ja liitännöillä helpottavat elektronisten komponenttien käsittelyä merkittävästi (Rampersad 1996, s. 14). DFA-talo menetelmän prosessiominaisuustaulukon mukaan komponentin käsittely hankaloituu, jos sen tai muiden komponenttien geometriset ominaisuudet estävät lineaarista liikettä komponentin asetteluvaiheessa. DFA-talo menetelmän komponentti- ja prosessiominaisuuksien taulukoiden mukaan seuraavat ominaisuudet hankaloittavat komponentin siirtämistä ja paikalle asettamista:

- Komponentin massa on erittäin suuri tai erittäin pieni.
- Komponentti on pitkä.
- Komponentti ei ole symmetrinen.
- Toleranssi komponentin sovitukseen tuotteeseen on pieni.
- Komponentissa ei ole viisteitä komponentin kohdistamista varten.

SINTEF-menetelmän komponentin pisteytystaulukossa samat ominaisuudet vaikuttavat komponentin sovitukseen. Näiden lisäksi SINTEF-menetelmän mukaan sovitusta vaikeuttava tekijä on, että useampi komponentti pitää sovittaa samanaikaisesti tuotteeseen. DFA-talo menetelmän mukaan komponentin symmetria helpottaa kokoonpanoa. On kuitenkin tapauksia, jolloin komponentin symmetria ei ole mahdollinen. Tässä tapauksessa on hyvä tehdä komponentista selkeästi epäsymmetrisen (Eskilander 2001, s. 173).

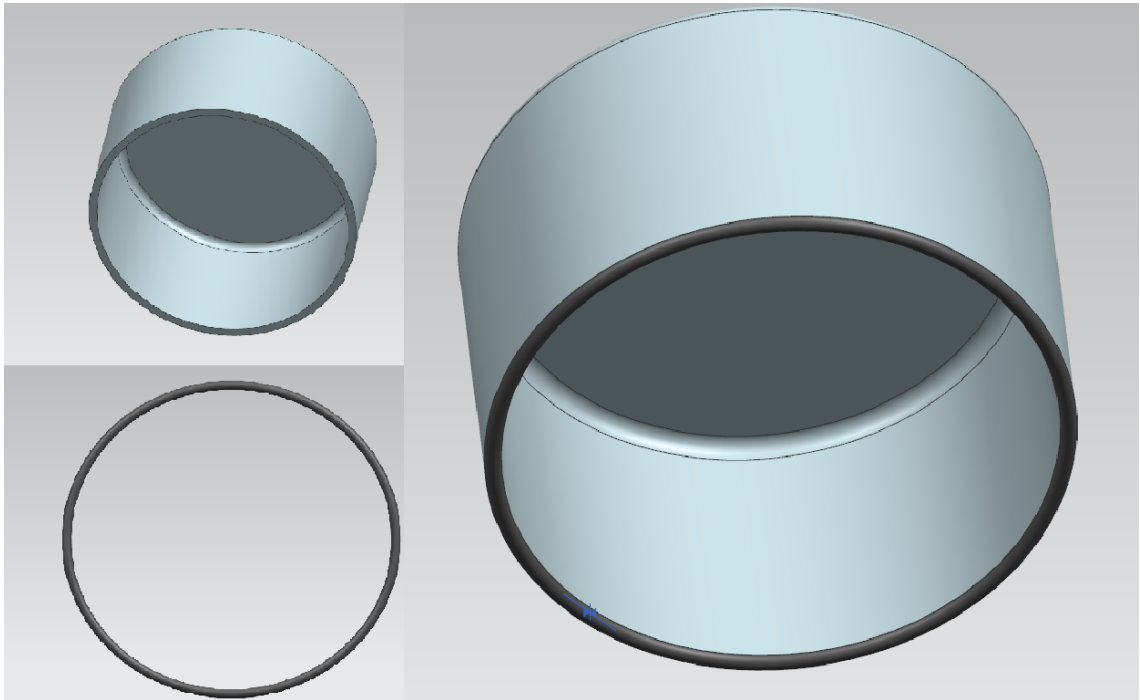
3.1.2 Komponenttien kiinnitys

Sovitettu komponentti täytyy kiinnittää tuotteeseen, jotta komponentti ei liikkuisi tavalla, joka ei olisi toivottu tuotteen normaalin toiminnan aikana (Boothroyd 1987, s. 3). Komponenttien helppo kiinnittäminen vaatii, että tuotteen alustava komponentti on stabiili (Baßler 1988, s. 84). Tämä helpottaa muiden komponenttien kiinnittämistä, koska voiman kohdistaminen labiiliin systeemiin aiheuttaa tasapainon menettämistä. Ilman alustavaa komponenttia tarvitaan jiggiä stabiloimaan kokoonpanoa. Tarve erikoiselle jigille nostaa kokoonpanon kustannuksia. (Eskilander 2001, s. 157) Uuden jigin kustannuksia pystyy välttämään, jos tuotteen alustava komponentti on standardisoitu. Tällöin samaa jiggiä pystyy käyttämään uudelleen eri tuotteen kokoonpanoon. (Eskilander 2001, s. 156)

DFA-talo menetelmässä Rampersad (1993) jakaa komponenttien kiinnityksen kahteen kategoriaan: yhden pisteen arvoiset menetelmät ja kahden pisteen arvoiset menetelmät. Yhden pisteen arvoiset menetelmät ovat napsautus, ruuvaaminen ja liimaaminen. Kahden pisteen menetelmät ovat työntösovitus, hitsaus, kolvaus ja niittaaminen. Komponenttien kiinnitys luokitellaan DFA-talo menetelmässä niittaamiseksi, jos siihen syntyy plastinen muodonmuutos sovituksen jälkeen (Rampersad 1993, s. 33). Yhden pisteen arvoisista kiinnitysmenetelmistä ruuvaaminen ei kuitenkaan ole ideaalinen, tämän syy käsitellään alaluvussa 3.1.3. SINTEF-menetelmän mukaan ruuvaaminen ja liimaaminen ovat keskenään samanarvoisia kiinnitysmenetelmiä ja napsautus on näitä parempi kiinnitysmenetelmä (Langmoen & Ramsli 1983, Eskilander 2001 mukaan). Kokoonpantavuudeltaan ideaalinen kiinnitysmenetelmän on siis napsautus.

3.1.3 Komponenttien lukumäärä

Komponenttien lukumäärä on merkittävin tekijä kokoonpantavuuden helpottamisessa, siksi komponentteja pitäisi olla mahdollisimman vähän, kuten BDI:n DFA-analyysin kysymykset ja Lucas-DFA menetelmän kaavat 2.2, 2.3 ja 2.4 osoittavat. Vähemmän komponentteja tarkoittaa vähemmän käsittelysyklejä, joka vaikuttaa kokoonpano-aikaan. BDI:n DFA-analyysin kysymykset implikoivat, että komponenttia ei pysty integroida toiseen, jos ne ovat valmistettu eri materiaaleista. Tämä on kuitenkin DFM/DFMA-periaate eikä pelkästään DFA-periaate. (Boothroyd 1987, s. 3) Boothroyd ja Dewhurst tarkoittavat, että yhtä komponenttia ei pysty valmistamaan kahden eri materiaalin yhdistelmänä. Eri materiaaleista valmistettujen komponenttien integrointi toisiinsa on mahdollista, esimerkiksi jos alihankkija tarjoaa kyseisen palvelun. Tällöin käsiteltävien komponenttien lukumäärä omassa kokoonpanossa vähenee. Esimerkiksi tiivisterenkaiden integrointi toiseen komponenttiin säästää merkittävästi aikaa tuotteen kokoonpanossa, sillä se vähentää komponenttien lukumäärää. Lisäksi tiivisterenkaat ovat pehmeitä ja joustavia. DFA-talo menetelmän mukaan komponenttiin tarttuminen on hankalaa, jos se on pehmeä ja joustava. Lucas-DFA menetelmän syöttö- ja sovitusindeksit tiivisterenkaille ovat korkeat. Tiivisterenkaan



Kuva 3.1. Kansi ja tiivisterengas ennen integrointia (vasen) ja sen jälkeen (oikea)

syöttöindeksi on 1,6 ja sovitusindeksi 1,7. Nämä ovat varsin isoja lukuja Lucas-DFA analyysimenetelmässä. (Leaney & Wittenberg 1992, s. 15)

Ruuvaaminen on ainoa kiinnitysmenetelmä, jolle Rampersad (1993) antoi yhden pisteen DFA-talo menetelmässä ja joka nostaa tuotteen komponenttien lukumäärää. Tämän seurauksena ruuvaaminen ei ole suositeltava tapa kiinnittämiseen BDI:n ja Lucas-DFA:n mukaan. Ruuvaaminen voi vaatia pelkän ruuvin tai pultin lisäksi myös aluslevyn ja mutterin, jolloin tuotteen komponenttien lukumäärä nousee merkittävästi. Lisäksi tässä tapauksessa pitää käsitellä samanaikaisesti useampaa komponenttia, mikä vaikeuttaa kokoonpanoa. Lucas-DFA:n mukaan sovitusindeksit komponenttien samanaikaiselle käsittelylle on suurempi kuin niiden erilliselle käsittelylle. (Leaney & Wittenberg 1992, s. 15) Tuotteen komponenttien kiinnitys pitäisi olla samanlainen koko tuotteessa, jos tämä on mahdollista. (Rampersad 1996, s. 9)

3.2 Tuotetason DFA-periaatteet

Yksittäisen tuotteen kokoonpantavuuteen pystyy vaikuttamaan merkittävimmin kyseisen tuotteen komponenteilla. Tuotetta voi kuitenkin modularisoida, mikä helpottaa uusien tuotteiden lisäämistä tuoteperheeseen (Rampersad 1996, s. 7). Rampersad (1996) väittää, että tuotteessa tulisi käyttää mahdollisimman paljon standardisoituja komponentteja, jotka ovat yhteensopivia muiden tuotteiden kanssa. Tuotekohtaiset vaatimukset ovat helpompi toteuttaa, jos niiden toteuttamiseen riittää pieni osa tuotteen komponenteista. Esimerkiksi Lego-hahmoissa käytetään paljon samanlaisia komponentteja pienillä variaatiolla. (Ram-

persad 1996, s. 7) Tuotteen kokoonpano on helpompi, jos yksi tuotteen komponenteista toimii kokoonpanon alustana, jonka päälle muut komponentit kiinnitetään (Rampersad 1996, s. 10).

SINTEF-menetelmän mukaan kokoonpanon suuntia tulisi olla mahdollisimman vähän. Isokokoisen tuotteen tapauksessa kokoonpanon suunta nostaa kokoonpanoaikaa, jos robotteja on vähemmän kuin kokoonpanon suuntia. Esimerkiksi autoteollisuudessa useampi robotti työskentelee rinnakkain auton oikealla ja vasemmalla puolella. Auto on niin isokokoinen tuote, että rinnakkain työskentely usealla robotilla ei ole haastavaa. SINTEF-menetelmän mukaan pienikokoisen tuotteen tapauksessa kokoonpanon suuntia voi olla maksimissaan kolme. Useampi kokoonpanon suunta tarkoittaa, että tuotteen kääntäminen kesken kokoonpanoa on tarpeellinen, mikä hankaloittaa tuotteen kokoonpanoa. (Eskilander 2001, s. 43) Hitachi AEM:n ja Rampersadin (1996) mukaan ideaalinen kokoonpanon suunta on sellainen, että komponentteja lisätään tuotteen päälle, eli kokoonpano tapahtuisi alhaalta ylös. Tarvittaessa kokoonpanon suuntaa ja monimuotoisuutta pystyy vähentää yhdistämällä osa tuotteen komponenteista alikokoonpanoihin (Rampersad 1996, s. 11). Alikokoonpanoja pystyy helposti kääntää ympäri, jotta sen kokoonpanon suunta olisi sama kuin koko tuotteen kokoonpanon suunta (Jung & Billatos 1993, s. 261).

4. KOKOONPANTAVUUDEN TARKISTUSLISTA

Taulukossa 4.1 on DFA-tarkistuslista. Tarkistuslista on poimittu luvussa kolme esitetyistä suunnittelusäännöistä, jotka ovat poimittu luvun kaksi DFA-työkaluista. Tarkistuslistan väitteet ovat muotoiltu siten, että suunnittelija pystyy tarkistamaan, että kuinka hyvin DFA-periaatteita on noudatettu tuotteessa. Tarkistuslistaa pystyy käyttämään sekä tuotteen suunnittelussa että valmiin tuotteen tarkastelussa. Tuotteen komponentteihin liittyvissä kysymyksissä vastaus on "tosi"vain, jos väite pitää paikkansa jokaisen komponentin kohdalla, muuten vastaus on "epätosi". Väitteet antavat myös parannusehdotuksia tuotteen ja komponenttien suunnitteluun, joka puuttuu monesta olemassa olevasta DFA-työkalusta. Liitteessä A on sama DFA-tarkistuslista englanniksi.

Väitteitä tarkistuslistassa on vähän, jotta kynnys listan käyttöönottoon olisi matala. Osa tarkistuslistan väitteistä poissulkevat asioita, jotka voisivat muuten olla erillisinä väitteinä tarkistuslistassa, näin minimoidaan väitteiden lukumäärää tarkistuslistassa. Väitteitä on siksi vain 19 kappaletta, jotta suunnittelija muistaisi väitteet myös suunnitteluvaiheen aikana. Tällöin suunnittelija pystyy välttymään tuotteen iteratiivisesta tarkastelusta, joka on yleinen ongelma olemassa olevissa DFA-työkaluissa.

Komponenttien tarttumiseen ja sovittamiseen keskittyvät väitteet ovat muotoiltu suoraan alaluvussa 3.1.1 käsiteltyjen suunnittelusääntöjen perusteella. Väitteen 9 alikokoonpanosassa tarkoitetaan, että alikokoonpanon sisällä täytyy komponentit saada kiinni samalla työkalulla. Alikokoonpanon lopputulosta pitäisi pystyä ottaa kiinni samalla työkalulla, kuin muita saman kokoonpanotason komponentteja. Komponenttien kiinnitykseen keskittyvät väitteet ovat muotoiltu suoraan alaluvussa 3.1.2 käsiteltyjen suunnittelusääntöjen perusteella. DFA-periaatteisiin liittyvät väitteet koko tuotteen tasolla ovat muotoiltuja alaluvun 3.2 käsiteltyjen suunnittelusääntöjen perusteella. Väitteessä 2 tuotteen vaatimuksille tärkeät komponentit ovat Lucas-DFA menetelmän mukaan A-komponentteja, loput ovat B-komponentteja.

Erikoistapaukset ovat tapauksia, joita ei pysty selkeästi sijoittaa johonkin yllämainituista kategorioista. Väite 19 sopii komponenttien tarttumiseen, sovittamiseen ja kiinnittämiseen yhtä hyvin. Esimerkiksi tiivisterenkaaseen tarttumisen, sovittamisen ja kiinnittäminen ovat yhtä hankalia operaatioita. Väite 18 on lisätty tarkistuslistaan, sillä kaapelit ovat joustavia, ja niiden sovittaminen vaatii usein pujottamista. Erillistä "vältty pujottamisesta-väitettä ei

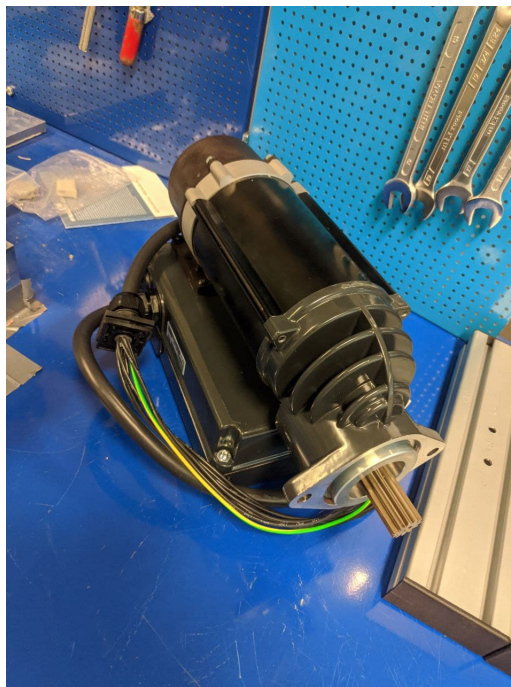
lisätty, sillä väitteiden 13 ja 14 noudattaminen poissulkevat pujottamisen mahdollisuuden kokonaan.

Taulukko 4.1. Tarkistuslista

Kategoria	Väite
Koko tuote	1. Tuotteessa on käytetty mahdollisimman paljon standardisoituja komponentteja.
Koko tuote	2. Tuotteessa on mahdollisimman vähän komponentteja, jotka eivät ole tuotteen vaatimuksille tärkeitä.
Koko tuote	3. Tuotteelle on olemassa stabiili alustava komponentti.
Koko tuote	4. Tuotteen alustava komponentti on pinta-alaltaan suuri.
Koko tuote	5. Kokoonpanon suuntia on tarvittaessa vähennetty alikokoonpanojen avulla.
Komponenttiin tarttuminen	6. Komponenteilla on selkeitä tarttumispintoja.
Komponenttiin tarttuminen	7. Komponentit eivät tartu toisiinsa tai ole solmussa syöttämisvaiheessa.
Komponenttiin tarttuminen	8. Jos komponentti on epäsymmetrinen, sen orientaatiota pystyy selvittämään syöttämisvaiheessa reikien tai viisteiden avulla.
Komponenttiin tarttuminen	9. Jokaiseen komponenttiin (ali)kokoonpanon sisällä pystyy tarttua samalla työkalulla.
Komponentin sovittaminen	10. Komponentin sovitukselle on riittävän suuret toleranssit.
Komponentin sovittaminen	11. Komponenteissa on ohjausviisteitä.
Komponentin sovittaminen	12. Komponentit ovat symmetrisiä tai selkeästi epäsymmetrisiä.
Komponentin sovittaminen	13. Yksikään komponentti ei vaadi useamman komponentin samanaikaista käsittelyä.
Komponentin sovittaminen	14. Komponenttien sovittamiseen riittää yksi lineaarinen liike.
Komponentin kiinnitys	15. Komponenttien kiinnitys toteutetaan napsautuksella, ilman kiinnityskappaleita.
Komponentin kiinnitys	16. Jos komponentit vaativat kiinnityskappaleita, ne ovat ruuveja. Ruuvit ovat samanlaisia koko tuotteessa.
Komponentin kiinnitys	17. Jos ruuveja vaaditaan, niihin tarpeelliset aluslevyt ovat integroitu ruuveihin.
Erikoistapaukset	18. Tuotteessa ei ole vapaasti liikkuvia kaapeleita.
Erikoistapaukset	19. Pehmeät komponentit ovat integroituja toisiin komponentteihin.

5. TUOTE-ESIMERKKI

Tässä luvussa sovelletaan laadittua tarkistuslistaa olemassa olevan tuotteen analysoimiseen. Tuotteena toimii Konecranes Oyj:n nosturin sähkömoottori, jota käytettiin Tampereen Yliopiston Production Automation Planning -kurssilla. Kurssin tehtävänä oli suunnitella automatisoitu tuotantojärjestelmä kyseisen tuotteen massatuotantoon, johon kuului DFA-periaatteiden soveltaminen tuotteen uudelleensuunnittelua varten. Tuote on olemassa oleva, joten tarkistuslistaa käytetään tuotteen parantamiseen. Liitteessä B on lista moottorin komponenteista, niiden lukumääristä Lucas-menetelmän mukaisen A- ja B-komponentti jaosta ja kokoonpantavuuteen liittyvistä havainnoista.



Kuva 5.1. Konecranes Oyj:n sähkömoottori

Moottorin vaihdelaatikko on stabiili kokoonpanon alustava kappale, jos se on sopivan jigin päällä. Vaihdelaatikolle tarvittava jigi ei ole erikoinen, sillä Production Automation Planning kurssilla saatiin kyseinen komponentti stabilisoitua maalarinteippirullan avulla. Tuotteessa on komponentteja, joita pystyisi integroida toisiin tai jättää kokonaan pois. Esimerkiksi moottorin tiivisterenkaita pystyisi integroida jarrun kanteen ja armatuurin kanteen.

Moottorin hammashihapari (teethed sleeves) ja vetoakseli ovat esimerkkejä komponent-

teista, joiden toleranssit ovat liian pienet. Hammashihaparin osien sovittaminen toisiinsa oli myös ihmiselle hankalaa sen takia. Hammashihaparissa ei ollut ohjausviisteitäkään helpottakseen sovittamista, kuten ei missään muussakaan komponentissa. Ohjausviisteiden puute vaikeuttaa kokoonpanoa, sillä on mahdollista, että esimerkiksi jarrulevyjen hammasvälit eivät ole samassa orientaatioissa kuin moottorin vetoakselin hampaat. Tässä tilanteessa tarvitaan konenäköjärjestelmää orientaation tunnistamiseen tai robotin voima-anturilla täytyy iteroida kunnes sovitus onnistuu.

Moottorin joustaviin aluslevyihin on vaikea tarttua, sillä aluslevyn ulkoreunan pinta-ala on äärimmäisen pieni aluslevyn paksuuden takia. Moottorin jarrun kansi on epäsymmetrinen, mutta ei riittävän epäsymmetrinen, sillä kannen asettaminen on mahdollista väärin päin. Jarrun kannesta myös roikkuu vapaasti maadoituskaapeli, joka voi kokoonpanon yhteydessä jäädä kiinni paikkoihin, joissa ei sitä toivota. Moottorin sähkölaatikossa roikkuu myös kaapeleita, joita olisi tarkoitus pujottaa jarrun kannen reikien läpi. Kaapelien pujottaminen vaatii useamman komponentin samanaikaista käsittelyä, eikä yksi lineaarinen liike riitä sen toteuttamiseen. Kaapeleita pystyisi tässä tapauksessa korvata esimerkiksi liitännöillä.

Luvussa 4 laaditun tarkistuslistan soveltamisen lopputulos on liitteessä C. Vain 4 väitettä sai vastauksen "tosi". Osa komponenteista toteuttavat enemmän kuin neljä väitettä tarkistuslistasta, mutta vastaus väitteisiin on silti "epätosi", koska ei jokainen komponentti toteuta kyseisiä väitteitä. Tarkistuslistan soveltaminen Konecranes Oyj:n sähkömoottoriin helpotti DFA-analyysin toteuttamisen. Moottorin uudelleensuunnitteluun tuli helpommin parannusideoita kuin Production Automation Planning -kurssin aikana. Konecranesin nosturin sähkömoottorissa on siis paljon parannusmahdollisuuksia kokoonpantavuuden näkökulmasta. On mahdollista, että näitä ei toteuttu muista syistä, esimerkiksi kustannukset, huollettavuus tai valmistusmenetelmälliset syyt.

6. YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli laatia helppokäyttöinen DFA-tarkistuslista, jota mekaniikkasuunnittelija pystyy hyödyntää tuotteen suunnittelun jokaisessa vaiheessa. Työssä tehtiin kirjallista selvitystä olemassa olevista DFA-työkaluista, kerrottiin niiden toimintaperiaate sekä mainittiin jokaisen DFA-työkalun hyvät ja huonot puolet. Kirjallisen selvityksen jälkeen poimittiin DFA-työkaluista hyviä DFA-periaatteita ja niitä jaettiin tuotteen kokoonpanon vaiheisiin. Näitä DFA-periaatteita sitten kerättiin DFA-tarkistuslistaan.

Työn tuloksena saatiin DFA-tarkistuslista, jossa on 19 väitettä, joihin suunnittelija voi vastata "tosi" tai "epätosi". Jokainen "tosi" vastaus kertoo, että tuotteen suunnittelussa on noudatettu kyseistä DFA-periaatetta. Väitteiden lukumäärää täytyi rajoittaa, jotta suunnittelijalla ei olisi liian korkea kynnys DFA-tarkistuslistan käyttämiseen. Tämän seurauksena tuotteen suunnittelussa voi olla asioita, jotka vaikuttavat DFA-periaatteiden noudattamiseen, mutta niitä ei DFA-tarkistuslista käsittele.

DFA-tarkistuslista käsittelee pelkästään tuotteen mekaanisia ominaisuuksia ja pelkästään kokoonpantavuuden näkökulmasta. Valmistusmenetelmälliset ja kustannukselliset näkökulmat eivät ole huomioitu tässä työssä eikä laaditussa DFA-tarkistuslistassa. Esimerkiksi tiivisterenkaiden integrointi toiseen komponenttiin on hyvä tuotteen kokoonpantavuuden näkökulmasta, mutta valmistusmenetelmällisesti se voi olla hankalaa.

DFA-tarkistuslista käsittelee tuotteen kokoonpantavuutta pelkästään automatisoidun kokoonpanon tapauksessa. Manuaaliseen kokoonpanoon liittyviä asioita ei huomioida DFA-tarkistuslistassa, vaikka suurin osa sen väitteistä ja DFA-periaatteista pitävät paikkansa myös manuaalisessa kokoonpanossa.














LÄHTEET

- Baäßler, R. (1988). Rationalisation results in assembly-orientated design. *Assembly Automation* 8.2, s. 82–86. ISSN: 01445154. DOI: 10.1108/eb004237.
- Boothroyd, G. (1987). Design for assembly—The key to design for manufacture. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2.3, s. 3–11. ISSN: 14333015. DOI: 10.1007/BF02601481.
- Bralla, J. G. (1998). *Design for Manufacturing handbook 2nd edition*. ISBN: 007007139X. URL: <http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf>.
- Dagleish, G. F., Jared, G. E. & Swift, K. G. (2000). Design for assembly: Influencing the design process. *Journal of Engineering Design* 11.1, s. 17–29. ISSN: 09544828. DOI: 10.1080/095448200261162.
- Eskilander, S. (2001). Design For Automatic Assembly. Doctoral Thesis. Royal Institute of Technology.
- Hosnedl, S., Kopecky, M. & Sasiadek, M. (2016). The Latest Methods of Construction Design. *The Latest Methods of Construction Design*, s. 369–375. DOI: 10.1007/978-3-319-22762-7.
- Jung, J. Y. & Billatos, S. B. (1993). An expert system for assembly based on Axiomatic Design principles. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 8.2, s. 245–265. ISSN: 09210296. DOI: 10.1007/BF01257997.
- Leaney, P. G. & Wittenberg, G. (1992). Design for assembling. *Assembly Automation* 12.2, s. 8–17. ISSN: 01445154. DOI: 10.1108/eb004359.
- Moultrie, J. & Maier, A. M. (2014). A simplified approach to design for assembly. *Journal of Engineering Design* 25.1-3, s. 44–63. ISSN: 14661837. DOI: 10.1080/09544828.2014.887059.
- Rampersad, H. K. (1993). The DFA House. *Assembly Automation* 13.4, s. 29–36. ISSN: 01445154. DOI: 10.1108/eb004406.
- (1996). Integrated and assembly oriented product design. *Integrated Manufacturing Systems* 7.6, s. 5–15. ISSN: 09576061. DOI: 10.1108/09576069610151130.
- Thompson, M. K., Juel Jespersen, I. K. & Kjærgaard, T. (2018). Design for manufacturing and assembly key performance indicators to support high-speed product development. *Procedia CIRP* 70, s. 114–119. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2018.02.005. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.02.005>.

LIITE A: TARKISTUSLISTA ENGLANNIKSI

Category	Argument
Whole product	1. The product has as little unique components as possible.
Whole product	2. The product has as little non-essential components as possible.
Whole product	3. The product has a stable base component.
Whole product	4. The product's base component has a large area.
Whole product	5. Assembly directions are reduced by utilizing sub-assemblies if needed.
Grasping of Components	6. Components have good grabbing surfaces.
Grasping of Components	7. Components do not overlap or get tangled during feeding.
Grasping of Components	8. If a component is asymmetric, its orientation is easy to determine via holes or chamfers.
Grasping of Components	9. Each component within the same (sub)assembly can be grabbed with the same tool.
Fitting of Components	10. Components have large enough tolerances for fitting..
Fitting of Components	11. Components have chamfers for easier fitting.
Fitting of Components	12. Components are symmetrical.
Fitting of Components	13. None of the components require simultaneous handling of multiple components.
Fitting of Components	14. One linear motion is enough for fitting of each component.
Fastening of Components	15. Attachment of components is done by snap-fitting, without separate fastener components.
Fastening of Components	16. If fastener components are required, they are screws. Screws are uniform across the entire product.
Fastening of Components	17. If screws are required, the washers are integrated to them.
Special Cases	18. The product has no loose cables.
Special Cases	19. Soft components are integrated to other components.

LIITE B: KONECRANES OYJ:N SÄHKÖMOOTTORIN OSAT

Part	Amount	Picture	A/B cat.	Problems/notes
Nuts, M6, M17	M17: 1 pcs		B	Two different sizes for no apparent reason
Spring washer (KAS32)	2 pcs		B	Small piece, hard to grip & assemble
Bolts, M4X12	M4X12: 4 pcs		B	Two different sizes for no apparent reason
Brake disc	3 pcs		A	Alignment of disc teeth relative to shaft
Friction disc	3 pcs		A	
Toothed sleeves	MT06-J96 (left) 1 pcs; MT06-J27 (right) 1 pcs.		A	Alignment is quite hard
Tie rod	M5X160: 3 pcs		B	Third different size for no real reason, with M6 and M4 bolts being the other two
Brake shield	1 pcs		A	Threading of cables required which is tedious. Different cable lengths make it even harder.
Seal ring	2 pcs		A	Hard to grab properly because the material is flexible.
Gear box	1 pcs		A	Bulky part that falls if no support is available.
Electric box	1 pcs		A	The cables of the motors are hard to thread through the box. Assembled by the other group.
Armature and casing	1 pcs		A	
Rotor shaft	1 pcs		A	Force and rotation need to be applied in assembly to get it to right position. Needs to be janked into the gearbox
Total number of different parts.		14	Total	25 pieces

LIITE C: TARKISTUSLISTAN SOVELTAMINEN KONECRANES OYJ:N SÄHKÖMOOTTORIIN

Väite	Vastaus
1. Tuotteessa on käytetty mahdollisimman paljon standardisoituja komponentteja.	Tosi
2. Tuotteessa on mahdollisimman vähän komponentteja, jotka eivät ole tuotteen vaatimuksille tärkeitä.	Epätosi
3. Tuotteelle on olemassa stabiili alustava komponentti.	Tosi
4. Tuotteen alustava komponentti on pinta-alaltaan suuri.	Tosi
5. Kokoonpanon suuntia on tarvittaessa vähennetty alikokoonpanojen avulla.	Tosi
6. Komponenteilla on selkeitä tarttumispintoja.	Epätosi
7. Komponentit eivät tartu toisiinsa tai ole solmussa syöttämisvaiheessa.	Epätosi
8. Jos komponentti on epäsymmetrinen, sen orientaatiota pystyy selvittämään syöttämisvaiheessa reikien tai viisteiden avulla.	Epätosi
9. Jokaiseen komponenttiin (ali)kokoonpanon sisällä pystyy tarttua samalla työkalulla.	Epätosi
10. Komponentin sovitukselle on riittävän suuret toleranssit.	Epätosi
11. Komponenteissa on ohjausviisteitä.	Epätosi
12. Komponentit ovat symmetrisiä tai selkeästi epäsymmetrisiä.	Epätosi
13. Yksikään komponentti ei vaadi useamman komponentin samanaikaista käsittelyä.	Epätosi
14. Komponenttien sovittamiseen riittää yksi lineaarinen liike.	Epätosi
15. Komponenttien kiinnitys toteutetaan napsautuksella, ilman kiinnityskappaleita.	Epätosi
16. Jos komponentit vaativat kiinnityskappaleita, ne ovat ruuveja. Ruuvit ovat samanlaisia koko tuotteessa.	Epätosi
17. Jos ruuveja vaaditaan, niihin tarpeelliset aluslevyt ovat integroitu ruuveihin.	Epätosi
18. Tuotteessa ei ole vapaasti liikkuvia kaapeleita.	Epätosi
19. Pehmeät komponentit ovat integroituja toisiin komponentteihin.	Epätosi