

Elektroniikan ladontaprosessin ESD- suojausten kehitys

Emfit Oy

Alexi Lepistö

Opinnäytetyö

Maaliskuu 2019

Tekniikan ja liikenteen ala

Insinööri (AMK), hyvinvointiteknologian tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Lepistö, Aleksi	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä Maaliskuu 2019
	Sivumäärä 47	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Elektroniikanladontaprosessin ESD-suojauksen kehitys		
Tutkinto-ohjelma Hyvinvointiteknologian tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Markku Ström, Matti Siistonen		
Toimeksiantaja(t) Emfit Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Staattisen sähköön hallinta on merkittävä osa nykypäivän elektroniikkateollisuutta. Käytettävät komponentit ovat pieniä ja ne vikaantuvat herkästi staattisen sähköön purkausten vaikutuksesta. Staattisen sähköön purkauksia onkin tärkeää ehkäistä oikeanlaisella maadoitussella prosessin eri vaiheissa.</p> <p>Emfit Oy on terveysteknologia-alalla toimiva Vaajakoskelainen yritys. Yritys on lähiaikoina laajentanut toimintaansa piirikorttien valmistukseen. Opinnäytetyö käsitteli tuoreen elektroniikan ladontaprosessin ESD-suojauksen kehittämistä, jossa on ollut havaittavissa selviä puutteita. Työn tavoitteena oli kartoittaa prosessin ESD-suojauksen nykytila ja luoda toimintamalli, jota toteuttamalla suojauksesta saadaan standardien mukainen. Tarkoituksena oli myös luoda ESD-suojauksen ylläpitämiseksi seurantasuunnitelma, jonka mukaisesti suojauksen tasoa testataan jatkossa.</p> <p>Opinnäytetyö aloitettiin perehtymällä lähdemateriaaliin aiheesta, jonka perusteella luotiin kokonaiskuva sähköstaattisten purkausten hallinnasta. Aiheeseen liittyy useita standardeja, joiden vaatimukseen perehtymällä saatiin selville, mitä prosessin ESD-suojaukselta vaaditaan. Käytännön toteutukseen kuului alkukartoitus yrityksen tiloissa, jossa kiinnitettiin huomiota ESD-suojauksen nykytilaan, ja etsittiin mahdollisia ESD-riskejä käyttäen riskienhallintatyökalua. Alkukartoituksessa tehtyjen havaintojen perusteella suojauksen nykytilaa verrattiin standardien vaatimukseen ja lähdemateriaalin tietoihin.</p> <p>ESD-suojauksessa havaittiin lukuisia puutteita, joiden ratkaisemiseksi ja suojauksen kehittämiseksi standardien mukaiseksi annettiin toimintaohjeet opinnäytetyössä. Työssä luotiin myös suunnitelma, jonka mukaisesti ESD-suojauksen tasoa tulee seurata jatkossa, jotta voidaan ylläpitää saavutettua suojaustasoa.</p>		
Avainsanat (asiasanat) staattinen sähkö, elektroniikkateollisuus, ESD		
Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)		

Author(s) Lepistö, Aleksi	Type of publication Bachelor's thesis	Date March 2019 Language of publication: Finnish
	Number of pages 47	Permission for web publica- tion: x
Title of publication Developing ESD protection in Electronic assembly process		
Degree programme Degree Programme in Wellness Technology		
Supervisor(s) Ström, Markku & Siistonen, Matti		
Assigned by Emfit Oy		
Abstact <p>Controlling electrostatic discharge is an important part in today's electronics industry. Electronic parts are small and ESD sensitive and static discharge easily breaks them. Therefore, it is important to prevent electrostatic discharge in every step of the process.</p> <p>Emfit Oy is based in Vaajakoski and it operates in the field of in health technology. The company has started to manufacture their own PCBs (Printed Circuit Boards) a couple of months ago. The thesis examined developing ESD protection in the electronics assembly process. The target was to study the current process situation in Emfit and create guidelines on how to develop ESD protection. The thesis also included a compliance verification plan.</p> <p>The thesis process started by acquiring information about ESD protection. Based on the information the overall picture of controlling electrostatic discharge was created. There were several standards associated with ESD. Studying these standards showed what the process ESD protection requires. After that, the electronic assembly process was verified to determine ESD risks by using risk analysis and visual observation. Based on the observations, the process ESD protection was compared to the requirements of the standards.</p> <p>There were several problems observed in the process ESD protection. Some of them were critical. The thesis helped solve these problems and develop a standard comparable ESD protection. In addition, a compliance verification plan to maintain the achieved level of ESD protection.</p>		
Keywords/tags (subjects) Static electricity, electronics industry, ESD		
Miscellaneous (Confidential information)		

Sisältö

1	Johdanto	5
1.1	Opinnäytetyön lähtökohdat	5
1.2	Opinnäytetyön tavoitteet.....	6
2	Emfit Oy	7
2.1	Yritys	7
2.2	Emfitin elektroniikanladontaprosessi	7
3	Stattinen sähkö	8
3.1	Stattinen sähkö ilmiönä.....	8
3.2	Stattisen sähköön purkaus	10
3.3	Purkausmallit.....	11
3.3.1	Human body model (HBM).....	11
3.3.2	Machine model (MM).....	12
3.3.3	Charged device model (CDM).....	13
3.4	ESD-vikaantumismekanismit	13
3.5	ESD-purkausten vaikutukset komponenteille	14
4	SFS EN 61340-5-1 mukainen ESD-hallintaohjelma	16
4.1	Yleistä	16
4.2	Hallinnolliset vaatimukset	16
4.3	Tekniset vaatimukset	17
4.3.1	EPA-alue.....	17
4.3.2	Maadoitusjärjestelmät	22
4.3.3	Henkilömaadoitus.....	23
5	Tutkimusmenetelmät	26
5.1	Laadullinen tutkimus	26

	2
5.2 Vika- ja vaikutusanalyysi (FMEA).....	26
5.3 Havainnointi	29
6 ESD-suojauksen nykytilan kartoitus.....	29
6.1 Aineistonkeruun lähtökohdat	29
6.2 Aineistonkeruun tulokset	30
7 ESD-suojauksen kehityssuunnitelma	32
7.1 Hallinnolliset toimenpiteet.....	32
7.2 Tekniset toimenpiteet	33
7.2.1 EPA-alue.....	33
7.2.2 Henkilömaadoitus.....	35
7.2.3 Mittaukset	36
7.3 Kriittiset toimenpiteet	38
8 Seurantasuunnitelma	39
9 Pohdinta	40
Lähteet	43

Kuviot

Kuvio 1 Triboelektroninen sarja	9
Kuvio 2 HBM-sijaiskytkentä ja purkauksen aaltomuoto	12
Kuvio 3 MM-mallin sijaiskytkentä ja purkauksen tyypillinen aaltomuoto	12
Kuvio 4 CDM-mallin sijaiskytkentä	13
Kuvio 5 ESD-varoitustaulu, keltainen pohjaväri	18
Kuvio 6 ESD-suojattu työpiste	19
Kuvio 7 ESD-herkän tuotteen varoitustarra, keltainen pohjaväri	22
Kuvio 8 Suositeltavin tapa kytkeä ESD-hallintatarvikkeet maahan	23
Kuvio 9 FMEA-prosessi	28
Kuvio 10 Rannekejärjestelmän ja jalkineiden testeri	36
Kuvio 11 Resistanssimittarisarja	37

Taulukot

Taulukko 1 EPA-alueen vaatimukset	21
Taulukko 2 Henkilömaadoituksen vaatimukset	25
Taulukko 3 ESD-hallintatarvikkeiden testaustiheys	37
Taulukko 4 Kriittiset toimenpiteet ESD-suojauksen parantamiseksi	38
Taulukko 5 ESD-suojaustason kelpoisuudentodentamissuunnitelma	40

Käsitteet

ESD Lyhenne ESD tulee englannin kielen sanoista electrostatic discharge eli sähköstaattinen purkaus. Se on staattisen sähkövarauksen purkautumisilmiö.

ESD-suojaus ESD-suojauksella tarkoitetaan niitä keinoja, joilla pyritään hallitsemaan sähköstaattisia purkauksia.

ESD-hallintaohjelma ESD-hallintaohjelma on organisaatiokohtainen sähköstaattisten purkausten hallintaan keskittyvä ohjelma, johon dokumentoidaan kaikki käytettävät ESD-suojausmenetelmät.

EPA Lyhenne EPA tarkoittaa ESD-suojattua aluetta (engl. ESD Protected Area). EPA on vaihtelevan kokoinen alue, yhdestä työpisteestä koko tuotantotilaan, jossa noudatetaan erityistoimenpiteitä sähköstaattisten purkausten hallitsemiseksi.

Kelpoisuuden todentamissuunnitelma Kelpoisuuden todentamissuunnitelma on organisaation luoma dokumentti, johon kirjataan millä tavoin ESD-suojauksen tilaa tullaan jatkossa seuraamaan.

1 Johdanto

Lähes jokainen tietää säikähtäneensä tilanteessa, jossa vaatteisiin kertynyt staattinen sähkövaraus purkautuu napsahtaen kosketettaessa jotain johtavaa materiaalia. Tällaisissa staattisen sähkön purkauksissa materiaalien jännite-ero tasaantuu nanosekunneissa, jolloin siirtyvä energiamäärä on niin pieni, ettei siitä ole haittaa ihmiselle. Korkeintaan se säikäyttää pahanpäiväisesti. Elektroniikkateollisuudessa tällaiset staattisen sähkön purkaukset ovat kuitenkin ongelmallisia. Käytettävät komponentit ovat niin herkkiä staattiselle sähkölle, että ne vikaantuvat sellaisistakin purkauksista, joita ihminen ei edes pysty havaitsemaan. Tämän takia elektroniikkateollisuudessa tulee kiinnittää erityistä huomiota staattisen sähkön purkauksien ehkäisemiseksi. Monesti sähkön purkauksen aiheuttama komponenttien vikaantuminen jää piileväksi, eikä sitä edes huomata, ennen kuin tuote tulee asiakkaalta takuupalautuksena epävarman toiminnan takia. Näin ESD-suojauksen puutteet vaikuttavat tuotteiden luotettavuuteen ja elinikään ja siten myös yrityksen imagoon. Staattisen sähkön hallinta vaatii yritykseltä investointeja ja resursseja, mutta se on tulevaisuuden kannalta kannattava sijoitus.

1.1 Opinnäytetyön lähtökohdat

Opinnäytetyön toimeksiantaja toimii terveysteknologia-alalla toimiva unenmittausantureita ja anturimateriaaleja valmistava yritys Emfit Oy. Opinnäytetyön aiheena on kartoittaa Emfitin elektroniikanladontaprosessin ESD-suojauksen nykytila ja suunnitella siitä kattavampi. Yrityksessä on lähiaikoina alettu latomaan elektroniikka itse, aiemmin elektroniikka on tullut alihankkijalta. Näin ollen prosessin ESD-suojaus on vielä alkutekijöissä, ja siitä halutaan suunnitella nykyistä kattavampi. Opinnäytetyön työnimi on Elektroniikanladontaprosessin ESD-suojauksen kehitys. Valitsin kyseisen aiheen, sillä yrityksen uuden prosessin ympärille on tärkeää saada suunniteltua kattava ESD-suojaus, jotta komponentit eivät vaurioidu tuotannon aikana. Nykyisessä suojauksessa on selvästi kehitettävää, joten aihe on tärkeä yrityksenkin kannalta. Lisäksi olen kesän aikana perehtynyt ESD-suojaukseen ja tuonut pienillä jutuilla suojautasoa paremmaksi yrityksen elektroniikanladonta tilassa. Tästä on herännyt mie-

lenkiinto suunnitella ESD-suojauksesta niin kattava, etteivät komponentit pääse vaurioitumaan koko tuotantoprosessin aikana. Suojaus ei ole nykyisellään vielä läheskään riittävä, ja sen halutaan olevan standardien mukainen ja kattavan koko prosessin työvaiheet, jotka tehdään ladontahuoneessa.

1.2 Opinnäytetyön tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena on kartoittaa nykyisen ESD-suojauksen tila ja suunnitella kattava ESD-suojaus elektroniikkaladontaprosessin ympärille. Suojauksen halutaan kattavan kaikki työvaiheet, joissa käsitellään elektroniikkaa ladontatilassa. Työssä otetaan kantaa myös komponenttien oikeanlaiseen varastointiin. Työn tavoitteena tarjota keinot estää elektroniikan vikaantuminen tuotannon aikana sähköstaattisten purkausten takia. Tämä tuo tulevaisuudessa säästöjä yritykselle, kun elektroniikkaa ei mene hävikkiin vikaantumisten takia. Tavoitteena on myös suunnitella ESD-suojauksen seurantasuunnitelma, jonka avulla suojauksen tasoa voidaan jatkossa seurata ja ylläpitää.

Opinnäytetyössä haetaan vastauksia seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Kuinka estetään elektroniikan vikaantuminen sähköstaattisten purkausten takia tuotannon aikana?
- Kuinka toteutetaan kattava ESD-suojaus?
- Kuinka ESD-suojauksen tasoa täytyy jatkossa seurata?

Työ rajataan koskemaan tuotantoprosessin työvaiheita, jotka tehdään ladontatilassa, jolloin kokonaisuudesta saadaan selkeämpi. Elektroniikkaa käsitellään myös ladontilan ulkopuolella, mutta niiden työpisteiden ESD-suojaukseen ei keskitytä tässä opinnäytetyössä. Työn avulla on myöhemmin helpompi kehittää myös näiden työpisteiden suojausta.

Työn lopputuloksena syntyy suunnitelma ESD-suojauksen kehittämiseksi standardien mukaiseksi ja siihen vaadittavat toimenpiteet. Lopputuloksena syntyy myös ESD-suojauksen seurantasuunnitelma. ESD-suojaukseen ei opinnäytetyön aikataulun puitteissa pystytä todennäköisesti toteuttamaan, mutta hyvä suunnitelma tarjoaa hyvän pohjan suojauksen toteuttamiselle.

2 Emfit Oy

2.1 Yritys

Emfit Oy on Vaajakoskelainen terveysteknologia-alaan keskittyvä yritys, joka on perustettu vuonna 1990. Yrityksen tuotteet perustuvat yrityksen kehittämään herkkään elektroaktiiviseen anturimateriaaliin, jota voidaan hyödyntää monenlaisissa käyttötarkoituksissa eri aloilla. Yrityksen tunnetuimmat tuotteet liittyvät kosketuksetto- maan biosignaalien mittaamiseen vuoteesta, joka mahdollistaa muun muassa unen- laadun mittaamisen tai epilepsiakohtausten havaitsemisen. Yrityksen anturitekno- logiaa käytetään myös teollisuudessa muun muassa paperikoneissa sekä urheiluväli- neissä. Yritys työllistää noin 20 henkilöä ja toimii Suomesta käsin. Emfitillä on lisäksi tytäryhtiöt USA:ssa ja Kiinassa. (Emfit myy hälyttimiä sisältävän tuoteportfolion Abili- alle 2017.)

2.2 Emfitin elektroniikanladontaprosessi

Emfit käyttää tuotteissaan piirikortteja, jotka valmistetaan itse Vaajakoskella yrityk- sen tuotantotiloissa. Piirikortit valmistetaan tyhjästä piirilevyaihioista ja prosessin jäl- keen ne ovat valmiita käytettäväksi tuotteissa. Piirilevyt koostuvat erilaisista tuotteen tarkoituksen mukaisista komponenteista. Piirikortteja modifioimalla saadaan luotua tuotteisiin haluttuja ominaisuuksia.

Emfitin elektroniikanladontaprosessi etenee seuraavan kaavion mukaisessa järjestyk- sessä:

- 1) **Pastaus** – pastan levitys stensiilin läpi piirilevyyn haluttuihin kohtiin
- 2) **Komponenttien ladonta** – pintaliitoskomponenttien koneellinen ladonta
- 3) **Visuaalinen tarkastus** – komponenttien kiinnittymisen tarkistus
- 4) **Uuni** – pasta sulaa nestemäiseen muotoon ja kiinnittää komponentit
(Vaiheet 1-4 toistuu uudestaan piirilevyaihion toiselle puolelle)
- 5) **Käsinladonta** – läpiladottavien komponenttien ladonta käsin
- 6) **Testaus** – piirilevyjen toiminnallinen testaus
- 7) **Ohjelmointi** – piirilevyjen ohjelmointi ohjelmointilaitteella.

Kaikki työvaiheet tehdään yhtenäisellä EPA-alueella, paitsi piirilevyjen testausta ja ohjelmointia tehdään tilan puutteen vuoksi myös alueen ulkopuolisilla työpisteillä.

Elektroniikkaladonnan parissa työskentelee pääsääntöisesti kaksi yrityksen työntekijää. Jokaisen työvaiheen jälkeen piirilevyaihiolle on välivarasto, johon se voidaan varastoida odottamaan seuraavaa työvaihetta. Välivarastoina toimii piirilevyräkit, joita on pöydillä työpisteillä. Piirilevyaihiot varastoidaan ennen tuotantoon ottamista pahlavilaatikoissa suojapusseissa. Komponenttikelat säilytetään seinätelineessä EPA-alueella. Ladontaprosessin jälkeen valmiita piirikortteja säilytetään EPA-alueen ulkopuolisessa hyllyssä ESD-suojatuissa muovilaatikoissa.

3 Staattinen sähkö

3.1 Staattinen sähkö ilmiönä

Staattinen sähkövaraus on varauksellisten hiukkasten epätasapainoa materiaalissa. Aineen atomit koostuvat protoneista, elektroneista ja neutroneista. Protonit ovat positiivisesti varautuneita, neutronit varauksettomia ja elektronit negatiivisesti varautuneita. Varautumattomalla materiaalilla on protoneja ja elektroneja yhtä suuri määrä, joten se on sähköisesti neutraali. Staattisesti varautuneessa kappaleessa on elektronien vaje tai ylimäärä riippuen siitä, onko varaus positiivinen vai negatiivinen. (Viheriäkoski 2001, 12.)

Staattinen sähkövaraus syntyy yleisimmin kappaleiden tai aineiden hankauksessa ja irtoamisessa. Tämä kontaktivaraus tapahtuu kahden tai useamman eri varauksellisen kappaleen välillä. Kontaktissa kappaleiden vastakkaiset varaukset pyrkivät tasaantumaan, joten kappaleiden välillä siirtyy elektroneja. Kappale, joka luovuttaa elektroneja saa positiivisen sähkövarauksen ja kappale, joka vastaanottaa elektroneja saa negatiivisen varauksen. Ellei varaus pääse purkautumaan kappaleiden irrotessa toisistaan, jäävät ne staattisesti varautuneiksi. (Part One - An Introduction to ESD 2013.)

Materiaalit ovat jaoteltu niiden varautumisominaisuuksien mukaan tiettyyn järjestykseen, jota kutsutaan triboelektroniseksi sarjaksi. Sarjassa kauimpana toisistaan olevat materiaalit varautuvat voimakkaimmin, kun ne irrotetaan kosketuksen jälkeen toisistaan. Sarjan positiivisessa päässä olevat aineet pyrkivät luovuttamaan elektroneja,

kun taas sarjan negatiivisessa päässä olevat aineet pyrkivät vastaanottamaan elektroneja. (Viheriäkoski 2001, 14.)

Esimerkiksi ihmisen keho ja silikoni ovat kaukana toisistaan triboelektronisessa sarjassa, kuten kuvio 1 näkyy. Ne siis varautuvat voimakkaasti toisiinsa hankautuessaan. Varautumisen voimakkuus riippuu kosketuksissa olleiden materiaalien lisäksi niiden irrottamisnopeudesta.



Kuvio 1 Triboelektroninen sarja (Properties of Static Electricity N.d.)

Staattinen sähkövaraus voi siirtyä kosketuksessa, indusoitumalla ja ionisoitumalla. Kun staattisesti varautuneen kappaleen sähkökenttään tuodaan varautumaton kappale, se vetää puoleensa vastakkaisesti varautunutta kappaletta ja kappale polarisoi- tuu eli tapahtuu sähköstaattinen induktio. Varauksen siirtyminen indusoitumalla on yhtä yleistä kuin kontaktivarautuminen. Ionisoitumisessa varautuminen tapahtuu ulkoisten tekijöiden, kuten säteilyn, lämmön tai suuren sähkökentän vaikutuksesta. (Viheriäkoski 2001, 23.)

Staattista varautumista tapahtuu normaalissa työskentely-ympäristössä liikkumisen seurauksena. Ilmankosteus vaikuttaa suuresti staattisen varautumisen voimakkuuteen. Jo kävely kokolattiamatolla aiheuttaa 20 kV jännitteen ilman ollessa kuivaa (10-20% RH). Jos ilma on kosteaa (60-80% RH), kävelyn aiheuttama jännite on 2,5 kV. Polyuretaanipehmustetulta tuolilta nouseminen aiheuttaa kuivalla ilmalla 5 kV jännitteen ja kostealla ilmalla 1 kV jännitteen. Tästä huomataan, että kostea ilma vähentää staattista varautumista, ja siten sähköstaattisten purkausten vaaraa. (Viheriäkoski 2001, 25.)

Materiaalit voidaan luokitella niiden sähkönjohtavuusominaisuuksien perusteella eristäviin, varausta poistaviin, johtaviin sekä varautumattomiin materiaaleihin. Eristäviin materiaaleihin kertyy helposti staattista sähköä, sillä niiden sähkönjohtavuus on huono. Eristestä varaus ei purkaudu nopeasti, vaikka maadoitusreitti olisi kunnossa, vaan varaus säilyy pitkiäkin aikoja eristeessä. Varausta poistavat materiaalit ovat optimaalisia materiaaleja käytettäväksi staattiselta sähköltä suojautumiseen. Niiden sähkönjohtavuus on riittävä, jotta varaukset tasoittuvat kohtuullisessa ajassa. Sähkönjohtavuus ei myöskään ole liian suuri, jotta se aiheuttaisi haitallisen suurvirtaisia ja nopeita varausten purkauksia. Johtavilla materiaaleilla sähköinen lataus syntyy triboelektronisesti samalla tavalla kuin eristeillä. Eli triboelektronisessa sarjassa kauimpana toisistaan olevat materiaalit varautuvat voimakkaimmin ollessaan kosketuksissa toisiinsa. Toisin kuin eristeillä, johtavien materiaalien varaukset tasoittuvat nopeasti ja varaus jakautuu tasaisesti materiaalin pinnalla. Johtavien materiaalien varaukset tasoittuvat nopeammin kuin varausta poistavien materiaalien. Sähköisesti varautumattomat materiaalit ovat usein käsitelty tai pinnoitettu erityismateriaaleilla. Nämä antistaattiset materiaalit ovat heikosti varautuvia, mutta eivät rajoita energian siirtymisestä materiaalin läpi. (Part One - An Introduction to ESD 2013; Viheriäkoski 2001, 18.)

3.2 Staattisen sähköän purkaus

Staattisen sähköän purkaus on tuttu ilmiö arkipäiväisessä elämässä. Esimerkiksi villapaidan päältä ottaminen aiheuttaa hangatessaan varautumisen, joka purkautuu kosketettaessa jotain sähköä johtavaa esinettä. Varauksen purkautuminen ilmenee pienenä sähköiskuna, jonka tuntee ja mahdollisesti näkee kipinä. Tällainen staattisen

sähkön purkaus ei ole ihmiselle vaarallinen, koska se on niin lyhytaikainen ja sen energiamäärä on pieni, mutta se voi vaurioittaa herkkiä komponentteja esimerkiksi elektroniikkatuotannossa. (Part One - An Introduction to ESD 2013.)

3.3 Purkausmallit

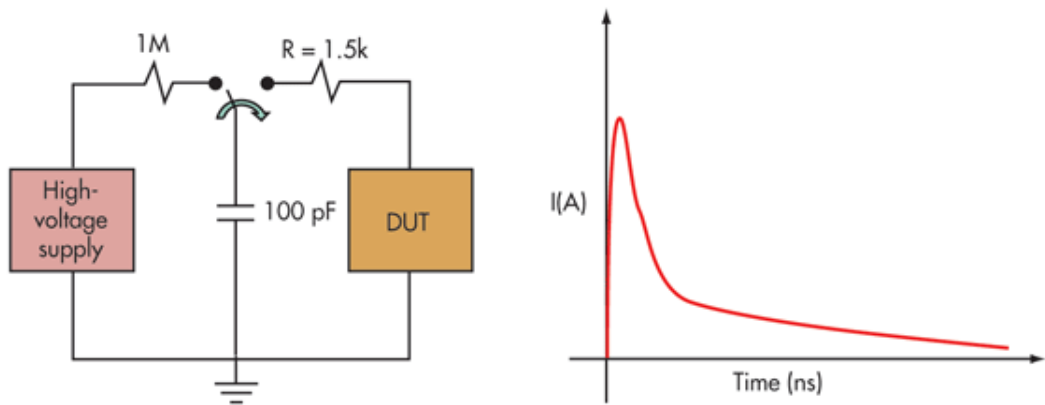
Staattisen sähkön purkautumismekanismia on useita. Niitä pyritään selventämään erilaisten purkausmallien avulla, joista yleisimmät on esitelty seuraavana.

3.3.1 Human body model (HBM)

Ihmiseen kertyy koko ajan sähköistä varausta liikkumisen seurauksena. Sähköisesti varautuneen ihmisen koskettaessa sähköä johtavaan kappaleeseen varaus purkautuu nopeasti. ESD-purkauksia tapahtuu jatkuvasti, mutta niiden havaitseminen on usein mahdotonta. Purkauksien havaitseminen on yksilöllistä ja siihen vaikuttavat ympäristöolosuhteet ja aistien yksilöllisyys. (Viheriäkoski 2001, 26.)

ESD-purkauksessa tehopiikit voivat olla erittäin suuria, sillä virran voimakkuus kasvaa räjähdysmäisesti, kuten kuvasta 2 näkyy. Purkaukset tapahtuvat niin nopeasti, että niiden energiamäärät jäävät mataliksi, joten niistä ei ole vaaraa ihmiselle. Elektroniikkakomponenteille taas nopeatkin purkaukset voivat olla haitallisia. (Viheriäkoski 2001, 26.)

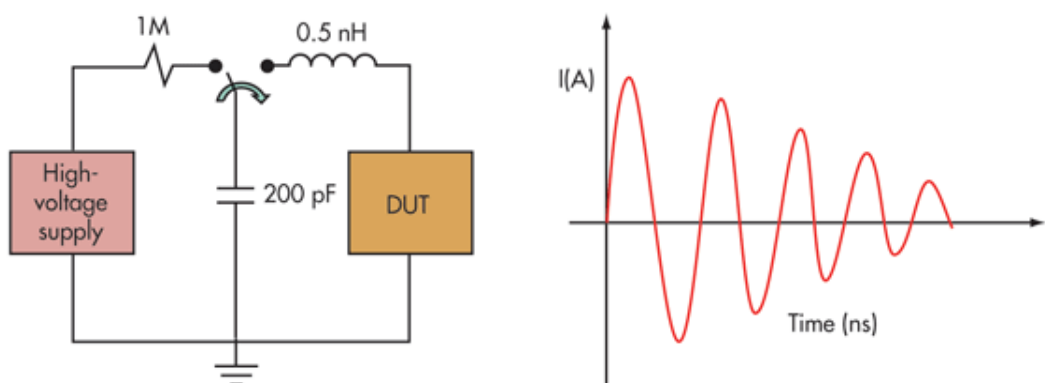
HBM-purkausmallin mukaista tapahtumaa voidaan simuloida kuvion 2 mukaisella piirikaaviolla. Simulaatiolla pyritään altistamaan testattava laite (DUT) ihmisen kosketusta vastaaville virtapiikeille. Simuloinnin avulla voidaan testata komponenttien sietoisuuskykyä ja pakkausmateriaalien suojausominaisuuksia. (Agarwal 2014.)



Kuvio 2 HBM-sijaiskytkentä ja purkauksen aaltomuoto (Agarwal 2014.)

3.3.2 Machine model (MM)

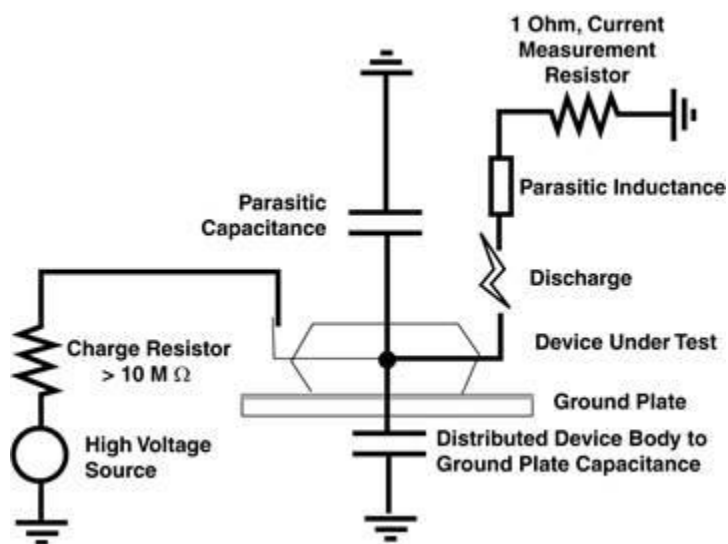
Elektroniikanladontaprosessissa saattaa ilmetä HBM-mallia huomattavasti tehokkaampia ja vaarallisempia ESD-purkauksia. Niitä kuvataan MM-mallilla, jossa esimerkiksi koneen johtava osa tai metallityökalu on varautunut ja joutuu kosketukseen komponentin kanssa, jolloin varaus purkautuu komponentin läpi maahan. Huonon maadoituksen takia suuret koneet saattavat kerätä itseensä staattista sähköä, jolloin aiheutuu ongelmia niiden ollessa kosketuksissa komponenttien kanssa. Tilanteita pyritään simuloimaan kuvion 3 mukaisella kytkennällä. Purkauksen aaltomuoto on aaltoilevaa, jossa virran huippuarvot pienenevät asteittain, kuten kuviosta 3 nähdään. (Viheriäkoski 2001, 28.)



Kuvio 3 MM-mallin sijaiskytkentä ja purkauksen tyypillinen aaltomuoto (Agarwal 2014.)

3.3.3 Charged device model (CDM)

CDM-malli kuvaa varautuneen komponentin suoran maadoituskontaktin aiheuttamaa ESD-purkausta. Komponentti on voinut varautua valmistusympäristössä liikkueensa suoraan triboelektronisen tapahtuman johdosta tai epäsuorasti sähköstaattisen induktion aiheuttaman varauksen seurauksena. Komponentin saadessa maadoituskontaktin, siihen varastoitunut sähkövaraus purkautuu todella nopeasti, usein jopa alle nanosekunnissa. Vaikka purkauksen kesto on lyhyt, voi huippuvirta olla silti useita kymmeniä ampeereja. CDM-mallin mukainen tapahtuma voi olla jossain laitteissa tuhoisampi kuin HBM-mallin. CDM-mallia simuloidaan kuvion 4 mukaisella piirikaaviolla. (Part Five: Device Sensitivity and Testing 2010.)



Kuvio 4 CDM-mallin sijaiskytkentä (Part Five: Device Sensitivity and Testing 2010.)

3.4 ESD-vikaantumismekanismit

ESD-herkät komponentit voivat vikaantua staattisen sähköön purkauksen takia monella tavalla, mutta useimmiten vikaantumisen aiheuttaa muutama seuraavaksi kuvailtu vikaantumismekanismi. Lämpilyönti puolijohdemateriaaliin (Bulk breakdown) on parametrimuutoksia aiheuttava tapahtuma, jossa lämpötila kasvaa korkeaksi suuren virrantiheyden takia. Tällöin materiaali ei enää pysty estämään virran kulkua. Tämä saa aikaan puolijohdemateriaalin lejeeroitumista ja metallin seostumista diffuusio-alueeseen tai toisin päin. (Viheriäkoski 2001, 35.)

Läpilyönti PN-liitoksessa (Thermal secondary breakdown) on PN-liitoksessa (puolijohdediodissa) suuren jännitteen aikaan saama läpilyönti. Läpilyöntikohdassa lämpötila kasvaa voimakkaasti pulssin suuren virrantiheyden takia. Läpilyönnin nopeuden takia lämpö ei ehdi siirtyä laajemmalle alueelle. Liitokseen kerkeää kuitenkin syntyä resistiivistä vuotoa. (Viheriäkoski 2001, 35.)

Pintaläpilyönnissä lähekkäin olevien metallien tai johteiden välillä tapahtuu virran läpilyönti, jonka takia metalli siirtyy höyrystymällä saaden aikaan oikosulkuja tai vuotovirran kasvua. Yleensä pintaläpilyönti etenee eristeen pinnalla liukupurkauksena. (Viheriäkoski 2001, 36.)

Läpilyönti eristeessä aiheutuu ylijännitteestä ja se voi sulattaa elektrodeina toimivia materiaaleja. Tällöin ne höyrystyvät oksidiin syntyneen reiän sisälle ja aiheuttavat resistiivisen vuodon, oikosulun tai parametrimuutoksia. (Viheriäkoski 2001, 36.)

Elektromigraatiossa johtimessa liikkuvat elektronit luovuttavat liikemääräänsä johtimen atomeille, jolloin suuri virrantiheys aiheuttaa metallijohtimien kuumenemisen ja sitä kautta sulamisen ja katkeamisen. Tämä on verrattavissa sulakkeiden toimintaan ja tällöin virran kulku katkeaa kokonaan johtimen katketessa ja komponentti on käytökelvoton. Tällainen vikaantuminen aiheuttaa usein laitteen toimimattomuuden, joten se havaitaan testauksen yhteydessä. (Viheriäkoski 2001, 36; Voldman 2009, 19-20.)

3.5 ESD-purkausten vaikutukset komponenteille

Kaikki elektroniikan komponentit luokitellaan nykyään ESD-herkiksi. Niiden ESD-sietojännitteet kuitenkin vaihtelevat komponentin tyyppin mukaan. ESD-sietojännite on suurin jännitetaso, jonka komponentti kestää vikaantumatta. Organisaation tulisi olla tietoinen käyttämiensä komponenttien ESD-herkkyyden tasosta, ja ottaa se huomioon ESD-hallintaohjelmassa. Komponenttien ESD-herkkyyttä voidaan tutkia tekemällä niille HBM ja CDM -mallien mukaisia altistuksia. Usein on mahdollista saada tietoa komponenttien ESD-herkkyydestä ottamalla yhteyttä suoraan komponenttivalmistajaan. Suurin osa markkinoilla olevista komponenteista kestää HBM-mallin mukaisia alle 100 V jännitteitä, ja se onkin valittu IEC 61340-5-1:ssä vikaantumisherkkyyden perusarvoksi. Standardin raja-arvot perustuvat olettamukseen, että käytössä ei

ole alle 100 V jännitteitä kestäviä komponentteja. Jotkin erityisen herkkät komponentit voivat kuitenkin vikaantua alle 100 V jännitteistä, ja se tulisi ottaa huomioon ESD-hallintaohjelman raja-arvoissa. (CLC/TR 61340-5-2:2008, 12.)

Staattisen sähköpurkauksen komponentille aiheuttama vikaantuminen voi johtua joko suurista virrantiheyksistä tai suurista sähkökentän voimakkuuksista. ESD-purkauksen aiheuttamat vikaantumiset jaetaan välittömiin ja piileviin vikoihin. Välittömät viat aiheuttavat komponentin täydellisen toimimattomuuden tai toiminnan heikkenemisen heti purkauksen jälkeen. ESD-purkaus on voinut aiheuttaa komponentissa välittömästi metallisten johtimien sulamisen ja katkeamisen, liitosten rikkoutumisen tai metallien hapettumisen. Tällöin laitteen virtapiirit vahingoittuvat pysyvästi. Tällaiset komponenttien välittömät viat voidaan yleensä havaita testeissä ennen laitteen siirtymistä tuotantoprosessissa eteenpäin. Jos purkaus tapahtuu testien jälkeen, vikaantuminen havaitaan laitteen toimimattomuutena vasta lopullisessa testissä ennen toimitusta asiakkaalle. (Part One - An Introduction to ESD 2013)

Piileviä vikoja on yleensä erittäin hankala havaita testeissä. Ne eivät ratkaisevasti muuta laitteen toimintaa, mutta pitkällä aikavälillä huonontavat laitteen luotettavuutta ja lyhentävät elinikää. Piilevät viat voivat ilmetä viikkojen tai kuukausien jälkeen ESD-purkauksesta aiheuttaen komponenttien toiminnan muuttumisen ja siten epämääräisiä toimintahäiriöitä. Ne voivat aiheuttaa esimerkiksi komponenttien suoritusarvojen, kuten vuotovirran, jännitekestoisuuden ja kytkentänopeuden muuttumisen. Koska ESD-purkauksesta syntyneet piilevät viat aiheuttavat laitteen toimintahäiriöitä vasta myöhemmin, on niiden alkuperää hankala selvittää, varsinkin kun laite on testeissä vaikuttanut täysin toimivalta. Piilevien vikojen aiheuttavat laitteen toimintahäiriöt jäävät usein selvittämättömiksi. (Part One - An Introduction to ESD 2013; Kuisma N.d.)

4 SFS EN 61340-5-1 mukainen ESD-hallintaohjelma

4.1 Yleistä

Organisaation ESD-suojauksen suunnittelu perustuu standardin mukaiseen ESD-hallintaohjelmaan. Organisaation on luotava, dokumentoitava ja toteutettava standardin SFS EN 61340-5-1:2016 mukainen ESD-hallintaohjelma. ESD-koordinaattoriksi valitaan toimenkuvaan sopiva henkilö, jonka vastuulla ESD-hallintaohjelma ja siten organisaation ESD-asiat ovat. Henkilön tulee tuntea organisaation ESD-herkkien laitteiden käsittelyyn liittyvät prosessit sekä olla perehtynyt staattisen sähkön ilmiöihin. Standardin mukaiset vaatimukset eivät välttämättä sovellu kaikkiin tapauksiin. Tarpeen vaatiessa onkin arvioitava soveltuvatko vaatimukset omaan organisaatioon, ja tarpeen mukaan muokattava niitä. Standardista poiketessa on syyt perusteltava selvästi ja ne on dokumentoitava. Suunniteltaessa ESD-hallintaohjelmaa organisaation on käsiteltävä kaikkia seuraavia vaatimuksia:

- koulutussuunnitelma
- tuotehyväksyntä
- kelpoisuuden todentamissuunnitelma
- maadoitus-/liitäntäjärjestelmät
- henkilömaadoitus
- EPA-vaatimukset
- pakkausjärjestelmä
- merkinnät.

(SFS-EN 61340-5-1:2016, 10-11.)

4.2 Hallinnolliset vaatimukset

Yksi ESD-hallintaohjelman tärkeimmistä tavoitteista on saada koulutuksella henkilöstö ymmärtämään ESD-suojustoimenpiteiden tarkoitus ja sitoutumaan niiden noudattamiseen. Koulutukseen valitaan henkilöt, jotka työskentelevät ESD-herkkien osien parissa, ja koulutus on suoritettava hyväksytysti ennen osien käsittelyä. Koulutuksen onnistumista tulee arvioida soveltuvilla menetelmillä ja se on dokumentoitava. Koulutussuunnitelmassa tulee määritellä, kuinka usein koulutuksia järjestetään ja millä menetelmällä. (SFS-EN 61340-5-1:2016, 11.)

Organisaation on hyväksyttävä kaikki ESD-hallintatarvikkeet, joita käytetään ESD-hallintaohjelmassa. Taulukossa 1 ja 2 näkyvät vaadittavat testausmenetelmät ja raja-arvot ESD-hallintatarvikkeille. Jokaisen ESD-hallintatarvikkeen tuotehyväksyntään vaaditaan organisaation tai muun tahon tekemä IEC standardien mukainen dokumentoitu testaus. Myös valmistajan julkaisemien datalehtien tiedot riittävät, mikäli niissä on viitattu kyseiseltä tarvikkeelta vaadittavaan IEC testausmenetelmään. Jos organisaatio on kerennyt asentamaan osan ESD-hallintalaitteista ennen standardin käyttöönottoa, niiden tuotehyväksyntään riittävät jatkuvat kelpoisuuden todentamistiedot. Mikäli käytössä on ESD-hallintatarvikkeita, jotka eivät löydy taulukoista 1 ja 2, löytyy niiden tuotehyväksyntään ohjeistukset standardista IEC TR 61340-5-2. (SFS-EN 61340-5-1:2016, 11-12.)

Kelpoisuudentodentamissuunnitelma on tärkeä osa ESD-hallintaohjelmaa, sillä seuranta on ehdottoman tärkeää ESD-suojauksen ylläpidolle. Todentamissuunnitelmaan kirjataan, kuinka usein käytettävät ESD-hallintalaitteet testataan, testausmenetelmät ja raja-arvot sekä testauslaitteisto. Jos organisaatio käyttää muita kuin standardien mukaisia testausmenetelmiä, ne on dokumentoitava hyvin ja osoitettava että tulokset ovat standardien mukaisia. Testauksissa tulisi ottaa olosuhteet huomioon, ja osa testauksista tulisi tehdä organisaatiossa ilmenevän alimman suhteellisen kosteustason mukaisissa olosuhteissa. (SFS-EN 61340-5-1:2016, 12; CLC/TR 61340-5-2:2008, 22-28.)

4.3 Tekniset vaatimukset

4.3.1 EPA-alue

Staattiselta sähköltä suojattu alue, EPA (ESD Protected Area), toimii perustana ESD-purkauksien ehkäisyssä elektroniikkatuotannossa. EPA voi olla esimerkiksi yksi työpiste tai vaikka kokonainen tuotantolinja. Suojatun alueen tulee mahdollistaa herkkien komponenttien käsittelyn ilman staattisen sähkön purkauksia. Staattisen sähkön muodostumista on mahdotonta estää, mutta hyvällä maadoituksella voidaan varaukset purkaa hallitusti. EPA-alueella materiaalivalinnoilla pyritään minimoimaan varausten syntyminen. EPA-alueella ESD-vaurioiden eliminoimiseksi kaikkien ESD-herkkien

osien ja niiden kanssa kosketuksiin joutuvien johteiden väliset potentiaalierot on eliminoitava. Näihin lukeutuvat esimerkiksi henkilöt, kalusteet, koneet ja tarvikkeet.
(ESD Protected Area, EPA. N.d)

IEC 61340-5-1 standardi asettaa seuraavia vaatimuksia EPA-alueeseen liittyen:

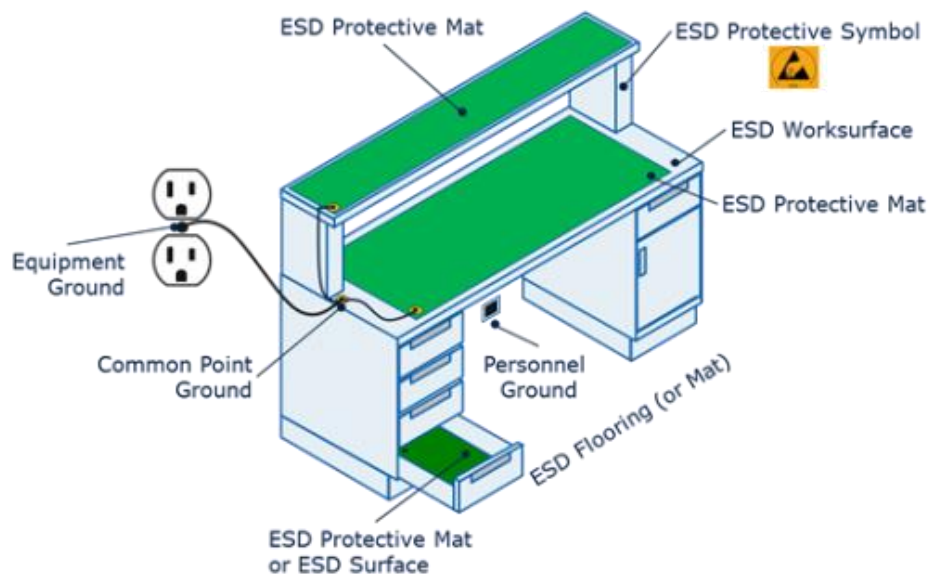
- ESD-herkkiä laitteita tulee käsitellä vain EPA-alueella. Jos ESD-herkkä laite poistetaan EPA-alueelta, tulee se suojata vaurioitumiselta ESD-suojapakkauksella tai tarkoitukseen suunnitellulla siirtimellä.
- EPA-alue tulee olla selkeästi rajattu ja merkitty asiaankuuluvilla kylteillä ja merkinnoilla (kuvio 5). Alueelle saapuvan on huomattava, että alueella noudatetaan erityistoimenpiteitä.
- EPA-alueella saa liikkua vain ESD-koulutuksen suorittaneet henkilöt. Mikäli jonkun muun täytyy päästä alueelle, on hänellä oltava ESD-koulutuksen saanut saattaja.
- EPA-alueelta tulee poistaa kaikki epäoleelliset eristekappaleet. Tuotannossa tarvittavat eristekappaleet ja eristetyt johtimet tulee tarkistaa IEC 61340-5-1 standardin mukaisesti muodostavatko ne uhan ESD-herkille komponenteille.
(CLC/TR 61340-5-2:2008, 46.)



Kuvio 5 ESD-varoitustaulu, keltainen pohjaväri (EPA-varoitustaulut N.d)

EPA-alueella henkilömaadoituksen jälkeen ESD-hallintaohjelman toiseksi tärkein tekijä on työtasojen maadoitus. Henkilömaadoituksesta kerrotaan tarkemmin myöhemmänä. Käsiteltävien osien ja työskentelypinnan tulee olla samassa sähköisessä potentiaalissa purkauksien välttämiseksi. Työskentelypinnoiksi on olemassa monia erilaisia vaihtoehtoja, joiden mekaaniset, sähköiset ja fyysiset ominaisuudet vaihtelevat. Tavallisesti käytetään joko puolijohtavaa laminaattia tai ESD-mattoa työpöydän päällä kuvion 6 mukaisesti. Työskentelypinnat voidaan jakaa kahteen perusluokkaan,

yksikerroksisiin ja monikerroksisiin materiaaleihin. Yksikerroksisten työskentelypintamateriaalien sähköiset ja fyysiset ominaisuudet ovat samat kaikkialla materiaalissa. Monikerroksiset työskentelypintamateriaalit taas koostuvat kahdesta tai kolmesta erillisestä kerroksesta, joiden sähkönjohtavuudet poikkeavat toisistaan. IEC 61340-2-3 standardissa on esitelty työskentelypintamateriaalien sähköisen resistanssin testausmenetelmä. Vaatimusten mukaiset raja-arvot resistanssille näkyvät taulukossa 1. (CLC/TR 61340-5-2:2008, 52.)



Kuvio 6 ESD-suojattu työpiste (Part Three: Basic ESD Control Procedures and Materials 2014.)

Työtasojen lisäksi työpisteiden ja varastoiden hyllyt tulisi maadoittaa kunnolla, mikäli niitä käytetään pakkaamattomien ESD-herkkien osien säilyttämiseen. Mikäli vain osa tilassa olevista hyllyistä on maadoitettu, täytyy ne merkitä selkeästi, jotta ne erotetaan selvästi maadoittamattomista hyllyistä. Hyllyjen maadoituksen tarpeellisuus on tapauskohtaista, joten se päätös jää ESD-koordinaattorin vastuulle. Jos hyllyjä päätetään maadoittaa, tulee niiden testaus sisällyttää osaksi ajoittaista prosessin katselmuohjelmaa. Soveltuva testausmenetelmä on esitetty standardissa IEC 61340-2-3, ja resistanssin raja-arvot ovat nähtävissä taulukossa 1. (CLC/TR 61340-5-2:2008, 100.)

Liikuteltavaa kalustoa käytettäessä ESD-herkkien osien siirtämiseen prosessin aikana, tulee ne olla maadoitettavissa lastauksen ja purkamisen aikana. Käytettäessä ESD-

lattiamateriaalia, voidaan liikuteltava kalusto maadoittaa suoraan sen kautta maadoitusketjujen, johtavien pyörien ja kaapeli- tai kuulasysteemien avulla. Tällöin maadoituskytkentä on jatkuva, eikä se vaadi työntekijältä toimenpiteitä. On kuitenkin pidettävä huolta, että pinnat (työtaso, lattia, maadoitusmekanismi) pysyvät puhtaina pölystä ja liasta, eikä maadoituskytkentä pääse siten katkeamaan. Mikäli käytössä ei ole ESD-lattiamateriaaleja, tulee liikuteltava kalusto maadoittaa kytkemällä ne maahan johdolla ennen lastausta ja purkua. Myös liikuteltavan kaluston maadoituskytkennät tulee testata ajoittain IEC 61340-2-3 standardin mukaisesti. (CLC/TR 61340-5-2:2008, 100-102.)

Staattiselta sähköltä suojaavia lattiamateriaaleja käytetään EPA-alueella henkilöiden ja ESD-hallintatarvikkeiden maadoitukseen. Lattiamateriaalit ehkäisevät staattisten varausten syntymistä ja tarjoavat kohtuullisen johtavan maadoitusreitien henkilöille ja ESD-hallintatarvikkeille. Useimmat niistä sisältävät johtavia aineita, jolloin varaus pääsee purkautumaan niiden kautta maahan. Jalkine-lattiamateriaali maadoitusreitien toimimiseksi työntekijöiden tulee käyttää ESD-jalkineita ja työskennellä seisten. Tavalliset kengät eristävät henkilön lattiasta, jolloin maadoitusreittiä ei ole. Erilaiset ESD-jalkineet toimivat paremmin toisilla lattiamateriaaleilla, joten on tärkeää varmistaa niiden yhteensopivuus parhaan maadoituksen aikaansaamiseksi. Sopivaa lattiamateriaalia valittaessa tulee kiinnittää huomiota muun muassa olosuhteisiin, kuormitukseen, asennuspinta-alaan ja pinnan materiaaliin. Erilaisia ESD-lattiamateriaalivaihtoehtoja ovat esimerkiksi kumilaatat, korkeapainelaminaatit, lattiamatot ja pintakäsittelyt. Sopiva varauksia purkava lattiamateriaali valitaan käyttötarkoituksen mukaan. Lattiamateriaalien sähköisen resistanssin mittaukselle on olemassa oma standardi, IEC 61340-4-1. Toimiakseen lattiamateriaalit vaativat ylläpitoa ja puhdistusta tarkoitukseen sopivilla aineilla. (CLC/TR 61340-5-2:2008, 62-70.)

Lähtökohtaisesti eristetyt johteet ja eristemateriaalit tulisi poistaa EPA-alueelta. Ne keräävät itseensä staattista varausta eikä niitä voida maadoittaa suoralla yhteydellä maahan. Monesti niitä ei voida kuitenkaan poistaa alueelta, joten niiden sähkövarausten purkamiseen voidaan käyttää ilman ionisointia. Ilman ionisointi neutraloi materiaalien varauksia varaamalla sähköisesti ympäröivän ilman kaasumolekyylejä. Vastakkaismerkkiset kaasumolekyylit tarttuvat varautuneiden kappaleiden pinnoille ja neutraloivat sähkövarauksen. Ionisaattorit eivät korvaa muita maadoitusmenetelmiä.

Niitä voidaan käyttää varmistamaan muita staattisen sähkön hallintamenetelmiä tai kun kohteita ei voida maadoittaa kunnolla, esimerkiksi puhdastiloissa. Standardissa IEC 61340-4-7 on esitelty ionisointiin liittyvät testausmenetelmät ja laitteiston valintaan liittyvät tekijät. (CLC/TR 61340-5-2:2008, 74-76.)

Taulukko 1 EPA-alueen vaatimukset (SFS-EN 61340-5-1:2016, 18.)

EPA-aluetta koskevat vaatimukset	ESD-hallintatarvike	Tuotehyväksyntä ^a		Kelpoisuuden todentaminen ^b	
		Testausmenetelmä	Raja-arvot ^c	Perustana oleva testausmenetelmä	Raja-arvot ^c
	Työtasot, säilytystelineet ja työntövaunut ^g	IEC 61340-2-3	$R_{gp} < 1 \cdot 10^9 \Omega$ $R_{p-p} < 1 \cdot 10^9 \Omega^f$	IEC 61340-2-3	$R_g < 1 \times 10^9 \Omega$
	Rannekkeen liitoskohta				$R_g < 5 \times 10^6 \Omega$
	Lattiapinnoite	IEC 61340-4-1 ^{d, e}	$R_{gp} < 1 \times 10^9 \Omega$	IEC 61340-4-1	$R_g < 1 \times 10^9 \Omega$
	Ionisointi	IEC 61340-4-7	Purkautuminen (1 000 V:sta 100 V:iin ja — 1 000 V:sta — 100 V:iin) < 20 s Jäännösjännite < ± 35 V	IEC 61340-4-7	Purkautuminen (1 000 V:sta 100 V:iin ja — 1 000 V:sta — 100 V:iin) < 20 s tai käyttäjän määrittämä Jäännösjännite < ± 35 V
	Istuimet	IEC 61340-2-3 (resistanssia maadoituspisteeseen koskevat mittaukset)	$R_{gp} < 1 \times 10^9 \Omega$	IEC 61340-2-3 (resistanssia maahan koskevat mittaukset)	$R_g < 1 \times 10^9 \Omega$
	Staattisen sähkön hallinta vaatteet	IEC 61340-4-9 tai käyttäjän määrittämä menetelmä	$R_{p-p} < 1 \times 10^{11} \Omega$ tai käyttäjän määrittämä arvo	IEC 61340-4-9 tai käyttäjän määrittämä menetelmä	$R_{p-p} < 1 \times 10^{11} \Omega$ tai käyttäjän määrittämä arvo
	Maadoitettavat staattisen sähkön hallinta vaatteet	IEC 61340-4-9	$R_{gp} < 1 \times 10^9 \Omega$	IEC 61340-4-9	$R_{gp} < 1 \times 10^9 \Omega$

^a Tuotehyväksyntää varten testaamisympäristön suhteellisen kosteuden olisi oltava (12 % ± 3) % RH ja lämpötilan olisi oltava 23 °C ± 2 °C. Jos viiteasiakirjana olevassa IEC:n standardissa ei ole määritelty vähimmäiskesto tuotehyväksynnässä käytettävälle ympäristöolosuhteille altistamiselle, ajan olisi oltava 48 tuntia.

^b Kelpoisuuden todentamissarakkeessa mainitut testausmenetelmät koskevat vain perusmittausta. Koko testausmenettelyn toteuttaminen ei ole välttämätöntä.

^c Tässä taulukossa käytetyt symbolit: R_{p-p} viittaa pisteiden väliseen resistanssiin. R_g viittaa resistanssiin maahan ja R_{gp} viittaa resistanssiin maadoituspisteeseen.

^d Suurin sallittu testausjännite ESD-lattiapinnoitteen mittaamiseen tämän standardin mukaisessa ESD-ohjelmassa on 100 V.

^e Jos lattiapinnoitetta käytetään ESD-herkkiä osia käsittelevien henkilöiden maadoittamiseen, katso vaatimukset taulukosta 2.

^f Mikäli CDM-mallin (varautuneesta komponentista tapahtuvan purkauksen mallin) mukaiset vauriot ovat mahdollisia, on suositeltavaa käyttää pisteiden välisen resistanssin vähimmäisraja-arvoa $1 \times 10^4 \Omega$.

^g Työtasoksi määritellään mikä tahansa taso, jolle suojaamaton ESD-herkkiä osa asetetaan.

ESD-herkkien tuotteiden pakkausta suunniteltaessa tulee ottaa huomioon standardin IEC 61340-5-3 mukaiset vaatimukset. Standardi käsittelee ominaisuuksia, joita ESD-suojaavalla pakkauksella on oltava kaikissa tuotannon, kuljetuksen ja varastoinnin

vaiheissa. ESD-suojattujen pakkausten tarkoituksena on tasoittaa tuotteen ESD-herkkyyden ja jakeluympäristön uhkien välistä eroa. Sopivan pakkauksen valintaan vaikuttavat tuotteiden ESD-herkkyys ja kuljetusolosuhteet. ESD-herkkien tuotteiden pakkauksessa on ensisijaisen tärkeitä ottaa huomioon sähköiset näkökulmat ja siihen liittyvät uhkat. (CLC/TR 61340-5-2:2008, 102-110.)

ESD-herkät laitteet tulee merkitä asiakkaan vaatimusten mukaisesti. Mikäli asiakas ei vaadi laitteiden merkitsemistä, tulee organisaation päättää, onko merkintä tarpeellista. Merkityt pakkaukset kertovat käsittelijälle, että ne sisältävät ESD-herkkiä tuotteita ja ovat alttiita staattisen sähkön purkauksille. Jos tuotteita tai pakkausmateriaalia merkitään, tulisi käyttää tarkoitukseen soveltuvia kuvion 7 mukaisia merkkejä. Joskus halutaan merkitä myös muita kohteita, kuten hyllyjä tai muita kalusteita. Tiedot niistä tulisi sisällyttää ESD-hallintaohjelmasuunnitelmaan ja ne tulisi testata vaatimusten mukaisiksi ennen merkitsemistä. (CLC/TR 61340-5-2:2008, 110-114.)

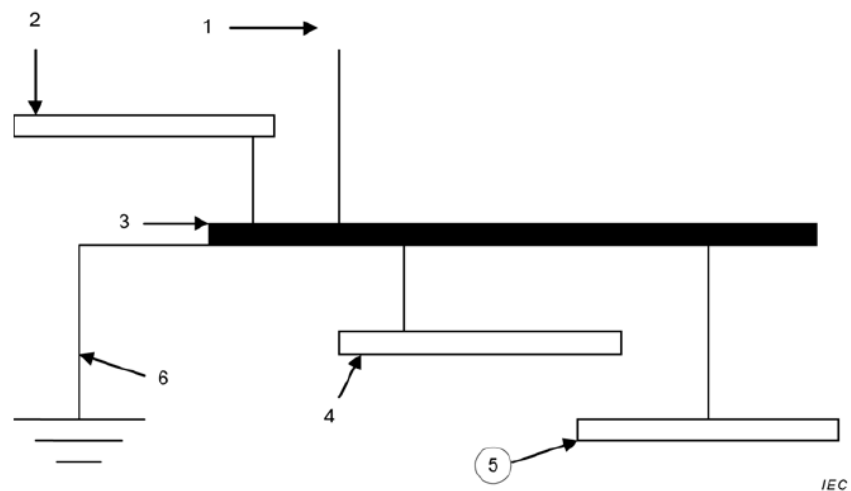


Kuvio 7 ESD-herkän tuotteen varoitustarra, keltainen pohjaväri (EPA-tuotetarrat N.d)

4.3.2 Maadoitusjärjestelmät

EPA-alueen maadoitus voidaan toteuttaa kolmella hyväksytyllä tavalla. Ensimmäinen ja suositeltavin tapa on maadoittaa ESD-hallintaosille ja maadoitetuille henkilöille yhteinen ESD-maapiste suojamaahan kuvion 8 mukaisesti. Toinen mahdollinen tapa toteuttaa maadoitus, on käyttäminen toiminnallista maata. Maadoitusjohdin voi olla tässä tapauksessa sauvaelektrodi, maadoituspaalu tai erillinen johdotusjärjestelmä, joka kytketään maahan sähkökeskuksessa. Tällöin suojamaa ja toiminnallinen maa

tulee mahdollisuuksien mukaan kytkeä toisiinsa niiden välisen potentiaalieron eliminomiseksi. Jos käytettävissä ei ole maadoituskiskoa, voidaan ESD-suojaus toteuttaa kytkemällä kaikki ESD-hallintatarvikkeet yhteisen riittävän johtavan liitäntapisteen kautta toisiinsa. Kunkin suojaustarvikkeen ja yhteisen liitäntapisteen välisen maksimiristanssiarvon on oltava standardin mukaisen raja-arvon sisällä, jotka on listattu taulukoissa 1 ja 2. Näin saadaan EPA-alueen kaikki osat samaan sähköiseen potentiaaliin, jolloin niiden välillä ei ole potentiaalieroja, eikä ESD-purkauksia synny. (SFS-EN 61340-5-1:2016, 13.)



Selite

- 1 Maadoitusranneke (ranneke ja maadoitusjohto)
- 2 Työtaso
- 3 Yhteinen maapiste
- 4 Matto
- 5 Lattia
- 6 Suojamaa tai toiminnallinen maa (jos käytetään toiminnallista maata, se on liitettävä suojamaahan)

Kuvio 8 Suositeltavin tapa kytkeä ESD-hallintatarvikkeet maahan (SFS-EN 61340-5-1:2016, 14.)

4.3.3 Henkilömaadoitus

Jokainen ESD-herkkiä osia käsittelevä henkilö tulee maadoittaa tai kytkeä potentiaalintasausliitäntään. Tällöin henkilö ja käsiteltävät ESD-osat ovat samassa sähköisessä potentiaalissa, jolloin ESD-purkauksia ei tapahdu. ESD-suojatuilla työpisteillä istuen työskentelevät henkilöt tulee maadoittaa ensisijaisesti rannekejärjestelmällä. Rannekejärjestelmällä henkilö ja ESD-herkät osat saadaan samaan sähköiseen potentiaaliin,

jolloin niiden välillä ei synny ESD-purkauksia. Saatavilla on runsaasti erilaisia ranneke-tyyppejä, niin kankaisia johtavilla kuiduilla kuin metallisia. Materiaalilla ei ole toimivuuden kannalta suurta merkitystä, mutta rannekkeen tulisi koskettaa ihoa koko matkan ranteen ympäri. Ranneke kytketään maahan tai yhteiseen liitäntäpisteeseen maadoitusjohdolla. Maadoitusjohdossa on hyvä olla pikaliitin, jotta henkilö ei ole sidottu työpisteeseensä ja johdon irrotus on nopeaa. Yleisimpiä rannekejärjestelmiä ei tulisi henkilöturvallisuuden takia käyttää tilanteissa, joissa on suojaamaton 250 V tai suurempi virtapiiri. Rannekkeiden testausta suositellaan päivittäin standardin CLC/TR 61340-5-2 mukaisesti. (CLC/TR 61340-5-2:2008, 54-62.)

Työpisteillään seisaallaan työskentelevät henkilöt maadoitetaan rannekejärjestelmällä tai lattiapinnoite-jalkinejärjestelmällä. Lattiapinnoite-jalkinejärjestelmää käytetään silloin, kuin henkilö on runsaan liikkumisen vuoksi estynyt käyttämään rannekejärjestelmää. Käytettäessä lattiapinnoite-jalkinejärjestelmää, on henkilön käytettävä molemmissa jaloissaan ESD-jalkineita ja lisäksi seuraavien ehtojen on täyttyvä:

- järjestelmän kokonaisresistanssi (henkilöstä jalkineiden ja lattiapinnoitteen kautta maahan) $<1,0 \times 10^9 \Omega$
- henkilöstä syntyvä maksimijännite $<100V$.

ESD-jalkinevaihtoehtoja ovat ESD-kengät, maadoitushihnat kengän pohjiin ja johtavat kengänpäälliset. ESD-jalkineen tulisi peittää jalkapohja täysin, sillä muussa tapauksessa kävellessä syntyy varauksia aina silloin, kun jalkineen maadoittuva osa ei kosketa lattiaa (esimerkiksi käytettäessä kantapäämaadoitushihnaa). Lattiapinnoite-jalkinejärjestelmän toimivuus tulee varmistaa ajoittain standardin IEC 61340-4-5 mukaisilla testeillä. Muut henkilömaadoitukseen liittyvät vaatimuksen on esitetty taulukossa 1. (CLC/TR 61340-5-2:2008, 70-72.)

ESD-istuimia voidaan käyttää henkilöiden maadoituksessa. Tällöin on oltava käytössä myös ESD-lattiamateriaali ja ESD-kengät. Tuolin on oltava kaikilta osiltaan johtavaa, jotta henkilössä oleva varaus pääsee purkautumaan. Istuin ei ole kuitenkaan niin luotettava maadoitustapa kuin rannekejärjestelmä tai lattiapinnoite-jalkinejärjestelmä. ESD-istuinien etuna normaaleihin työtuoleihin verrattuna on, että ne vähentävät liikkumisen aiheuttamaa staattista jännitettä turvalliselle tasolle. Normaalit työtuolit voivat indusoida merkittäviä jännitetasoja käyttäjään, jos käytössä ei ole rannekejärjestelmää. ESD-tuolien käyttäminen henkilömaadoitukseen on perusteltua silloin,

kun henkilö työskentelee ainakin osan ajasta istuen, ja rannekejärjestelmää ei voida käyttää. ESD-tuolien kautta kulkevaa maadoitusketjua tulee testata standardissa IEC 61340-2-3 esitellyn maadoitusresistanssin yleisen testausmenetelmän mukaisesti. Maadoitusresistanssin raja-arvot ovat nähtävissä taulukossa 1. (CLC/TR 61340-5-2:2008, 72-74.)

Taulukko 2 Henkilömaadoituksen vaatimukset (SFS-EN 61340-5-1:2016, 16.)

Tekninen vaatimus	ESD-hallintatarvike	Tuotehyväksyntä		Vaatimustenmukaisuuden todentaminen	
		Testausmenetelmä	Raja-arvot ^b	Testausmenetelmä	Raja-arvot ^b
Henkilömaadoitus	Maadoitusrannekkeet (rannekkeet ja maadoitusjohdot)	IEC 61340-4-6	$R < 5 \times 10^6 \Omega$ tai käyttäjän määrittämä arvo	Katso rannekejärjestelmä	
	Rannekeresistanssi	IEC 61340-4-6			
		— sisäinen	$\leq 1 \times 10^5 \Omega$	Ei sovellettavissa	
		— ulkoinen	$> 1 \times 10^7 \Omega$	Ei sovellettavissa	
	Rannekejärjestelmä ^a	Ei sovellettavissa		IEC 61340-4-6 Rannekkeen jatkuvuudesta	$R < 3,5 \times 10^7 \Omega$
	Jalkineet	IEC 61340-4-3c	$R \leq 1 \times 10^8 \Omega$	Katso henkilö-jalkinejärjestelmä	
	Henkilö-jalkine-lattiapinnoitejärjestelmä	IEC 61340-4-5	$R_g < 1,0 \times 10^9 \Omega$ ja henkilöstä syntyvän jännitteen absoluuttinen arvo $< 100 \text{ V}$ (viiden korkeimman arvon keskiarvo)	IEC 61340-4-5	$R_g < 1,0 \times 10^9 \Omega^{d,f}$
Henkilö-jalkinejärjestelmä	Ei sovellettavissa		Katso liite A ^e	$R_{gp} < 1,0 \times 10^8 \Omega$	

^a Jos rannekemaadoitusyhteyden osana käytetään ESD-vaatetta, järjestelmän kokonaisresistanssin on oltava pienempi kuin $3,5 \times 10^7 \Omega$ henkilö, vaate ja maadoitusjohto mukaan laskettuina.

^b Tässä taulukossa käytetyt symbolit: R_g viittaa resistanssiin maahan, R_{gp} viittaa resistanssiin maadoitettavaan pisteeseen.

^c Jalkineiden tuotehyväksynnän osalta standardia IEC 61340-4-3 käytettäessä testauksen ympäristöolosuhteiden olisi oltava (12 ± 3) % RH ja $23 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$.

^d Ajoittain olisi tehtävä henkilöstä syntyvän jännitteen testi, jotta varmistetaan, että jännite on alle 100 V.

^e Resistanssin raja-arvo koskee mittausta kummastakin jalasta erikseen, ei kahdesta rinnakkain.

^f Vaadittu raja-arvo $< 1,0 \times 10^9 \Omega$ on suurin sallittu arvo. Käyttäjän olisi nimettävä jalkineille ja lattialle tuotehyväksynnässä mitatuille resistanssin raja-arvoille yläraja, jotta noudatetaan henkilöstä syntyvän jännitteen raja-arvoa $< 100 \text{ V}$ ja käytettävä näitä resistansseja kelpoisuuden todentamiseen.

EPA-alueella työskentelevien henkilöiden käyttämillä ESD-vaatteilla voidaan parantaa ESD-turvallisuutta. ESD-vaatteiden tarve kuitenkin vaihtelee tilannekohtaisesti, joten niiden käyttö jää ESD-koordinaattorin päätettäväksi. Käsiteltäessä erityisen herkkiä ja kalliita komponentteja, joiden CDM-jännitteen sietokyky on alhainen, on erityisen hyödyllistä käyttää ESD-vaatetusta. Toisaalta jos laitoksessa on lämmin ja kostea ilma ja henkilöt käyttävät lyhythaisia paitoja eikä tuotteet ole erityisen ESD-herkkiä niin

ESD-vaatetuksen käyttö ei ole välttämätöntä. Käytettäessä ESD-vaatteita osana staattisen sähkön hallintaa, niiden toimivuutta pitää testata standardissa IEC 61340-4-9 esiteltyjen menetelmien mukaisesti. (CLC/TR 61340-5-2:2008, 94-96.)

5 Tutkimusmenetelmät

Opinnäytetyö toteutettiin laadullisena eli kvalitatiivisena tutkimuksena. Aineiston keräämiseen käytettiin vika- ja vaikutusanalyysejä sekä havainnointia. Vika- ja vaikutusanalyysi toteutettiin alkukartoituskäynnin yhteydessä. Havainnointia tehtiin alkukartoituskäynnin lisäksi alueella työskentelyn ohessa.

5.1 Laadullinen tutkimus

Laadullisessa tutkimuksessa pyritään saamaan tuloksia ilman tilastollisia keinoja. Siinä ei käytetä hyväksi lukuja ja niiden välisiä suhteita. Laadullinen tutkimus pyrkii rakentamaan lukijalle ymmärryksen ilmiöstä, ja käsittelee yleensä yksittäistä tapusta syvällisesti. Laadullisen tutkimuksen menetelmiä ovat esimerkiksi havainnointi ja haastattelu, joiden avulla pyritään etsimään vastauksia tutkimusongelmaan. (Kananen 2008, 24-25)

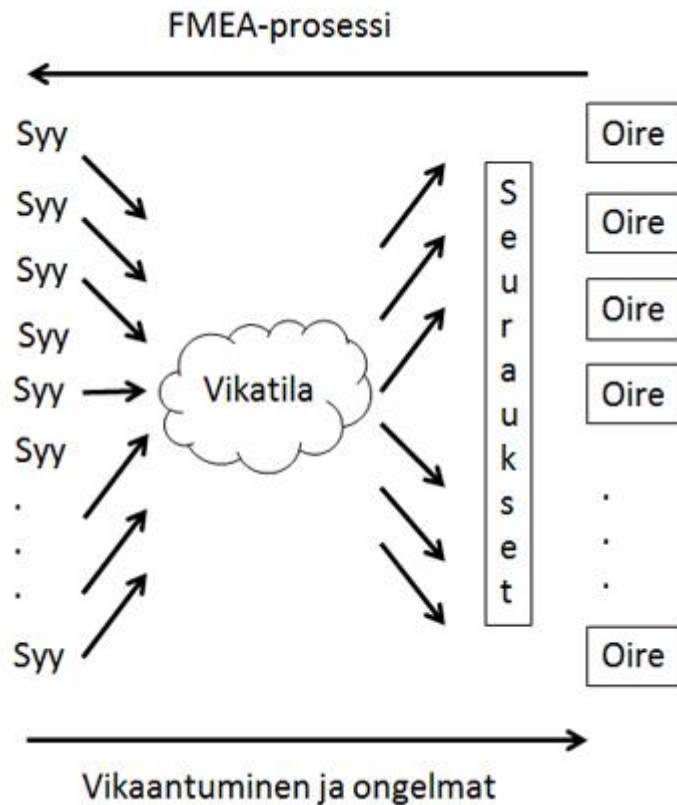
5.2 Vika- ja vaikutusanalyysi (FMEA)

Opinnäytetyön aineistonkeruumenetelmänä käytettiin FMEA-analyysejä (Failure Mode and Effects Analysis). FMEA on työkalu, jonka avulla voidaan systemaattisesti tunnistaa tapoja ja menetelmiä, joiden mukaan tuote tai prosessi voi epäonnistua ja sitä kautta suunnitella ennaltaehkäiseviä toimenpiteitä niiden parantamiseksi. FMEA tyyppejä on useita erilaisia. Kaikki niistä kuitenkin keskittyvät samaan riskienhallinta-toimintaan ja kriittisten riskien havaitsemiseen ja poistamiseen. Ensimmäisiä FMEA-tyyppejä ovat:

- järjestelmä - FMEA
- suunnittelu - FMEA
- prosessi - FMEA
- palvelu - FMEA
- ohjelmisto - FMEA

Tässä työssä käytettiin prosessi – FMEA:ta, sillä riskejä etsitään koko elektroniikanlaidonta prosessista. Työkalun avulla vikaantumismahdollisuuksien riskien suuruutta voidaan arvioida ja luokitella ne kriittisyyden perusteella. Priorisoimalla löydökset voidaan toimenpiteet kohdistaa korkeimman riskiluokan ongelmiin. FMEA-analyysi on ennaltaehkäisevää toimintaa, jonka avulla voidaan prosessin luotettavuutta ja tuotteiden laatua parantaa eliminoimalla mahdollisia virheitä jo ennakolta. Se myös lisää prosessin läpimenokapasiteettiä ja vähentää takuukustannuksia, kun tuotteita ei vikaannu niin paljoa prosessin aikana. FMEA myös osaltaan tukee työturvallisuutta, kun mahdollisia vikaantumistapoja ehkäistään. (Moisio 2009; FMEA, DFMEA, PFMEA, and FMECA: An Overview of FMEA Types. 2018.)

Prosessi – FMEA:ssa riskien priorisointi tapahtuu kolmen asteikolla 1-10 arvioitavan kohdan mukaan. Ne ovat vikatapahtuman vakavuus (1 pienin, 10 suurin), vian todennäköisyys (1 epätodennäköinen, 10 todennäköinen) ja vian havaitsemisen todennäköisyys (1 todennäköinen, 10 epätodennäköinen). Näiden kolmen yhteenlaskettu summa antaa riskin prioriteettinumeron (RPN). Riskin prioriteettinumeron ollessa ≥ 245 , luokitellaan riski korkeaan riskiluokkaan. RPN:n ollessa pienempi kuin 245 ja suurempi kuin 48, luokitellaan riski kohtalaiseksi. Luvun ollessa 48 tai pienempi, mutta yli 12 riski on matala sen ollessa 12 tai alle riski on mitätön. Prioriteettinumeron perusteella on helppo kohdistaa toimenpiteet ensimmäiseksi korkeimman riskiluokan riskeihin. (Stamatis 2015, 61-63)



Kuvio 9 FMEA-prosessi (Kankaanranta 2015.)

FMEA-prosessi on esitetty kuviossa 9. Siitä nähdään, että normaalisti viat ja ongelmat prosessissa etenevät jonkun syyn aiheuttamasta vikatilasta seurauksiin ja edelleen oireisiin, jotka voidaan havaita. FMEA-prosessi taas etenee päinvastaiseen suuntaan. Se alkaa mahdollisten oireiden havainnoinnilla ja etenee seurauksien kautta vikatiloihin, ja niiden taustalla oleviin syihin. Näin ollen FMEA:n avulla voidaan huomata mahdollisia vikatiloja aiheuttavia syitä ennen niiden toteutumista.

Elektroniikanladontaprosessiin kohdistuvan FMEA:n avulla voitaisiin tunnistaa puutteet ESD-suojauksessa sekä etsiä mahdollisia vikaantumista aiheuttavia tekijöitä ja sitä kautta kehittää suojauksesta kattavampi. Analyysi toteutettiin prosessille yhdessä kahden yrityksen työntekijän kanssa, jotka työskentelevät elektroniikanladonnan parissa. Käytössä oli Emfitin valmis FMEA-pohja, johon kirjattiin prosessin vaiheet työpistekohtaisesti. Työpisteiltä pyrittiin keksimään mahdollisia ESD-riskien aiheuttajia, ja ne listattiin FMEA:han. Riskien priorisoinnin ja ehkäisevien toimenpiteiden ehdotukset käsiteltiin itse myöhemmin. Analyysin avulla löydettiin vielä runsaasti kehityskohteita ESD-suojauksessa, joista osan RPN ylsi korkeaan riskiluokkaan.

5.3 Havainnointi

Havainnoinnilla tarkoitetaan henkilöiden toiminnan seuraamista heidän omassa ympäristössään. Havainnoimalla voidaan saada henkilöiden toiminnasta ja käyttäytymisestä sellaista tietoa, jota henkilöt eivät haastattellessa osaisi kertoa. Havainnointia voidaan menetelmästä riippuen tehdä joko käyttäjien tietämättä, jolloin tutkimustilanne ei vaikuta heidän käyttäytymiseensä, tai havainnoimalla käyttäjiä heidän tiedostaessaan tutkimuksen. Havainnoinnin tulokset kirjataan tarkasti ylös, jotta niitä voidaan analysoida myöhemmin. (Hyysalo 2009, 106-107)

Opinnäytetyössä havainnointia käytettiin nykyiseen ESD-suojaukseen perehdyttäessä. Työssä perehdyttiin prosessin nykyisiin ESD-suojausmenetelmiin ja ne listattiin kartoituskäynnin yhteydessä. Prosessi käytiin läpi työpisteittäin ja listattiin kullakin työpisteellä käytössä olevat ESD-hallintatarvikkeet. Lisäksi kiinnitettiin huomiota koko EPA-alueen suojaukseen, kuten maadoitusjärjestelmään ja merkintöihin. Myös henkilöstön käyttäytymistä EPA-alueella ja sen ulkopuolella havainnoitiin. Havainnoinnilla pyrittiin selvittämään, käyttävätkö henkilöt nykyisiä ESD-hallintatarvikkeita ja noudattavatko he alueella vaadittavia erityistoimenpiteitä.

6 ESD-suojauksen nykytilan kartoitus

6.1 Aineistonkeruun lähtökohdat

Yrityksen hankkiessa elektroniikanladontalaitteet loppukesästä oli prosessin ESD-suojaus käytännössä nolla tasolla, oli vain tyhjä tila. Alkuun suojauksen toteuttamisella ei ollut yhtä vastuuhenkilöä, vaan se oli useamman työntekijän vastuulla, pääosin minun. ESD-suojaukseen perehdyttiin pintapuolisesti ja se toteutettiin muiden töiden ohessa, joten siihen ei kukaan pystynyt antamaan täyttä panostaan. Myöskään kaikkia mahdollisia hankintoja ei ollut mahdollista tehdä heti alkuvaiheessa korkeiden kustannusten takia. Tästä syystä suojaus oli vielä vaiheessa tuotannon alkaessa, vaikkakin se oli saatu vietyä välttävälle tasolle.

Ennen ladontalaitteiden asentamista paikalleen oli tilaan tehtävä sähköä johtava lattia, jonka toteutus oli minun vastuullani. Valitsin ja hankin lattian ESD-suojaukseen parhaiten sopivat materiaalit. Vertailin useaa eri vaihtoehtoa ja toimittajaa parhaan lopputuloksen saamiseksi kustannusten pysyessä kuitenkin mahdollisimman alhaisina. Saatavilla oli erilaisia ESD-lattiamattoja sekä levitettäviä pinnoitteita ja maaleja. Parhaaksi vaihtoehdoksi valikoitui ESD-maali, jonka asennuksen suoritti alan paikallinen yritys. Tämän jälkeen tilaan sijoitettiin työpisteet, joista tärkeimmät toteutettiin saatavilla olevilla ESD-pöydillä. Lisäksi hankittiin muun muassa ESD-työvaatteita, maadoitusranneke käsinladontapisteelle ja ESD-työtuoli ladontakoneen parissa työskentelevälle. Näiden ja muutamien muiden toimien ansiosta tuotanto päästiin aloittamaan ajallaan, vaikkakin ESD-suojaukseen täytyisi kehittää vielä jatkossa. Tässä vaiheessa suojauksen toteutus ei ollut ESD-standardien mukainen eikä ollut olemassa mitään ESD-hallintaohjelmaa eikä seurantasuunnitelmaa, joten niihin perehtyminen oli hyvä sisällyttää osaksi opinnäytetyötä.

6.2 Aineistonkeruun tulokset

FMEA:n avulla löydettiin runsaasti ESD-riskitekijöitä elektroniikanladontaprosessista. Työkalun avulla asioita voitiin katsoa erilaisista näkökulmista ja löytää riskitekijöitä, joita ei tulisi normaalisti ajateltua. Riskien priorisoinnin avulla voidaan toimenpiteet keskittää ensiksi kriittisimpiin riskeihin. Havainnoinnin tuloksena saatiin selville käytössä olevat nykyiset ESD-hallintatarvikkeet. Lisäksi saatiin tietoa työntekijöiden toiminnasta ja käyttäytymisestä eritystoimenpiteitä vaativalla alueella. Seuraavaksi käydään läpi löydettyjä riskitekijöitä. Riskejä ehkäiseviä toimenpiteitä käsitellään myöhemmin.

Korkeaan riskiluokkaan arvioiduista ($RPN \geq 245$) riskitekijöistä mainittakoon ensimmäisenä piirilevyjen visuaalisen tarkastuksen yhteydessä mahdollisesti tapahtuvasta sähköstaattisesta purkauksesta työntekijästä piirilevyyn ($RPN=280$). Tällä työpisteellä työntekijän maadoitus ei ole riittävä, sillä työpisteellä ei ole maadoitusranneketta eikä ESD-tuolia, jolloin työntekijä ei ole yhteydessä maahan työskennellessään istuen. Näin ollen työntekijän koskettaessa piirilevyä on mahdollista, että työntekijä ja piirilevy omaavat erilaisen sähköisen potentiaalilin, jolloin kertynyt sähkövaraus purkautuu piirilevyyn aiheuttaen vaurioita komponenteissa.

Samalla työpisteellä on myös toinen mahdollisen riskin aiheuttava epäkohta, joka kuuluu korkeaan riskiluokkaan, työtaso ei ole yhteydessä maahan (RPN=245). Tällöin on vaarana, että pöydällä käsiteltäviin piirilevyihin kohdistuu pöytään varastoituneesta staattisesta sähköstä purkaus, joka voi vaurioittaa herkkiä komponentteja.

Kolmas korkean riskiluokan epäkohta aiheutuu selvän ohjeistuksen puuttumisesta piirilevyjen käsittelystä (RPN=245). Piirilevyjä käsitellään välillä myös EPA-alueen ulkopuolella, mikä on merkittävä riskitekijä. Elektroniikkatuotannossa jatkuvasti työskenteleville työntekijöille maadoitusohjeet ovat selvillä, mutta alueella työskentelee satunnaisesti myös muita työntekijöitä, joilla ei ole selvää kuvaa maadoitusohjeista ja piirikorttien käsittelystä. Organisaatiossa ei ole myöskään tehty linjausta, jonka perusteella ESD-herkkiä osia tulisi käsitellä vain EPA-alueella.

Kohtalaiseen riskiluokkaan arvioituja riskitekijöitä ($48 < \text{RPN} < 245$) havaittiin FMEA:n avulla useita. Käydään niistä läpi merkittävimmät, jotka vaativat. EPA-alueella on kaksi normaalia työpöytää, joita ei ole maadoitettu. Ne voivat siis herkästi kerätä staattista sähköä ja aiheuttaa purkauksia, jos niiden päälle lasketaan piirilevy. Lisäksi alueella olevista ESD-pöydistä osaa ei ole maadoitettu maadoitusjohtimella. Ei ole myöskään selvitetty, onko niiden pöytäpinnat johtavia tai puolijohtavia, jolloin niihin ei kertyisi staattista sähköä. Piirilevyjä käsitellään pöytäpintojen päällä, joten on tärkeää varmistua niiden maadoituksesta, etteivät piirilevyt vaurioidu staattisen sähköpurkausten takia. Työpisteillä on myös ylimääräisiä eristemateriaaleja.

Myöskään alueella olevien laitteiden (pastaus, ladonta, uuni) maadoitusten toimivuudesta ei ole varmuutta, vaikka ne todennäköisesti ovatkin kunnossa. Uunin loppupään on lisäksi tehty itse muovinen teline, joka on eristävää materiaalia eikä helposti pura siihen kertyvää sähkövarausta, vaikka se onkin kosketuksissa uunin johtavaan runkoon. Piirilevyt taas ovat suoraan kosketuksissa tähän telineeseen tullessaan uunista.

Selkeän ohjeistuksen puuttuminen EPA-alueelle tultaessa aiheuttaa riskin prosessille. Tilan ovella on kyllä EPA-alueesta kertovat teippaukset, mutta ohjeistusta tai väliaikaisia ESD-varusteita ei ole saatavilla vierailijoiden varalle. Tällöin EPA-alueelle saapuva työntekijä (pois lukien alueella jatkuvasti työskentelevät) voi aiheuttaa sähköstaattisen purkauksen suojarusteiden puuttumisen takia.

Vaikka maadoitusreitit ovat osittain kunnossa, niiden ajoittaisen testaamisen puuttuminen aiheuttaa riskitekijän. Se voi aiheuttaa merkittäviä ongelmia, jos jokin maadoitusreitti katkeaa, eikä sitä havaita ajoittaisen testauksen puuttumisen takia.

Valmiiden piirikorttien varastoimisessa on myöskin kehitettävää. Tällä hetkellä ne varastoidaan EPA-alueen ulkopuolisessa hyllyssä ESD-suojatuissa muovilaatikoissa. Hyllyssä ei ole selvää varoitusta ESD-herkistä komponenteista, joten ne ovat alttiita tahattomille kosketuksesta johtuville purkauksille.

7 ESD-suojauksen kehityssuunnitelma

ESD-suojauksen kehityssuunnitelma käsittelee Emfitin elektroniikanladontaprosessin ESD-suojausmenetelmiin tehtäviä toimenpiteitä, jotta suojaus olisi SFS EN 61340-5-1 mukainen. Tämän avulla voidaan toteuttaa standardin mukainen ESD-hallintaohjelma. ESD-hallintaohjelmasta on kerrottu aiemmin luvussa 4. Seuraavassa ratkaistaan myös aineistonkeruussa havaitut riskitekijät.

7.1 Hallinnolliset toimenpiteet

Emfitin elektroniikanladontaprosessin ESD-suojauksen kehittäminen aloitetaan hallinnollisilla toimenpiteillä. Niistä löytyy tarkempaa tietoa luvusta 4.2. ESD-hallintaohjelmasuunnitelma aloitetaan nimeämällä organisaation ESD-asioista vastuussa oleva henkilö ESD-koordinaattoriksi. Seuraava vaihe on selvittää prosessissa käytettävien komponenttien ESD-herkkyys. Ne voidaan selvittää valmistajalta saatavista dokumenteista tai vaihtoehtoisesti altistaa ne HBM-mallin mukaisille testeille standardin IEC 60749-26 mukaisesti. Standardissa SFS-EN 61340-5-1:2016 komponenttien vikaantumisherkkyyden perustasoksi HBM-mallin osalta on valittu 100 V. Tiedettäessä prosessissa käytettävien komponenttien herkkyys tasot, voidaan standardin raja-arvoja muokata tarpeen tullen omien herkkyysvaatimusten mukaisiksi. Tällöin raja-arvoista ei tule turhaan liian tiukkoja, mikäli käytettävissä on reilusti kestävämpiä komponentteja. Toisaalta jos käytettävät komponentit vikaantuvat jo alle 100 V jännitteellä, voidaan raja-arvoja tiukentaa.

Seuraavaksi luodaan koulutussuunnitelma, jossa päätetään millä menetelmällä ja kuinka usein ESD-koulutus toteutetaan ja miten asioiden sisäistämistä arvioidaan. Lisäksi päätetään ketkä kaikki osallistuvat koulutukseen. Koulutukseen tulisi osallistua ainakin henkilöt, jotka ovat tekemisissä ESD-herkkien osien kanssa. Koulutus voi olla hyödyksi myös muille organisaation työntekijöille, kuten johdolle tai siivoojille. Koulutuksen voi hoitaa aiheeseen perehtynyt yrityksen sisäinen ohjaaja tai se voidaan ulkoistaa konsultille. Myös tietokonepohjaiset koulutukset tai seminaareihin osallistuminen ovat vaihtoehtoisia koulutuksen toteuttamismenetelmiä.

Tämän jälkeen organisaation on hyväksyttävä kaikki ESD-hallintatarvikkeet, joita käytetään ESD-hallintaohjelmassa. Jokaisen hallintatarvikkeen hyväksyntään tarvitaan organisaation tai muun tahon tekemä IEC standardien mukainen dokumentoitu testaus. Valmistajan julkaisemista datalehdistä voi myös löytyä standardien mukaan toteutettujen testien tulokset. Laitteiden, jotka on jo asennettu paikalleen ennen standardin käyttöönottoa, tuotehyväksyntään riittävät jatkuvat kelpoisuuden todentamistiedot.

Seuraava hallinnollisten toimenpiteiden vaihe suojauksen kehittämiseksi on luoda kelpoisuudentodentamissuunnitelma, jonka avulla ESD-suojauksen tasoa seurataan ja ylläpidetään jatkossa. Siihen kirjataan hallintatarvikkeiden testausvälit ja testausmenetelmät sekä käytettävät raja-arvot ja testauslaitteisto. ESD-hallintatarvikkeita testataan jatkossa suunnitelman mukaisesti määritellyin aikaväleihin, ja testaustulokset dokumentoidaan. Mikäli testauksissa havaitaan, että jokin ESD-hallintatarvike ei läpäise määriteltyjä raja-arvoja, ryhdytään toimenpiteisiin asian ratkaisemiseksi.

Nämä hallinnolliset toimenpiteet vaaditaan, jotta organisaatio täyttää SFS EN 61340-5-1 asettamat vaatimukset.

7.2 Tekniset toimenpiteet

7.2.1 EPA-alue

Seuraavaksi käydään läpi tekniset toimenpiteet, jotka pitäisi toteuttaa ESD-suojauksen saamiseksi standardien mukaiseksi. ESD-hallintaohjelman teknisistä toi-

menpiteistä otetaan ensimmäisenä käsittelyyn maadoitusjärjestelmä. Nykyinen maadoitus on kytketty käyttämään suojamaata. Maadoitus on kuitenkin kytketty käyttämään sähköpistorasioiden suojamaata, jota ei pidetä suositeltavana. Suojamaadoitus tulisi tässä tapauksessa yhdistää erillisellä maadoitusjohtimella sähkökeskuksen suojamaahan. ESD-lattia ja muut hallintatarvikkeet tulisi yhdistää ensin yhteiseen maapisteeseen ja maapiste suojamaahan.

Seuraavat tekniset toimenpiteet liittyvät EPA-alueeseen, joka on tässä tapauksessa ladontahuone. ESD-herkkiä laitteita tulisi jatkossa käsitellä vain EPA-alueella. Jos ESD-herkkiä laitteita viedään EPA-alueen ulkopuolelle, tulee ne suojata suojapäällysteellä tai -pakkauksella. Eli EPA-alueen ulkopuolella tehdyt työvaiheet, joissa käsitellään ESD-herkkiä laitteita, tulisi tehdä jatkossa EPA-alueen sisällä, mikä on rajatun tilan takia tässä tapauksessa hankalaa. Toinen vaihtoehto on perustaa uusi EPA-alue työpisteelle, jossa ESD-herkkiä laitteita käsitellään.

EPA-alueella tulisi jatkossa voida liikkua vain ESD-koulutuksen saaneet henkilöt. Tähän mennessä siellä on saanut melko vapaasti liikkua kuka tahansa. Organisaation tulisi painottaa asian tärkeyttä ja järjestää ESD-koulutuksia niille henkilöille, joiden on tarpeen liikkua EPA-alueella. Jos henkilön, jolla ei ole ESD-koulutusta, täytyy liikkua EPA-alueella, täytyy organisaation järjestää hänelle koulutuksen saanut saattaja.

Käsiteltäessä suojaamattomia ESD-herkkiä osia tulisi työasemalta poistaa kaikki tarpeettomat eristekappaleet ja esineet. Tulisi arvioida muodostavatko prosessissa tarvittavat eristekappaleet tai ESD-herkkien osien kanssa kosketuksiin joutuvat eristetyt johtimet ESD-riskin SFS EN 61340-5-1 mukaisesti. Jos mitatut tulokset ylittävät raja-arvot, tulisi käyttää ionisaattoria tai muuta varausta vähentävää menetelmää.

EPA-alueen kaikki työpisteet tulisi maadoittaa maadoitusjohtimella suojamaahan ja tarpeen mukaan asentaa pöytäpinnoille ESD-suojamatot, mikäli pöydässä ei ole puoli-johtavaa pintaa. Työpisteet tulisi pitää puhtaana tarpeettomista tavaroista, etenkin eristemateriaaleista.

EPA-alueella käytetään liikuteltavia hyllyvaunuja, jotka täytyisi maadoittaa ainakin lastauksen ja purkamisen aikana. Nyt kun käytössä on ESD-lattiamateriaali, liikuteltava kalusto on hyvä maadoittaa johtavien pyörien kautta, jolloin maadoitusreitti on

katkeamaton. Tulisi siis hankkia ESD-pyörillä varusteltuja hyllyvaunuja, tai jos käytössä oleviin vaunuihin on saatavilla ESD-pyöriä, tulisi sellaiset asentaa johtamattomien pyörien tilalle. Mikäli vaunuilla kuljetetaan suojaamattomia ESD-herkkiä osia, tulisi niiden hyllyt maadoittaa rungon kautta maahan.

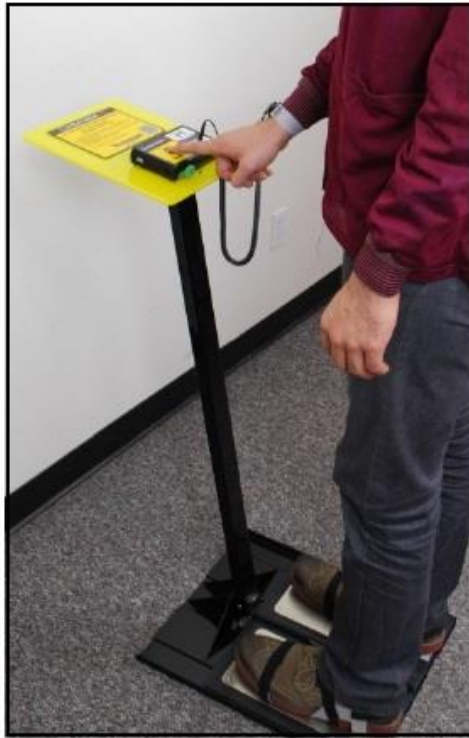
Valmiiden piirikorttien varastointi EPA-alueen ulkopuolella maadoittamattomassa hyllyssä on ESD-riski. Valmiit piirikortit tulisi varastoida EPA-alueen sisäpuolella tai käyttää kunnollisia suojarahkkeitä, mikäli ne varastoidaan alueen ulkopuolella. Tässä tilanteessa EPA-alueella on rajatusti tilaa, joten parhaaksi vaihtoehdoksi jää uuden EPA-alueen perustaminen tilan läheisyyteen ja piirikorttien varastoiminen sen alueella. Se voi käsittää yksinkertaisuudessaan ESD-lattiamateriaalin (esim. ESD-matto), maadoitetun hyllyn, johtavan laatikoston ja merkinnät.

EPA-alueella käytettävien työkalujen tulisi olla ESD-mallia. Varsinkin työkalut, jotka joutuvat kosketuksiin ESD-herkkien komponenttien kanssa, tulisi olla varautumatonta materiaalia. Myös laitteet, joita prosessissa käytetään, tulisi olla maadoitettuja. Esimerkiksi juottimen kärjestä on mahdollista syntyä ESD-purkaus osaan, mikäli juotin ei ole maadoitettu.

7.2.2 Henkilömaadoitus

Henkilömaadoituksen parantamiseksi tärkein toimenpide on hankkia ja asentaa kaikille EPA-alueen työpisteille, joissa työntekijä työskentelee pääasiassa istuen, rannekejärjestelmä. Se on paras tapa saada henkilö ja ESD-herkkä osa samaan potentiaaliin purkausten välttämiseksi. Rannekejärjestelmä tulisi maadoittaa pöydän yhteiseen maapisteseen.

Tulisi myös hankkia väliaikaisia ESD-jalkineita sellaisten henkilöiden varalle, jotka liikkuvat EPA-alueella, mutta käytössä ei ole ESD-kenkiä. Hyviä vaihtoehtoja ovat esimerkiksi johtavat maadoituskenkäpussit tai maadoitusliuskat. Ne tulisi sijoittaa EPA-alueen oven läheisyyteen helposti saataville.



Kuvio 10 Rannekejärjestelmän ja jalkineiden testeri (Ranneke- ja jalkinetesteri H280 Tester N.d)

Rannekejärjestelmän ja jalkine-lattiamateriaalijärjestelmän testaamiseen tulisi hankkia asian mukaiset testerit, joilla hallintatarvikkeiden kuntoa on helppo seurata riittävän usein. Kuviossa 10 on esimerkki tarkoitukseen sopivasta testauslaitteistosta. Testeri tulisi sijoittaa EPA-alueelle helposti saavutettavaan paikkaan, jotta sen käyttö olisi päivittäistä.

7.2.3 Mittaukset

ESD-hallintaohjelmaan kirjattaville ESD-hallintatarvikkeille tulee tehdä ennen käyttöönottoa tuotehyväksyntää varten IEC standardien mukaiset mittaukset, jotka dokumentoidaan kelpoisuuden todentamisrekisteriin. Taulukoissa 1 ja 2 on listattu standardit, joiden mukaisesti hallintatarvikkeiden testit suoritetaan. Mikäli hallintatarvike on jo keritty asentamaan, sen tuotehyväksyntään riittää säännöllisesti tehdyt kelpoisuusmittaukset. Kaikkien ESD-hallintatarvikkeiden kelpoisuutta seurataan säännöllisin väliajoin tehdyillä mittauksilla. Väliaikojen pituutta ei ole määritelty standardissa, vaan sen määrittelee organisaatio. Taulukosta 3 näkyy esimerkkejä, millainen testustiheys voisi olla erilaisille ESD-hallintatarvikkeille.

Taulukko 3 ESD-hallintatarvikkeiden testaustiheys (CLC/TR 61340-5-2:2009, 120.)
muokattu

Tekninen hallintatarvike	Raja-arvot	Testaustiheys	Tarkastaja
Rannekkeet (järjestelmätesti)	$R < 3,5 \times 10^7 \Omega$	Päivittäin (ennen käyttöä)	Työntekijä
Työskentelypinnat	$R_g < 1,0 \times 10^9 \Omega$	3 kuukauden välein	ESD-koordinaattori
Rannekkeen liitäntäpiste	$R_g < 1 \Omega$	3 kuukauden välein	Laadunvarmistusosasto
Sähköstaattisia varauksia synnyttävät esineet	$< 10\,000 \text{ V/m}$	3 kuukauden välein	Laadunvarmistusosasto
Suojaavat pussit	Silmämääräinen tarkistus vaurioiden varalta	3 kuukauden välein	Laadunvarmistusosasto

Yrityksen tulee hankkia tarkoitukseen soveltuvat mittalaitteet, joilla ESD-hallintatarvikkeita voidaan jatkossa testata. Jokaisen hallintatarvikkeen mittaamenetelmän esittelevässä standardissa kerrotaan tarkemmin mittalaitteista, joita testaaminen vaatii. Mittauksiin tarvitaan aikakin resistanssimittari ja anturit, staattisen sähkökentän mittari ja ranneke- jalkinetesteri. Kuviossa 11 on esitetty maadoitusresistanssin mittaamiseen tarvittavat tarvikkeet. Niitä on saatavilla alan jälleenmyyjiltä.



Kuvio 11 Resistanssimittarisarja (Resistanssimittari Megger MIT415/2 N.d.)

7.3 Kriittiset toimenpiteet

Yrityksen taloustilanteen huomioon ottaen ei ole välttämättä mahdollista toteuttaa standardin mukaista ESD-hallintaohjelmaa heti. Siihen vaaditaan kuitenkin uusia investointeja, sillä ESD-hallintatarvikkeet eivät ole halpoja. Varsinkin testauslaitteistojen hankkiminen nostaisi kustannusten määrää. Taulukossa 4 listataan toimenpiteet, jotka ratkaisevat kriittisiä ESD-uhkia prosessin eri vaiheissa ja ovat toteutettavissa kohtuullisin kustannuksin.

Taulukko 4 Kriittiset toimenpiteet ESD-suojauksen parantamiseksi

Työpiste / -vaihe	Toimenpide	Enkäisee
Piirilevyn visuaalinen tarkastus	Asennettava rannekejärjestelmä työntekijän maadoittamiseksi	Työntekijästä piirilevyaihiin aiheutuvia ESD-purkauksia
Piirilevyn visuaalinen tarkastus	Työpöydän maadoitus: maadoitusjohdin / pöytäpinnan maadoitus	Työpöydästä piirilevyaihiin aiheutuvia ESD-purkauksia
Uuni	Loppupään teline tehtävä johtavasta materiaalista	Telineeseen kertyvää jännitettä ja sen purkautumista piirilevyaihiin
Koko EPA-alue	Väliaikaisten ESD-jalkineiden hankinta ja sijoitus helposti saataville	Tilassa käyvistä henkilöistä aiheutuvia ESD-purkauksia
Testaus, ohjelmointi	Piirilevyjen käsittely vain EPA-alueella / uusien EPA-alueiden perustaminen työpisteille	ESD-suojausketjun katkeamista / piirilevyjen vikaantumista
Varastointi	EPA-alueen luominen varastopaikalle (ESD-lattiamatto, maadoitettu hylly, merkinnät)	Piirilevyjen varautumista varastoidessa
Koko EPA-alue	Tarpeettomat eristemateriaalit poistettava alueelta	ESD-purkauksia varautuvista eristeistä

8 Seurantasuunnitelma

Organisaation tulee luoda ESD-suojaustason kelpoisuudentodentamissuunnitelma osana ESD-hallintaohjelmaa. Tulisi selvittää käytettävien komponenttien ESD-herkkyys, jotta hallintatarvikkeiden raja-arvoja voidaan tarpeen tullen muokata. Organisaatio voi käyttää kelpoisuuden todentamiseen standardien mukaisia testausmenetelmiä tai kehittää vaihtoehtoiset testaukset itse.

Tässä taulukon 5 mukaisessa ESD-suojaustason kelpoisuudentodentamissuunnitelmassa oletetaan komponenttien vikaantumisherkkydeksi HBM-mallin osalta 100 V, jolloin voidaan käyttää standardin mukaisia ennalta määriteltäviä raja-arvoja. Usein nämä raja-arvot ovat riittäviä, ellei käytössä ole erityisen herkkiä komponentteja. Myös testausmenetelminä käytetään standardeissa esiteltyjä menetelmiä. Standardit eivät määrittele hallintatarvikkeiden testaustiheyttä, vaan asia on organisaation päättävissä. Tässä suunnitelmassa esitetyt testausvälit perustuvat aiheeseen perehtyneen arvioihin sopivasta testaustiheydestä, joilla voidaan varmistaa suojaustason säilyminen.

Päivittäin testataan ensisijaiset maadoitusreitit, eli rannekejärjestelmä sekä henkilöjalkinejärjestelmä. Niiden täytyy pysyä kunnossa, sillä niiden toimimattomuus vaikuttaa välittömästi henkilöiden varautuneisuuteen. Ne ovat myös helppoiten vikaantuvat hallintatarvikkeet runsaan käytön takia ja ne täytyykin uusia ajoittain. Kolmen kuukauden välein testataan muut hallintatarvikkeet. Merkintöjen ja sähköstaattisen kentän voimakkuuden tarkastukset riittävät puolivuositain. Sähköstaattisen kentän voimakkuus mitataan paikoista, joissa ESD-herkkää osaa käsitellään. ESD-hallintatarvikkeiden testaustiheyttä voidaan jatkossa harventaa, mikäli testeissä havaitaan hyvin vähän ongelmia ja niin tiheä testaus koetaan tarpeettomaksi.

Päivittäin tehtävät testaukset tekevät hallintatarvikkeita käyttävät työntekijät, muut testaukset suorittaa ESD-koordinaattori. Kunkin testauksen tulokset kirjataan ylös kelpoisuudentodentamisrekisteriin. Mikäli testaustulokset eivät ole raja-arvojen sisällä, tulee selvittää mistä se johtuu. Usein kyseessä voi olla pintojen likaantuminen, jolloin pinnat tulee puhdistaa ja mitata resistanssin arvot uudestaan. Mikäli ongelma ei korjaannu tällä, tulee siitä tiedottaa johdolle, jotta voidaan ryhtyä tarvittaviin toimenpiteisiin suojaustason palauttamiseksi.

Taulukko 5 ESD-suojautason kelpoisuudentodentamissuunnitelma

ESD-hallintatarvike	Testaustiheys	Testausmenetelmä	Raja-arvo
Rannekejärjestelmät	Päivittäin	IEC 61340-4-6	$R < 3,5 \times 10^7 \Omega$
Henkilö-jalkinejärjestelmä	Päivittäin	IEC 61340-5-1	$R_{gp} < 1,0 \times 10^8 \Omega$
Henkilö-jalkine-lattia-pinnoitejärjestelmä	3 kk välein	IEC 61340-4-5	$R_g < 1,0 \times 10^9 \Omega$
Työtasot, säilytystelineet, hyllyvaunut	3 kk välein	IEC 61340-2-3	$R_g < 1,0 \times 10^9 \Omega$
Lattiapinnoite	3 kk välein	IEC 61340-4-1	$R_g < 1,0 \times 10^9 \Omega$
ESD-istuimet	3 kk välein	IEC 61340-2-3	$R_g < 1,0 \times 10^9 \Omega$
ESD-vaatteet	3 kk välein	IEC 61340-4-9	$R_{p-p} < 1,0 \times 10^{11} \Omega$
Merkinnät	6 kk välein	Silmämääräinen tarkastus	
Sähköstaattisen kentän voimakkuus	6 kk välein	IEC 61340-5-1	$< 5\,000 \text{ V/m}$
R_{gp} =resistanssi maadoitettavaan pisteeseen	R_g =resistanssi maahan	R_{p-p} =pisteiden välinen resistanssi	

9 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli kartoittaa Emfitin elektroniikanladontaprosessin ESD-suojauksen tila ja suunnitella siitä standardit täyttävä. Opinnäytetyössä oli myös tarkoitus luoda suunnitelma, jonka mukaan ESD-suojauksen tasoa seurataan ja ylläpidetään jatkossa. Suunnitelman mukaisesti toteutetun ESD-suojauksen olisi tarkoitus estää elektroniikan vikaantuminen tuotantoprosessin aikana. Opinnäytetyössä haettiin vastauksia seuraaviin tutkimuskysymyksiin: Kuinka estetään elektroniikan vikaantuminen sähköstaattisten purkausten takia tuotannon aikana? Kuinka toteutetaan kattava ESD-suojaus? Kuinka ESD-suojauksen tasoa täytyy jatkossa seurata?

Opinnäytetyön tuloksena havaittiin useita puutteita prosessin ESD-suojauksessa. Osa niistä oli varsin kriittisiä, joiden korjaamiseksi tulisi ryhtyä toimenpiteisiin. Ne onkin raportissa eritelty muista toimenpiteistä, jotta toimenpiteet voidaan kohdistaa ainakin niihin, jos ei ole mahdollista toteuttaa standardin mukaista ESD-suojauksia heti. Opinnäytetyössä luotiin toimintaohje, jonka mukaisilla toimenpiteillä organisaatio saa prosessin ESD-suojauksesta standardien vaatimusten mukaisen. Työn tuloksena syntyi myös ohjeistus, miten organisaation tulee jatkossa seurata ESD-suojauksia, jotta se ei menetä tehoaan. Opinnäytetyön teoriaosioon on kerätty useasta eri lähteestä tietoa staattisesta sähköstä ja sen vaikutuksista elektroniikalle. Tietoperustaan perehtyminen auttaa ymmärtämään ESD-suojauksen takana olevia ilmiöitä, mikä on tärkeää, jotta asiaan osataan suhtautua riittävällä vakavuudella.

Opinnäytetyö aloitettiin jo aiemmin kesällä eri aiheesta. Tarkoituksena oli tutkia yrityksen uuden tuotteen käytettävyyttä ennen sen päätymistä markkinoille. Tuotekehitystyön kestäessä ja prototyyppien valmistumisen venyessä päätettiin, ettei ole järkevää alkaa odottelemaan tuotteen valmistumista. Tästä syystä tämä opinnäytetyöaihe haudattiin ja keskeytettiin. Onneksi kovin paljoa turhaa työtä ei keritty tekemään. Myöhemmin yrityksestä nousi esiin toinen mahdollinen opinnäytetyöaihe, elektroniikanladontaprosessin ESD-suojauksen kehitys, joka valittiin kehitystyön aiheeksi. Tämä ei ollut ainakaan riippuvainen yrityksen aikatauluista ja vaikutti sopivan haasteelliselta aiheelta opinnäytetyölle. Opinnäytetyö toteutettiin töiden ohessa, jolloin siihen ei voinut paneutua kokopäiväisesti, paitsi loppuvaiheessa. Tästä syystä oli vaikea arvioida, kuinka paljon aikaa olisi käytettävissä opinnäytetyön tekemiseen. Työn aihe ei myöskään ollut juurikaan tuttu aiemmista opinnoista, joten siihen paneutuminen vei runsaasti aikaa. Suunnitellussa aikataulussa ei näistä syistä pysytty, vaikkakin se mahdollisuus tiedostettiin jo suunnitelmaa luotaessa ja sen oli tarkoitus olla vain suuntaa antava. Opinnäytetyöhön olisi voinut sisällyttää organisaatiossa käytettävien komponenttien herkkyystasojen selvittämisen, jolloin suunnitelmat olisi voitu luoda juuri näiden herkimpien komponenttien mukaan. Työssä käytettiin herkkyystasona standardien mukaista 100 voltia, jolloin raja-arvoja täytyy vielä muokata, mikäli organisaatiossa käytetään tätä herkempiä komponentteja. Yhteydenpito toimeksiantajaan toimi hyvin, sillä ollessani opinnäytetyön aikana toimeksiantajalla

töissä, saattoi opinnäytetyöhön liittyviä asioita käsitellä tarvittaessa ilman erikseen sovittuja tapaamisia.

Opinnäytetyön alussa määriteltyihin tutkimuskysymyksiin löydettiin vastaukset. Työstä käy ilmi, kuinka estetään elektroniikan vikaantuminen tuotannon aikana. Työ auttaa ymmärtämään ilmiöitä, jotka ovat elektroniikan vikaantumisen taustalla. Teoriapohjasta saa aiheesta laajan kuvan eri lähteistä kerätyistä tiedoista. Sen avulla on helpompi käsittää, kuinka vikaantumista voidaan jatkossa ehkäistä. Myös kattavan ESD-suojauksen toteutukseen työ toimii hyvänä toimintamallina. Siinä on esitetty konkreettisesti, mitä nykyisessä ESD-suojauksessa on korjattavaa ja mitä toimia tulee tehdä, jotta suojaus saadaan standardin mukaiseksi. Työssä on myös selvitetty, kuinka ESD-suojauksen tasoa täytyy jatkossa seurata. Näin on luotu suunnitelma, jonka mukaan suojauksen kelpoisuutta voidaan ajoittain arvioida.

Opinnäytetyön luotettavuuteen kelpoisuudentodentamissuunnitelman raja-arvojen osalta yrityksen tulee suhtautua kriittisesti, sillä ne on luotu sillä oletuksella, että käytössä olevista komponenteista herkimmän vikaantumisherkyys on 100 V. Yrityksen tulee selvittää käyttämiensä komponenttien vikaantumisherkyys ja tarpeen mukaan muokata raja-arvoja niiden mukaan. Sadan voltin vikaantumisherkyys on kuitenkin useassa tapauksessa riittävä, ja se onkin standardeissa määritelty vikaantumisen perusarvoksi. Myös työssä esitetyt ESD-hallintalaitteiden testaustiheydet ovat enemmänkin suosituksia kuin faktoja. Toisaalta niistä on hyvä lähteä liikkeelle ja tarpeen mukaan muokata haluamaansa suuntaan, jos se koetaan tarpeelliseksi.

Opinnäytetyön jatkoksi tulisi siinä esitetty toimintamalli ESD-suojauksen kehittämiseksi viedä käytäntöön, ja sitä kautta korjata puutteet prosessin ESD-suojauksessa. Toimenpiteet voidaan aloittaa kriittisistä toimenpiteistä, ja tämän jälkeen kohdistaa huomio koko prosessin ESD-suojauksen saattamiseksi standardin mukaiseksi.

Opinnäytetyön teoriapohjaa voivat hyödyntää toimeksiantajan lisäksi muut asiasta kiinnostuneet. Siihen on koostettu tietoa eri lähteistä, josta lukija saa kattavan kuvan aiheesta. Myös luotua toimintamallia ESD-suojauksen kehittämiseksi standardin mukaiseksi voivat hyödyntää muut tahot, joiden tavoitteena on toteuttaa standardin mukainen ESD-suojaus.

Lähteet

Agarwal, S. 2014. What's The Difference Between HBM, CDM, And MM Test. Julkaisu electronicdesign.com verkkosivustolla. Viitattu 11.1.2019.

<https://www.electronicdesign.com/power/what-s-difference-between-hbm-cdm-and-mm-test>

CLC/TR 61340-5-2:2009. Staattinen sähkö. Osa 5-2: Komponenttien suojaaminen staattiselta sähköltä. Käyttäjän opas. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Viitattu 15.1.2018. <https://janet.finna.fi/>, SFS Online.

Emfit myy hälyttimiä sisältävän tuoteportfolion Abilialle. 2017. Uutinen STT Viestintäpalvelut -nettisivustolla. Viitattu 10.12.2018.

<https://www.sttinfo.fi/tiedote/emfit-myy-halyttimia-sisaltavan-tuoteportfolion-abilialle?publisherId=56676660&releaseId=56677803>

ESD Protected Area, EPA. N.d. Julkaisu electronics-notes.com verkkosivustolla.

Viitattu 16.1.2019 https://www.electronics-notes.com/articles/constructional_techniques/electrostatic-discharge/esdpa-epa-esd-protected-area.php

EPA-tuotetarrat. N.d. Viitattu 6.2.2019.

<https://www.perel.fi/tuotteet/44327379/epa-tuotetarrat/1>

EPA-varoitustaulut. N.d. Viitattu 6.2.2019.

<https://www.perel.fi/tuotteet/44327373/epa-varoitustaulut/1>

FMEA, DFMEA, PFMEA, and FMECA: An Overview of FMEA Types. 2018. Artikkelij Relyence Corporation nettisivuilla. Viitattu 8.1.2019.

<https://www.relyence.com/2018/08/28/overview-fmea-types/>

Hyysalo, S. 2009. Käyttäjä tuotekehityksessä. Tieto, tutkimus, menetelmät.

Taideteollisen korkeakoulun julkaisu B 97. Helsinki: Taideteollinen korkeakoulu.

Kananen, J. 2008. Kvali – Kvalitatiivisen tutkimuksen teoriat ja käytänteet. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisu 93. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kankaanranta, J. 2015. Kuinka FMEA:ta sovelletaan palveluissa. Artikkelij qk-

karjalainen.fi nettisivustolla. Viitattu 8.1.2019. <http://www.qk-karjalainen.fi/fi/artikkelit/fmea-palveluissa/>

Kuisma, M. N.d. Staattisen sähköön purkaus (ESD). EMC-ESD. Lappeenrannan

teknillinen yliopisto. Viitattu 15.1.2019. <http://docplayer.fi/4900799-Staattisen-sahkon-purkaus-esd.html>

Moisio, J. 2009. Vika- vaikutusanalyysi prosessien parantamisessa. Viitattu 8.1.2019.

[http://media.ims.fi/Artikkelit/Jatkuva-parantaminen/Ota_Vika_-_ja_vaikutusanalyysi_\(FMEA\)_kayttoon_prosessien_parantamisessa.pdf](http://media.ims.fi/Artikkelit/Jatkuva-parantaminen/Ota_Vika_-_ja_vaikutusanalyysi_(FMEA)_kayttoon_prosessien_parantamisessa.pdf)

Part Five: Device Sensitivity and Testing. 2010. ESD Association, Rome, NY. Julkaisu

esda.org verkkosivustolla. Viitattu 14.1.2019 <https://www.esda.org/about-esd/esd-fundamentals/part-5-device-sensitivity-and-testing/>

Part One - An Introduction to ESD. 2013. EOS/ESD Association, Inc., Rome, NY. Julkaisu esda.org verkkosivustolla. Viitattu 5.1.2019 www.esda.org/about-esd/esd-fundamentals/part-1-an-introduction-to-esd

Part Three: Basic ESD Control Procedures and Materials. 2014. EOS/ESD Association, Rome, NY. Julkaisu esda.org verkkosivustolla. Viitattu 6.2.2019. <https://www.esda.org/about-esd/esd-fundamentals/part-3-basic-esd-control-procedures-and-materials/>

Properties of Static Electricity. N.d. Kuva keyence.com nettisivustolla. <https://www.keyence.com/ss/products/static/resource/feature/property.jsp>

Ranneke- ja jalkinetesteri H280 Tester. N.d. Viitattu 6.2.2019. <https://www.perel.fi/tuotteet/45310228/ranneke-ja-jalkinetesteri-h280-tester/1>

Resistanssimittari Megger MIT415/2. N.d. Viitattu 6.2.2019. <https://www.perel.fi/tuotteet/74283670/resistanssimittari-megger-mit415-2/1>

SFS-EN 61340-5-1:2016. Staattinen sähkö. Osa 5-1: Elektronisten komponenttien suojaaminen staattiselta sähköltä. Yleiset vaatimukset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Viitattu 14.1.2019. <https://janet.finna.fi/>, SFS Online.

Stamatis, D.H. 2015. ASQ Pocket Guide to Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). Milwaukee: American Society for Quality (ASQ).

Viheriäkoski, T. 2001. ESD Staattinen sähkö elektroniikassa. Helsinki: Oy Edita Ab.

Voldman, S. 2009. ESD: Failure mechanisms and models. John Wiley & Sons, Incorporated. United Kindom.