

Jesse Myrskog

STANDARDIN MIL-STD 461 MUKAINEN EMC-SUOJAUS

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Toukokuu 2019**

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Toukokuu 2019	Tekijä Jesse Myrskog
Koulutus Sähkö- ja automaatiotekniikka		
Työn nimi MIL-STD 461 mukainen EMC-suojaus		
Työn ohjaajat Jari Halme, Kari Saaranen		Sivumäärä 34 + 1
Työelämäohjaaja Henry Tolonen		
<p>Opinnäytetyössä tutkittiin sähkömagneettisen yhteensopivuuden ratkaisuja Patrian sotilasmaastokuorma-autoon MIL-STD 461-G standardin mukaisesti. Työn sisältö rajattiin ajoneuvon ajajan näytön suojauksen protosuunnitteluun sekä pyyhinjärjestelmän suojausoption tutkimiseen. Työ keskittyi sähkömagneettisen yhteensopivuuden ohjaavien tekijöiden tunnistamiseen Patrian sähkösuunnittelun näkökulmasta. Opinnäytetyö antaa lukijalle teoreettista pohjaa sähkömagneettisen säteilyn luonteesta ja vaikutuksesta sekä teoriaan pohjautuvia suunnitteluratkaisuja ja niiden todentamista mittausten avulla.</p>		

Asiasanat asetus, direktiivi, emissio, mittaus, standardi, suojaus, sähkömagneettinen yhteensopivuus, säteily, vaimennus
--

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date May 2019	Author Jesse Myrskog
Degree programme Electrical and automation engineering		
Name of thesis EMC according to MIL-STD 461 standard		
Instructors Jari Halme, Kari Saaranen		Pages 34 + 1
Supervisor Henry Tolonen		
<p>Electromagnetic compatibility solutions were studied in this thesis, to offer engineering solutions for Patria's military off-road truck, according to MIL-STD 461-G. The content of the work in this thesis was limited to engineering a protection-prototype for the vehicle's driver's display and studying different options for the protection of the vehicle's wiper system. The work in this thesis focused on the identification of the factors, that guide the engineering process in Patria's electrical engineering division, regarding electromagnetic compatibility. This thesis gives some theoretical background about the nature and effects of electromagnetic radiation and engineering solutions/measurement verification based on the theory.</p>		

<p>Key words attenuation, conductive, directive, electromagnetic compatibility, emission, measurement, protection, radiation, regulation, standard</p>

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

EU	Euroopan Unioni
EMC	Sähkömagneettinen yhteensopivuus
EMI	Sähkömagneettinen häiriö
ETA	Euroopan talousalue
CISPR	Kansainvälinen IEC radiohäiriö komitea
ICNIRP	Kansainvälinen ionisoimattoman säteilynsuojauksen komissio
ISO	Kansainvälinen standardisointijärjestö
PWM	Pulssinleveysmodulaatio
TEM Wave	Tasoaalto
TTL	Transistori-transistori logiikka

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 SÄHKÖMAGNEETTINEN SÄTEILY	2
2.1 Mitä se on	2
2.2 Mihin/Miten ilmiö vaikuttaa	3
2.3 Hyöty vai haitta?	5
3 SÄHKÖMAGNEETTINEN YHTEENSOPIVUUS	6
3.1 Mitä se on	6
3.2 Standardihierarkia.....	6
3.2.1 Periaate.....	7
3.2.2 Vaatimuksia ja raja-arvoja kaupallisiin tuotteisiin	7
3.2.3 MIL-STD 461-G	8
3.3 Johtuva	11
3.3.1 Differential mode.....	13
3.3.2 Common mode.....	13
3.3.3 Suojaustoimenpiteet.....	14
3.4 Säteilevät häiriöt.....	16
3.4.1 Suojaustoimenpiteet	17
3.4.2 Sähkö- ja magneettikentiltä suojautuminen (Shielding theory)	18
3.5 Vaimennus	20
4 ONGELMAKOHTEET	23
4.1 Ajajan näyttö	23
4.2 Pyyhinjärjestelmän moottori	24
5 EMC-MITTAUKSET OSANA PROJEKTIA	27
5.1 Patrian omat mittaustilat	27
5.2 SGS FIMKO	28
5.2.1 Yrityksen kuvaus.....	28
5.2.2 Patrian ajoneuvomittaukset	28
5.3 MIL-STD 461 F&G	29
6 TULOKSET JA YHTEENVETO	31

LÄHTEET	33
----------------------	-----------

LIITTEET

KUVAT

KUVA 1. Säteilyn heijastuminen.....	3
KUVA 2. Säteilyn absorboituminen	4
KUVA 3. Säteilyn läpäisy.....	4
KUVA 4. EU-direktiivin 2014/30/EU soveltaminen.....	7
KUVA 5. Galvaaninen kytkeytyminen	11
KUVA 6. Kapasitiivinen kytkeytyminen.....	12
KUVA 7. Induktiivinen kytkeytyminen.....	12
KUVA 8. Differentiaalinen kytkeytyminen.....	13
KUVA 9. Yhteiskytketyminen.....	14
KUVA 10. Alipäästösuodatin	14
KUVA 11. C-suodatin.....	15
KUVA 12. Pi-Suodatin	16
KUVA 13. Antennin lähetin- vastaanotin periaatekuva	17
KUVA 14. Pintatunkeutuminen	19
KUVA 15. Näytön suojaus, konfiguraatio 1	23
KUVA 16. Näytön suojaus, konfiguraatio 2.....	24
KUVA 17. Patrian EMC-kammio.....	27
KUVA 18. RE102 mittaustulokset, näytön suojaus, konfiguraatio 1	32
KUVA 19. RE102 mittaustulokset, näytön suojaus, konfiguraatio 2	32

YHTÄLÖT

YHTÄLÖ (2.1). Fotonin energia	5
YHTÄLÖ (3.1). Kapasitiivinen reaktanssi	15
YHTÄLÖ (3.2). Induktiivinen reaktanssi	15
YHTÄLÖ (3.3). Aaltoimpedanssi.....	18
YHTÄLÖ (3.4). Vaimennus	21
YHTÄLÖ (3.5). Vaimennuksen kokonaistehokkuus.....	21
YHTÄLÖ (3.6). Tunkeutumissyvyys	22
YHTÄLÖ (4.1). Vaihteellisen sähkömoottorin momentti	25
YHTÄLÖ (4.2). Moottorin nimellisyörimisnopeus.....	25

TAULUKOT

TAULUKKO 1. MIL-STD 461-G mittauskategoriat	10
TAULUKKO 2. MIL-STD 461-G mittausten soveltuvuus alustoille.....	10
TAULUKKO 3. Lähtötiedot moottorille	25
TAULUKKO 4. MIL-STD 461-G oleelliset muutokset.....	29

1 JOHDANTO

Kehittämistehtävä tässä työssä on saada Patrian sotilasmaastokuorma-auto täyttämään sotilasstandardin mukaiset sähkömagneettisen yhteensopivuuden raja-arvot, säteilevän- ja johtuvan siedon, sekä säteilevien- ja johtuvien emissioiden osalta. Maastokuorma-auton demo-versiolle on tehty aikaisempina vuosina tyyppihyväksyntästandardin mukaisia EMC-mittauksia, joihin opinnäytetyö osittain pohjautuu. Tavoitteena on myös selvittää Patrialle mahdollisten uusien komponenttien ja laitteiden hintataso, sekä tästä johtuvan suunnittelu- ja työmäärän kokonaiskuormitus.

Teoriaosuudessa käsitellään sähkömagneettisen säteilyn luonnetta, sen fysikaalisia ominaisuuksia ja niiden vaikutuksia materiaaleihin ja komponentteihin. Opinnäytetyössä käsitellään myös oleellimmat MIL-STD 461-F ja MIL-STD 461-G muutokset, koska standardista on julkaistu uusi revisio. Opinnäytetyössä tarkastellaan siedon ja emittoinnin vaikutuksia ja miten niiden vaikutuksiin voidaan varautua jo suunnittelupöydällä. Tutustun myös EMC-mittaamiseen Patrian EMC-teltassa, jossa mitataan muutamia eri laitteita, muutamalla eri suunnittelemani suojausvaihtoehdolla. Opinnäytetyö on osa Patrian tuotekehitysprojektia, jonka toiminta jatkuu tämän työn valmistuttua.

Opinnäytetyössä suunnittelu- ja mittaustyöt rajautuvat Patrian ajoneuvon ajajan näytön suojaamiseen sekä pyyhinjärjestelmän moottorin MIL-STD 461-G option tutkimiseen. Standardien osalta keskitytään EU/YK-direktiiveihin ja -säännöksiin, sekä Yhdysvaltojen armeijan räätälöimään MIL-STD 461 F&G revisioihin.

2 SÄHKÖMAGNEETTINEN SÄTEILY

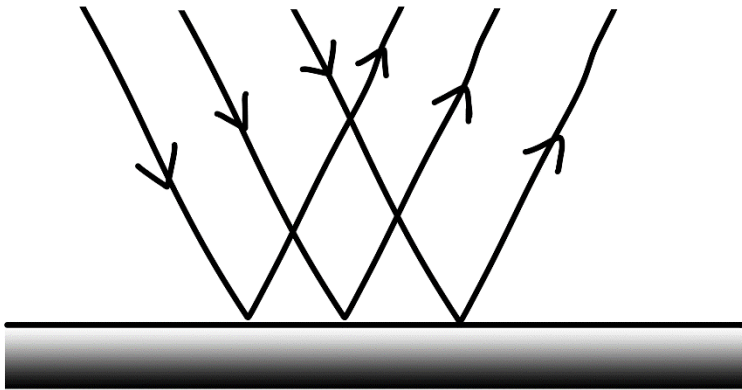
2.1 Mitä se on

Sähkömagneettinen säteily on luonnossa esiintyvä ilmiö, joka syntyy, kun varaus on kiihtyvässä tilassa, esimerkiksi vaihtosähkövirta johteessa. Sähkömagneettinen säteily esiintyy massattomana energiapaketina, joka etenee tyhjiössä valon nopeudella, $c = 299\,792\,458\text{ m/s} \approx 3 \times 10^8\text{ m/s}$. Nimensä mukaan sähkömagneettinen säteily koostuu värähtelevästä sähkö- ja magneettikentästä, jotka ovat 90-asteen kulmassa toisiinsa ja etenemissuuntaansa nähden, värähtelyn taajuus on f ja aallonpituus $\lambda = c/f$. Sähkömagneettisen energiapaketin, eli kvantin energiamäärä E on $E = hf$, jossa $h = 6,6256 \times 10^{-34}\text{ Js}$ on Planckin vakio. Sähkömagneettinen säteily onkin vain hienompi nimitys valolle, sille valolle, joka antaa värit luonnolle, kuin myös sille valolle, jota emme näe mutta tunnemme lämpönä auringon paistaessa. (Lehto & Räisänen 2003, 9)

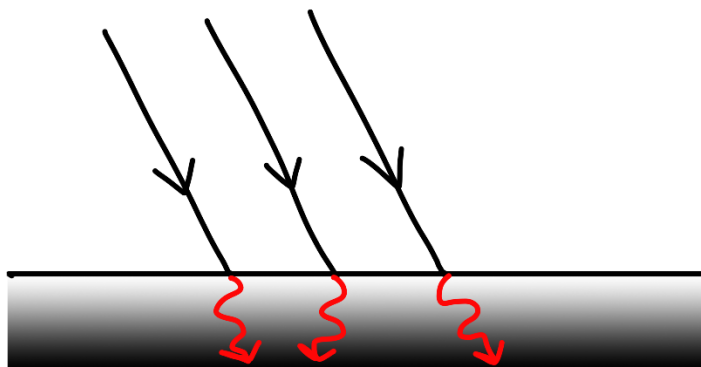
2.2 Mihin/Miten ilmiö vaikuttaa

Sähkömagneettinen säteily etenee tyhjiössä valon nopeudella värähtelevänä energiapaketina, jota voidaan joissain tapauksissa käsitellä etenevänä pistemäisenä objektina ja joissain tapauksissa etenevänä aaltona, samalla tavalla kuten pisara levittäytyy aaltomaisesti pudotessaan vesilammikkoon, ilmiötä kutsutaan nimellä aalto-hiukkasdualismi. Riippumatta siitä kumpaa ajattelutapaa käyttää, kohdatessaan esteen tyhjiössä tai muussa väliaineessa, sähkömagneettinen säteily reagoi ja on vuorovaikutuksessa esteen kanssa.

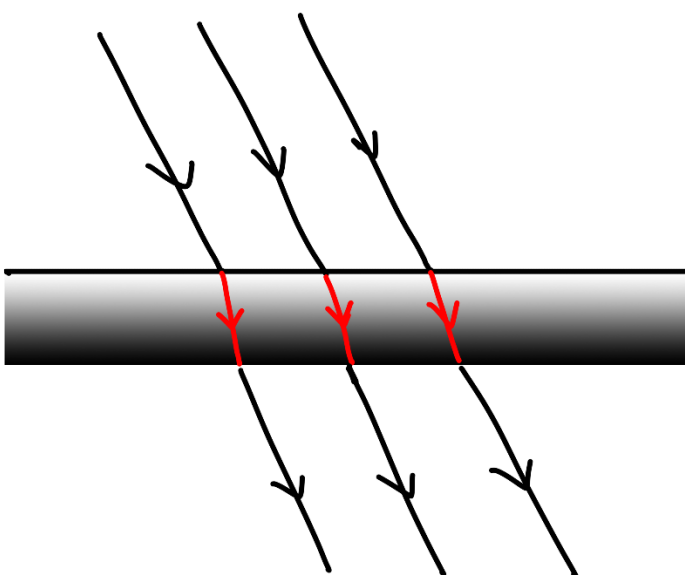
Siitä miten sähkömagneettinen säteily, myös fotoniksi γ kutsuttu energiapaketti on vuorovaikutuksessa materian kanssa, riippuu säteilyn taajuudesta f , sen energiasta E , sekä materian atomi- ja molekyyllirakenteesta, jonka kanssa fotonit ovat vuorovaikutuksessa. Säteily voi törmätä materiaan ja heijastua takaisin, se voi myös absorboitua esteeseen, osittain tai kokonaan, jonka seurauksena säteily pääsee myös kulkemaan materian läpi, osittain tai kokonaan.



KUVA 1. Säteilyn heijastuminen



KUVA 2. Säteilyn absorboituminen



KUVA 3. Säteilyn läpäisy

2.3 Hyöty vai haitta?

Aikaisemmissa kappaleissa käsiteltiin sähkömagneettista säteilyä yleisesti, sähkömagneettisen säteilyn luonne ja kaavat pätevät sähkömagneettiseen spektriin kokonaisuudessaan. Opinnäytetyön kannalta ei ole kuitenkaan oleellista käsitellä säteilyä koko spektrin laajuudelta, vaan keskittyä standardeissa määriteltyihin radiotaajuuksiin. Radioaaltojen taajuusalue voidaan rajata alueelle 3kHz-300GHz. (Lehto & Räisänen 2003, 10)

Radiotaajuuksien biologisia vaikutuksia on tutkittu eläimillä ja ihmisillä ja tutkimusten perusteella voidaan sanoa, että säteily radiotaajuusalueella ei ole ionisoivaa, eli toisin sanoen ei syöpää aiheuttavaa, mutta niiden lämpövaikutuksia voidaan pitää haitallisina. Ionisoimiseen, eli elektronin irrottamiseen kiertoradaltaan tarvittava energiamäärä on biologisen materiaalin molekyyileillä 12 eV ja radiotaajuuden energiakvantti 1THz alueella on vain 4 meV. Fotonin energia elektronivoltteina:

$$E(\text{eV}) = \frac{1.24 \left(\frac{\text{eV}}{\mu\text{m}} \right)}{\lambda(\mu\text{m})} \quad (2.1)$$

missä arvo 1.24 saadaan kertomalla fotonin energia hc yhdellä elektronivoltilla $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$

Yksi elektronivoltti on energiamäärä, jonka elektroni tarvitsee kulkeakseen yhden voltin potentiaalieron läpi. Väestön sähkömagneettisille kentille altistumisen rajoittamisesta on annettu Neuvoston suositus 1999/519/EY, joka pohjautuu Kansainvälisen ionisoimattoman säteilyn komission ICNIRP julkaisuun vuodelta 1998. (Lehto & Räisänen 2003, 277-279)

3 SÄHKÖMAGNEETTINEN YHTEENSOPIVUUS

3.1 Mitä se on

Sähkömagneettinen yhteensopivuus (Electromagnetic Compatibility, EMC) saavutetaan, kun sähkökäyttöinen laite toimii normaalissa käyttöympäristössään aiheuttamatta liiallista sähkömagneettista häiriötä (Electromagnetic Interference, EMI) käyttöympäristöön ja häiriintymättä itse sille tarkoitetun normaalin käyttöympäristön sähkömagneettisista häiriöistä.

Tuotesuunnittelussa on erityisen tärkeää tiedostaa laitteen normaali käyttöympäristö ja tuotekategoria, johon valmistettava laite luokitellaan. Ajoneuvoille on erillinen EU-direktiivin mukainen EMC-standardi kuin muille kuluttajakäyttöön suunnatuille sähkölaitteille. EMC-hyväksyntää silmällä pitäen laitteen valmistajan on otettava huomioon myös kohdemaan, tai -alueen käyttämät minimistandardivaatimukset ja teknologia-ala, johon laite kuuluu ja sitä markkinoidaan. Nämä asiat tulee dokumentoida ja opastaa tuotesuunnittelussa ja -kehityksessä, jotta voidaan käyttää oikeaa EMC-standardia ohjenuorana laitteen hyväksyntää varten.

Nopeasti kehittyvällä teknologia-alalla sähkömagneettinen yhteensopivuus tuo omia haasteita esimerkiksi elektroniikan lisääntyessä ja laitekokonaisuuksien pienentyessä ja komponenttitiheyden kasvaessa. 20 pikojoulea on jo riittävä energiamäärä muuttamaan yleisesti käytetyn TTL-piirin tilaa (0/1). (Eurofarad tuotekuvasto, 5)

3.2 Standardihierarkia

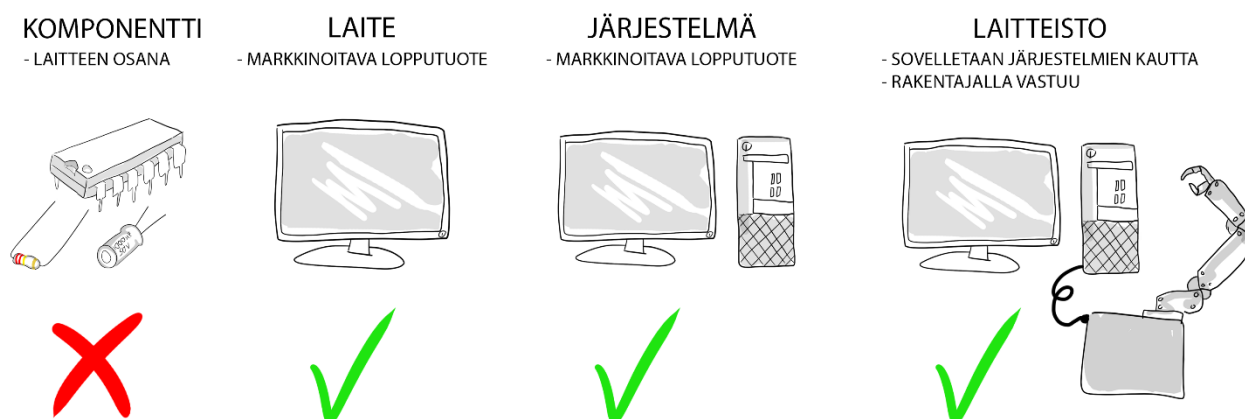
Osana Euroopan Unionia noudatamme ensisijaisesti direktiiviä 2014/30/EU sähkölaitteiden EMC-vaatimusten osalta, jos pääasialliset markkinat ovat ETA-alueella. Direktiivi antaa yleismaallisen kuvauksen häiriösuojausvaatimuksista, mutta ei määrittele raja-arvoja siedon- ja emissioiden osalta.

”Tällä direktiivillä säännellään laitteistojen sähkömagneettista yhteensopivuutta. Sen tavoitteena on varmistaa sisämarkkinoiden toiminta edellyttämällä, että laitteistojen sähkömagneettinen yhteensopivuus on tasoltaan riittävää.” (2014/30/EU 2014, 5)

3.2.1 Periaate

Direktiivin määrittelemät menettelyt antavat valmistajalle oikeuden kiinnittää tuotteeseen CE-merkin, kun direktiivin asetusten minivaatimukset on täytetty. CE-merkki tarkoittaa, että valmistaja takaa tuotteen vaatimustenmukaisuuden.

DIREKTIIVIN SOVELTUVUUS



KUVA 4. EU-direktiivin 2014/30/EU soveltaminen

3.2.2 Vaatimuksia ja raja-arvoja kaupallisiin tuotteisiin

Direktiiviä 2014/30/EU sovelletaan käytännössä kaikkiin laitteisiin, jotka käyttävät sähköenergiaa toimiaukseen. Kyseistä EMC-direktiiviä ei kuitenkaan sovelleta ajoneuvoihin, näille on oma Yhdistyneiden kansakuntien Euroopan talouskomission (UN/ECE) sääntö N:o 10, joka määrittelee sähkömagneettisen yhteensopivuuden raja-arvot ajoneuvon tyyppihyväksyntää varten, jota Patria myös seuraa markkinoidessaan YK/ETA-alueella.

Tämä Yhdistyneiden kansakuntien Euroopan talouskomission (UN/ECE) sääntö N:o 10 (puhekielessä E-sääntö 10), on sääntö, johon viitataan Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksessa N:o 661/2009, joka määrittelee moottoriajoneuvojen tyyppihyväksyntävaatimukset ETA-alueella.

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EY) N:o 661/2009 käsittelee muun muassa moottoriajoneuvojen yleiseen turvallisuuteen liittyvistä tyyppihyväksyntävaatimuksista viitaten näille tarkoitettuihin standardeihin, sähkömagneettisen yhteensopivuuden osalta UN/ECE sääntö N:o 10:een. ((EY) N:o 661/2009 2009, 34)

3.2.3 MIL-STD 461-G

Puolustusvälineiteollisuudessa EMC-direktiivit ja säännöt eivät suoranaisesti koske valmistettavia tuotteita, esimerkiksi Patrian sotilasmaastokuorma-autoa. Vaatimukset on määritelty erikseen ja usein vielä räätälöidysti asiakkaan kanssa sopimusvaiheessa. (Williams 2007, 106)

MIL-STD 461 on Yhdysvaltojen armeijan, ilmavoimien, laivaston ja muiden puolustusministeriön jäsenien muodostaman komitean laatima standardi, jossa määritellään mittausmenetelmät ja raja-arvot sähkölaitteiden ja osajärjestelmien sähkömagneettisen yhteensopivuuden takaamiseksi. Standardin uusimman G-revisio astui voimaan 11 joulukuuta vuonna 2015. Tässä standardissa ja tämän opinnäytetyön kannalta oleellinen asia on ymmärtää termi laite, jolla tarkoitetaan standardissa yksittäistä puolustusvälineiteollisuudessa käytettävää laitetta, esimerkiksi ajajan näyttöä, sekä kokonaista ajoneuvoa. (MIL-STD 461-G 2015, 174)

Standardissa ei ole viittauksia kansainvälisiin ISO/CISPR-standardeihin sähkömagneettisen yhteensopivuuden mittauksien tai raja-arvojen osalta, kuten useissa EU-asetuksissa. MIL-STD 461:ä voidaan pitää ikään kuin täysin omana kulluvana standardina, kun sitä verrataan EU:n jäsenvaltioiden käyttämiin direktiiveihin ja neuvoston asetuksiin.

Miksi tässä opinnäytetyössä käsitellään standardia, joka elää omaa elämäänsä kaukaisella mantereella, eikä liity EU:n sisällä markkinoitaviin tuotteisiin suoranaisesti millään tavalla? Kun Patria valmistaa Suomessa ajoneuvon, sille tarvitaan tyyppihyväksyntä, jotta se saadaan markkinoille. Tyyppihyväksynnässä noudatetaan Neuvoston asetusta N:o 661/2009, jossa sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta mainitaan seuraavaa:

”Valmistajien on varmistettava, että ajoneuvot, järjestelmät, osat ja erilliset tekniset yksiköt vastaavat tässä asetuksessa ja sen täytäntöönpano toimenpiteissä vahvistettuja niitä koskevia vaatimuksia, kuten

vaatimuksia, jotka liittyvät - - g) sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen” ((EY) N:o 661/2009 2009, 16)

Tyyppihyväksyntä standardissa määritelty E-sääntö N:o 10 on vähimmäisvaatimus sähkömagneettisen yhteensopivuuden varmistamiseksi. Tämän lisäksi sopimusvaiheessa asiakas voi halutessaan määritellä muita EMC-standardeja tai yksittäisiä osia tietystä standardista noudatettavaksi ajoneuvon valmistuksessa.

Tuote, esimerkiksi Patrian valmistama sotilaskäyttöön tarkoitettu kuorma-auto normaalisti suunnitellaan ja valmistetaan täyttämään E-sääntö N:o 10 perus ratkaisuiltaan. Asiakkaalle voidaan tämän lisäksi tarjota optiona tiukempaa MIL-STD 461 läpäisevää ajoneuvoa, joka tarkoittaa, että ajoneuvon laitteiston ulkonäkö saattaa muuttua, mutta antaa esimerkiksi asiakkaalle mahdollisuuden lisätä omia laitteitaan ajoneuvon ilman että ajoneuvon toimintavarmuus heikkenee. Patrian tuotekehityksessä otetaan myös huomioon asiakkaiden palaute ja jatkuva yhteistyö asiakkaiden kanssa, jonka pohjalta näitä ratkaisuja myös toteutetaan.

Tässä opinnäytetyössä pääsin toteuttamaan ylläolevaa toimintamallia ja suunnittelemaan perus ajoneuvo ratkaisuun MIL-STD 461-G optioita niiden laitteiden osalta, joiden on todettu aiempina vuosina tehtyjen mittausten perusteella ylittävän standardissa määritetyt raja-arvot.

MIL-STD 461-G sisältää kaikkiaan yhdeksäntoista erilaista mittauskategoriaa laitteen johtuvien ja säteilevien häiriöiden mittaamiseen. Kukin kategoria on numeroitu kolminumeroisella koodilla, joissa standardin myöhemmissä osissa tarkennetaan mihin laitteisiin ja/tai alustoihin mittaus kohdistuu, esimerkiksi CS109-mittaus ei sovellu maassa kulkeville ajoneuvoille, mutta täytyy suorittaa sukellusveneille, jos mittauksessa CS109 määritetyt tarkentavat osat täyttyvät laitteen (sukellusveneeseen) osalta. Mittauskategoriat ovat jaettu standardissa TAULUKKO 1 mukaisesti ja soveltuvuus TAULUKKO 2 mukaisesti.

TAULUKKO 1. MIL-STD 461-G mittauskategoriat (MIL-STD 461-G 2015, 25)

Requirement	Description
CE101	Conducted Emissions, Audio Frequency Currents, Power Leads
CE102	Conducted Emissions, Radio Frequency Potentials, Power Leads
CE106	Conducted Emissions, Antenna Port
CS101	Conducted Susceptibility, Power Leads
CS103	Conducted Susceptibility, Antenna Port, Intermodulation
CS104	Conducted Susceptibility, Antenna Port, Rejection of Undesired Signals
CS105	Conducted Susceptibility, Antenna Port, Cross-Modulation
CS109	Conducted Susceptibility, Structure Current
CS114	Conducted Susceptibility, Bulk Cable Injection
CS115	Conducted Susceptibility, Bulk Cable Injection, Impulse Excitation
CS116	Conducted Susceptibility, Damped Sinusoidal Transients, Cables and Power Leads
CS117	Conducted Susceptibility, Lightning Induced Transients, Cables and Power Leads
CS118	Conducted Susceptibility, Personnel Borne Electrostatic Discharge
RE101	Radiated Emissions, Magnetic Field
RE102	Radiated Emissions, Electric Field
RE103	Radiated Emissions, Antenna Spurious and Harmonic Outputs
RS101	Radiated Susceptibility, Magnetic Field
RS103	Radiated Susceptibility, Electric Field
RS105	Radiated Susceptibility, Transient Electromagnetic Field

TAULUKKO 2. MIL-STD 461-G mittauksen soveltuvuus alustoille (MIL-STD 461-G 2015, 26)

Equipment and Subsystems Installed In, On, or Launched From the Following Platforms or Installations	Requirement Applicability																		
	CE101	CE102	CE106	CS101	CS103	CS104	CS105	CS109	CS114	CS115	CS116	CS117	CS118	RE101	RE102	RE103	RS101	RS103	RS105
Surface Ships	A	A	L	A	S	L	S	L	A	S	A	L	S	A	A	L	L	A	L
Submarines	A	A	L	A	S	L	S	L	A	S	L	S	S	A	A	L	L	A	L
Aircraft, Army, Including Flight Line	A	A	L	A	S	S	S		A	A	A	L	A	A	A	L	A	A	L
Aircraft, Navy	L	A	L	A	S	S	S		A	A	A	L	A	L	A	L	L	A	L
Aircraft, Air Force		A	L	A	S	S	S		A	A	A	L	A		A	L		A	
Space Systems, Including Launch Vehicles		A	L	A	S	S	S		A	A	A	L			A	L		A	
Ground, Army		A	L	A	S	S	S		A	A	A	S	A		A	L	L	A	
Ground, Navy		A	L	A	S	S	S		A	A	A	S	A		A	L	L	A	L
Ground, Air Force		A	L	A	S	S	S		A	A	A		A		A	L		A	

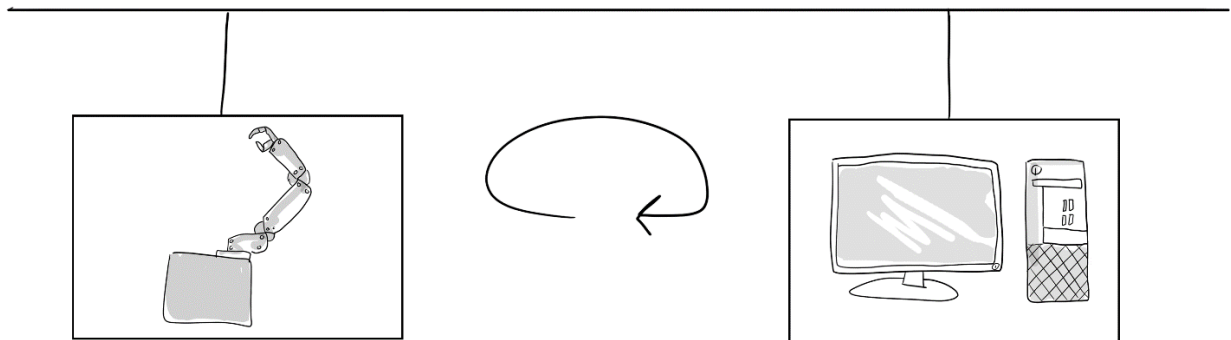
Legend:
A: Applicable
L: Limited as specified in the individual sections of this standard.
S: Procuring activity must specify in procurement documentation.

3.3 Johtuva

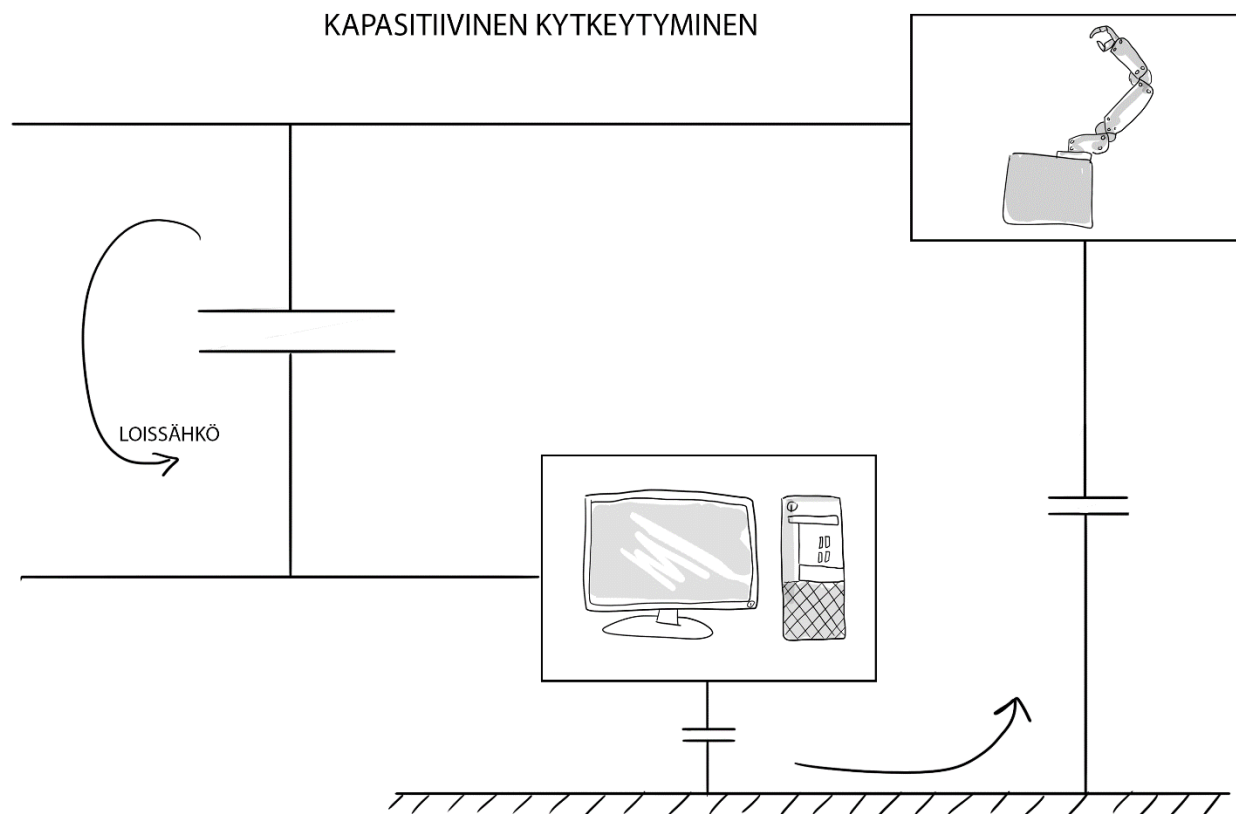
MIL-STD 461-G sisältää kolmetoista erilaista mittauskategoriaa laitteen johtuviin häiriöihin liittyen. Ne voidaan jakaa kahteen pää tasoon, johtuva emissio (Conducted emissions, CE) ja johtuva sieto (Conducted susceptibility, CS). Huolimatta standardin laajasta kannanotosta johtuviin häiriöihin, tässä opinnäytetyössä esiintyvät ajoneuvon ongelmakohteet koostuvat pääasiassa säteilevistä häiriöistä.

Johtuva häiriö nimensä mukaisesti etenee johtimia pitkin yksittäisen laitteen sisällä tai laitekokoaisuuksien välillä. Häiriö voi olla korkeataajuinen jännite, korkeataajuinen virta tai harmoninen yliaalto. Johtuvia häiriöitä aiheuttavat kaikenlainen sähköinen kytkeytyminen verrattain hitaista käsikäyttöisistä kytkimistä nopeampiin pulssinleveysmodulaatio, eli PWM-ohjauspiireihin. Johtuva häiriö voi edetä resistiivisen, kapasitiivisen ja induktiivisen kytkeytymisen avulla. (Eurofarad tuotekuvasto, 5)

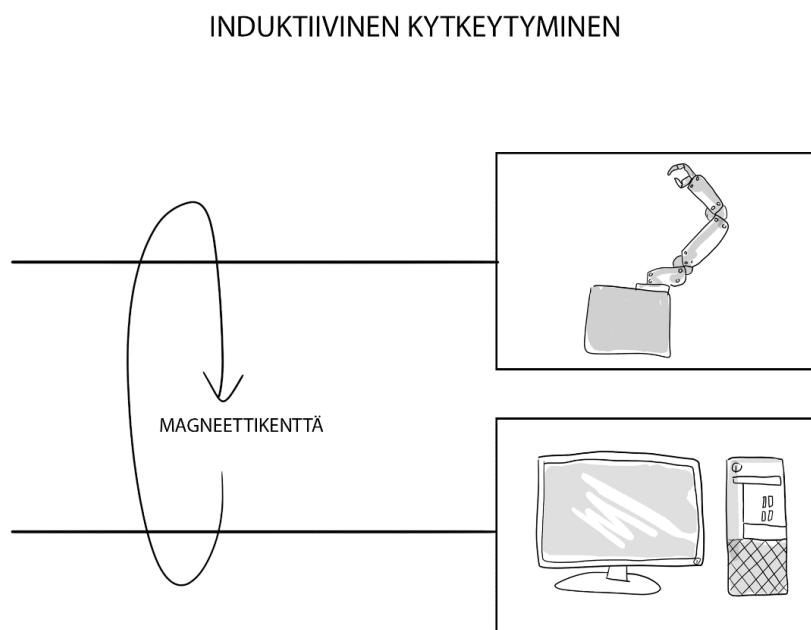
GALVAANINEN KYTKEYTYMINEN



KUVA 5. Galvaaninen kytkeytyminen



KUVA 6. Kapasitiivinen kytkettyminen

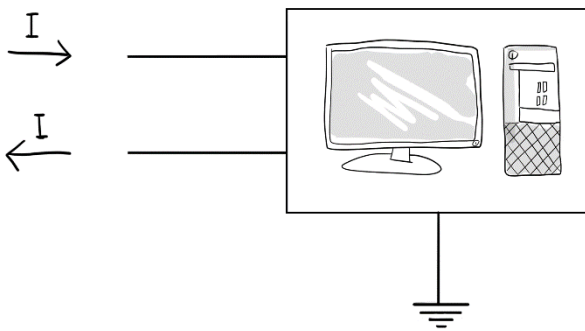


KUVA 7. Induktiivinen kytkettyminen

3.3.1 Differential mode

Differentiaalinen kytketyminen tapahtuu sähkömagneettisen säteilyn vaikuttaessa esimerkiksi kahden laitteen välillä kulkeviin johtimiin, jotka kuljettavat meno- ja paluusignaalia (KUVA 5).

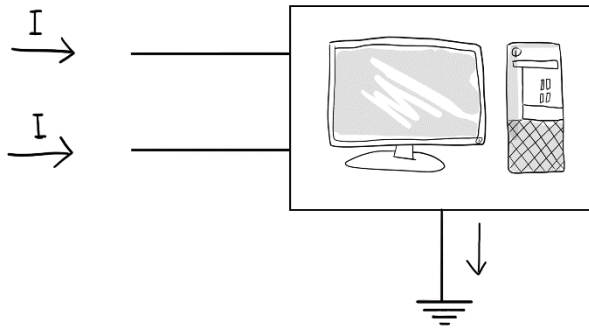
Sähkömagneettinen säteily synnyttää johtimissa sähkövirran, eli aiheuttaa ei-toivottuja häiriösignaaleja. Differentiaalinen kytketyminen tapahtuu vain johtimien välillä. (Williams 2007, 232)



KUVA 8. Differentiaalinen kytketyminen

3.3.2 Common mode

Yhteiskytketyminen on sähkömagneettisen säteilyn kytketyntymuoto johtimen, tai johtimien ja laitteen rungon, tai maadoituspisteen välillä (KUVA 6). Tuleva sähkömagneettinen säteily synnyttää johtimissa sähkövirran, joka kulkee silmukkamaisessa kytkennässä johtimen, tai johtimien ja maadoituspisteen välillä. Suunnitteluvaiheessa yhteiskytketyntymiseen varautuminen voi olla ongelmallista, jos laitteiden mekaanisen suunnittelun ja sähkösuunnittelun välillä ei kommunikoida tarpeeksi. Laitteiden ulkoista rakennetta, sille ominaista kapasitanssia ja induktanssia ei saada selville sähkösuunnittelun piirikaavioista. (Williams 2007, 232)

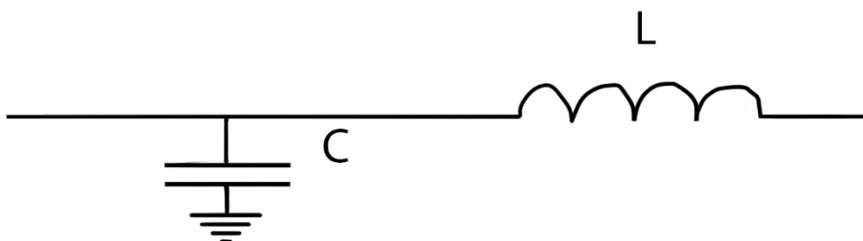


KUVA 9. Yhteiskytkeytyminen

3.3.3 Suojaustoimenpiteet

Yksi keino päästä eroon ei-toivotuista johtuvista häiriösignaaleista on käyttää suodattimia. Suodattimet ovat laitteita, jotka vaimentavat tiettyjä taajuuksia. (Eurofarad tuotekuvasto, 4)

Alipäästösuodatin koostuu kondensaattorista, joka on kytketty signaalin ja maan välille (rinnan) ja kela/kuristimesta, joka on kytketty signaaliin (sarjaan). Kondensaattorin kapasitiivinen reaktanssi (X_C) on taajuudesta riippuvainen, eli toisin sanoen, kun signaalin taajuus kasvaa, kondensaattorin vastus pienenee. Kela/kuristin toimii taas päinvastoin, kun signaalin taajuus kasvaa sen induktiivinen reaktanssi (X_L) kasvaa, eli vastustaa signaalin etenemistä. Näiden komponenttien yhteiskäyttö tällaisessa konfiguraatiossa ohjaa häiriösignaalit maahan, josta energia haihtuu lämpönä ympäristöön.



KUVA 10. Alipäästösuodatin

Kapasitiivinen reaktanssi.

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (3.1)$$

missä X_C = Kapasitiivinen reaktanssi (Ω)

f = signaalin taajuus (Hz)

C = kondensaattorin kapasitanssi (F)

Induktiivinen reaktanssi.

$$X_L = 2\pi fL \quad (3.2)$$

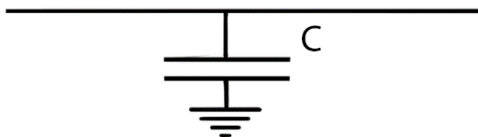
missä X_L = Induktiivinen reaktanssi (Ω)

f = signaalin taajuus (Hz)

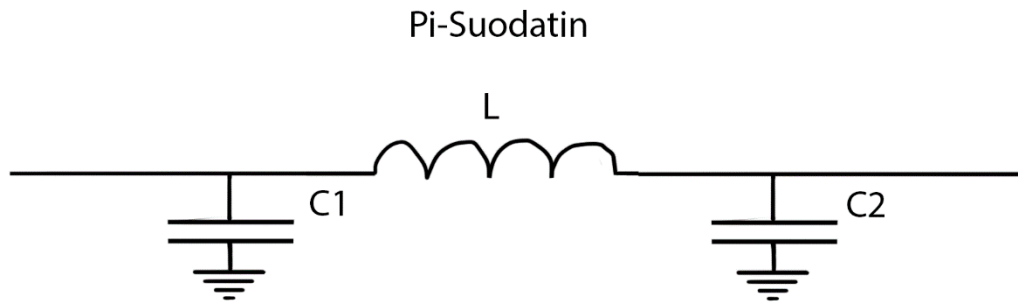
L = kelan induktanssi (H)

Suodattimet asennetaan mahdollisimman lähelle häiriölähdettä, tai häiriintyvää laitetta. Patrian ajoneuvossa, joka sisältää alikokoonpanoja ja erilaisia kotelointeja laitteiden ympärillä suodattimet voidaan asentaa itse kotelointiin. C ja Pi-suodattimiksi kutsutut suodatintyypit ovat tyypillisesti eniten käytettyjä suodatintyyppejä kotelointien yhteydessä. C ja Pi-suodattimet ovat suunniteltu käytettäväksi sovellutuksissa, joissa on korkea lähde- ja kuormaimpedanssi. (Komponenttivalmistajan opas 2010)

C-Suodatin



KUVA 11. C-suodatin



KUVA 12. Pi-suodatin

Laitteiden suojaaminen johtuvilta sekä säteileviltä häiriöiltä voidaan jakaa kahteen kategoriaan: Aktiiviseen ja passiiviseen suojaukseen, joista aktiivista suojausta tulisi käyttää ensisijaisesti. Aktiivinen suojaus keskittyy häiriölähteen vaimentamiseen, jolla on tarkoitus vähentää häiriötehoa sen syntypisteessä. Tällaisia keinoja ovat esimerkiksi syöttävän laitteen lähtöjen suodattaminen, induktiivisten piirien suojaaminen, kaapeleiden häiriösuojaus sekä laitteistojen kotelointi. Passiivisessa suojauksessa keskitytään suojaamaan häiriintynyt laite tai laitekokonaisuus. Suojaustoimenpiteet ovat samoja kuin aktiivisessa suojauksessa.

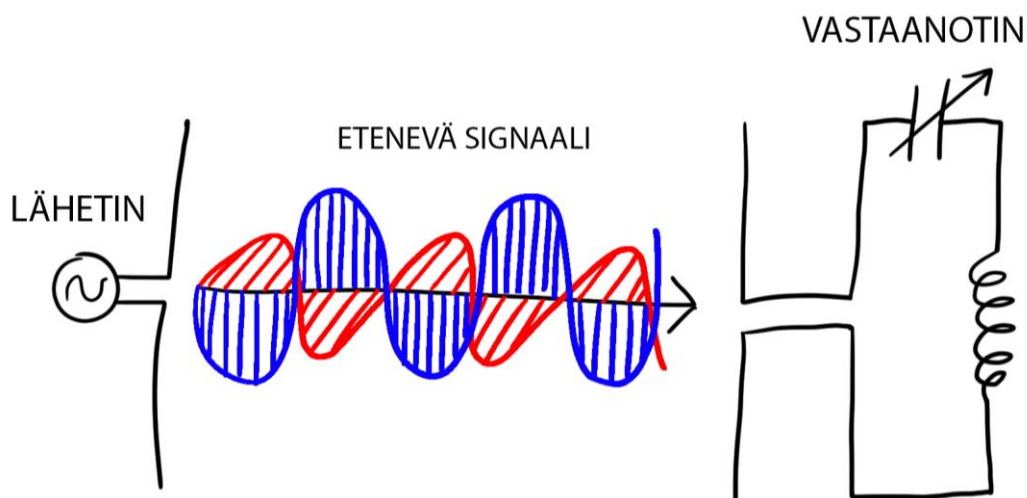
Aktiivinen suojaus ennalta ehkäisee mahdollisten häiriöiden ilmenemisen laitteissa, joita lisätään jälkikäteen, esimerkiksi ajoneuvoon, koska häiriöt vaimennetaan jo sen syntypisteellä. Laitteet ja komponentit voivat kuitenkin käyttäytyä eri tavalla sijoitettuna eri ympäristöön, joten häiriö voi ilmetä vain osassa laitetta, jolloin passiivinen suojaus on tehokkaampaa. (Eurofarad tuotekuvasto, 7)

3.4 Säteilevät häiriöt

MIL-STD 461-G sisältää kuusi erilaista mittausta säteilevien häiriöiden osalta, jotka on jaettu kahteen päätasoon, säteilevä emissio (Radiated emissions, RE) ja säteilevä sieto (Radiated susceptibility, RS). Päätasot on jaettu kuten johtuvien mittausten osalta eri alakategorioihin, joissa on määritelty mittaus-tapa sekä raja-arvot kyseiselle mittausmenetelmälle. Alakategorioille on erikseen omat mittaukset sähkökentän sietoon ja emissioon, sekä magneettikentän sietoon ja emissioon. Tämä erottelu on syytä muistaa suojaustoimenpiteissä ja suunnittelun kannalta, jotta suojauksessa käytettävät materiaalit ja komponentit ulottuisivat molempiin raja-arvoihin.

3.4.1 Suojaustoimenpiteet

Sähkömagneettisen yhteensopivuuden liittyvissä standardeissa rajoitetaan säteilevien raja-arvojen osalta spektrissä radioaaltojen taajuusalueisiin. Radioaaltojen ominaisuus, eli niiden aallonpituus on fyysiseltä kooltaan sillä alueella, jolla kuluttajan käyttämät sähkölaitteet ovat. Tämä tarkoittaa laitesuunnittelun kannalta sitä, että sähköä johtavista osista voi pahimmassa tapauksessa muodostua lähetäviä tai vastaanottavia antennieja.



KUVA 13. Antennin lähetin- vastaanotin periaatekuva

Antennien ominaisuuksiin liittyy myös muitakin seikkoja kuten sen asento, geometria, kokonaispituus sekä pituus suhteessa lähetettävään tai vastaanotettavaan radiotaajuuteen. Suojaustoimenpiteitä suunniteltaessa on tärkeää ymmärtää sähköä johtavien osien ja antennien yhtäläisyydet, kuinka ne ovat pohjimmiltaan yksi ja sama asia, kun tarkastellaan säteileviä häiriöitä.

3.4.2 Sähkö- ja magneettikentiltä suojautuminen (Shielding theory)

Aaltoimpedanssiksi (Z_0) kutsutaan fotonin sähkökentän voimakkuuden suhdetta magneettikentän voimakkuuteen (E/H). Tyhjiössä aaltoimpedanssi saa arvonsa kahdesta luonnonvakiosta, yhtälö (3.3).

$$\begin{aligned} Z_0 &= \sqrt{(\mu_0/\varepsilon_0)} \\ Z_0 &= 122\pi \end{aligned} \tag{3.3}$$

missä tyhjiön permeabiliteetti $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

ja tyhjiön permitiivisyys $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

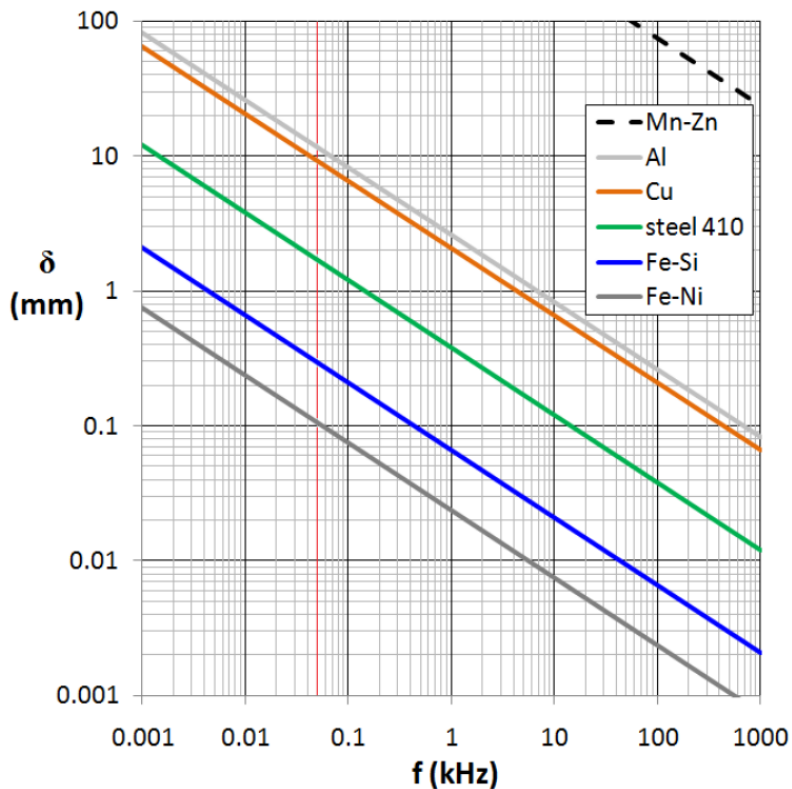
Aaltoimpedanssia kutsutaan myös tasoaalloksi (Transverse electromagnetic wave, TEM-wave), kun etäisyys säteilyn lähteestä on $d > \lambda/2\pi$. Tasoaallon sähkö- ja magneettikenttien voimakkuudet vaimenevat etäisyyden kasvaessa samalla nopeudella toisiinsa nähden, joten aaltoimpedanssin arvo pysyy tyhjiössä vakiona, 377 Ohmissa. (Williams 2007, 230)

Niin kutsutussa lähikentässä, kun etäisyys $d < \lambda/2\pi$, säteilylähteen ominaisuudet määrittelevät aaltoimpedanssin. Pieni virtainen ja suuri jännitteinen säteilylähde tuottaa pääasiassa korkeaimpedanssisen sähkökentän, kun taas suuri virtainen ja pieni jännitteinen säteilylähde tuottaa pääasiassa matalaimpedanssisen magneettikentän. Lähikenttää tarkastellessa tulee huomioida vain toinen näistä ominaisuuksista kerrallaan, riippuen siitä tuottaako säteilylähde voimakkaamman sähkö- vai magneettikentän. (Williams 2007, 230)

Sähkömagneettinen säteily koostuu sähkökentästä ja magneettikentästä, jotka ovat toisiinsa ja etenemissuuntaan nähden 90 asteen kulmassa ja ne esiintyvät luonnossa aina yhdessä. Miksi on siis syytä eritellä sähkö- ja magneettikentiltä suojautuminen? Lyhyesti ilmaistuna, sähkökenttä pitää hyvästä johtavuudesta ja magneettikenttä hyvästä permeabiliteetista. Kun tarkastellaan sähkömagneettista säteilyä, sen sähkökenttä on vaikuttavassa roolissa ja antennien orientaatio valitaankin siten, että sähkökenttä on samalla tasolla antennin johtavien osien kanssa.

Sähkökentältä suojautuminen toteutetaan käyttämällä Faraday häkkiä. Faraday häkki voidaan rakentaa mistä tahansa johtavasta materiaalista, esimerkiksi kuparista ja se täytyy maadoittaa. Faraday häkki voi olla tarkoituksella rakennettu, mutta myös tahaton ominaisuus rakenteissa, esimerkiksi talojen rakenteiden sisällä olevaa johtavaa tukimateriaalia, joka on maadoitettu sähköverkon maadoituspisteeseen. Tästä syystä esimerkiksi joissain kerrostaloissa langaton internetyhteys voi olla heikko tai yhteyttä ei saada ollenkaan esimerkiksi rakennuksen kellarissa.

Sähkökentältä suojautumiseen vaikuttaa myös kentän, eli sähkömagneettisen säteilyn taajuus ja sen suhde Faraday häkissä käytettävän materiaalin paksuuteen. Yksinkertaistettuna, mitä paksumpi materiaali, sitä parempi suojaus, ilmiötä kuvataan nimellä pintatunkeutuminen (Skin effect). Punainen pystyviiva on 50 Hz taajuuden kohdalla (KUVA 8).



KUVA 14. Pintatunkeutuminen (Zurek 2016)

Magneettikentältä ei sinänsä voida suojautua samalla tavalla kuten sähkökentältä siten, että ne muuttaisivat kulkusuuntaansa ja heijastuisivat pois suojattavasta laitteesta tai yksittäisestä komponentista.

Magneettikentälle on ominaista, että sen vuoviivat, joilla kuvataan magneettikentän vaikutusalueita,

palaavat aina lähtöpisteeseensä. Tämä tarkoittaa sitä, että vuoviivat täytyy hallitusti ohjata pois suojattavasta laitteesta tai komponentista.

Suhteellinen permeabiliteetti μ_r kuvaa aineen ominaisuutta ohjata näitä magneettikentän vuoviivoja, magneettikentän on siis ikään kuin helpompi kulkea materiaaleissa, joilla on korkea suhteellinen permeabiliteetti. Tällaisia aineita ovat esimerkiksi ferromagneetit. Alumiinin ja kuparin suhteellinen permeabiliteetti on sama kuin ilmalla, eli 1. Ne eivät ole magneettisia, joten nämä materiaalit eivät sovellu hyvin magneettikentältä suojautumiseen, toisin kuin rauta tai ruostumaton teräs. Ruostumaton teräs sisältää myös rautaa ja on yleisesti käytetty materiaali teollisuudessa, kuten Patrian ajoneuvoissa. Materiaalin magneettisuus ei vaadi energiaa sen ylläpitämiseen, se on aineen ominaisuus.

Magneettikenttä on myös seuraus, joka ilmenee kaikkialla missä esiintyy sähkövirtaa. Oikean käden säännön mukaisesti, jos virta kulkee peukalon osoittamaan suuntaan esimerkiksi johtimessa, niin magneettikenttä liikkuu muiden sormien osoittamaan suuntaan johteen ympärillä. Magneettikentän voimakkuus on suoraan verrannollinen virran suuruuteen.

Lenzin lain mukaan magneettikenttä indusoi johtavaan materiaaliin sähkövirran, jos näiden välillä on liikettä. Sähkövirran indusoituminen johteeseen saadaan aikaan myös magneetilla, jos kappaleiden välillä on suhteellista liikettä. Virran kulkusuunta indusoituneessa johteessa määräytyy siten, että se pyrkii vastustamaan alkuperäisen magneettikentän vaikutusta luomalla oman vastakkaisen magneettikentän, virran indusoituminen johteeseen haihtuu lopulta lämpönä ympäristöön ja täyttää siten energian säilymislain. (Williams 2007, 381)

3.5 Vaimennus

Sähkömagneettisen yhteensopivuuden sovellutuksissa ja mittauksissa käytetään vaimennuksen yksikönä desibeli mikrovolttia metriä kohden ($\text{dB}\mu\text{V/m}$). Vaimennus voidaan ymmärtää käänteisenä vahvistimena, esimerkiksi johtimeen liitettynä suodattimena, ajajan näytön päälle asennettavana suojakalvona tai kotelointina. Tämä sähkökentän voimakkuutta vaimentava komponentti, oli se sitten suodatin, suojakalvo tai Faraday-häkki laitteen ympärillä vaimentaa sähkökentän voimakkuutta, jota mitataan logaritmisella desibeliasteikolla, yhtälö (3.4).

$$X \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m} = 20\text{Log}_{10}\left(\frac{Y \mu\text{V}_1/\text{m}}{Z \mu\text{V}_2/\text{m}}\right)\text{dB} \quad (3.4)$$

missä referenssi taso $V_2 = 1\mu\text{V}/\text{m}$

Jos esimerkiksi säteilevän emission mittauksessa mitataan suojakalvoa käyttäen vaimennukseksi $40 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ jollain tietyllä taajuusalueella, se tarkoittaa, että sähkökentän voimakkuus kalvon häiriö puolella on $100 \mu\text{V}/\text{m}$ ja puhtaalla puolella $1 \mu\text{V}/\text{m}$, kuten käy ilmi laskemalla yhtälöllä (3.4).

$$\begin{aligned} \text{dB}\mu\text{V}/\text{m} &= 20\text{Log}_{10}\left(\frac{\mu\text{V}_1/\text{m}}{\mu\text{V}_2/\text{m}}\right)\text{dB} \\ \rightarrow 40 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m} &= 20\text{Log}_{10}\left(\frac{\mu\text{V}_1/\text{m}}{1\mu\text{V}/\text{m}}\right)\text{dB} \\ \rightarrow \frac{40 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}}{20} &= \text{Log}_{10}\left(\frac{\mu\text{V}_1/\text{m}}{1\mu\text{V}/\text{m}}\right)\text{dB} \\ \rightarrow 2 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m} &= \text{Log}_{10}\left(\frac{\mu\text{V}_1/\text{m}}{1\mu\text{V}/\text{m}}\right)\text{dB} \\ \rightarrow 10^2 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m} &= \left(\frac{\mu\text{V}_1/\text{m}}{1\mu\text{V}/\text{m}}\right)\text{dB} \\ \rightarrow 10^2 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m} &= V_1 \text{ dB} \\ \rightarrow 100 \mu\text{V}/\text{m} &= V_1 \end{aligned}$$

Sähkömagneettisen säteilyn vaimennuksen kokonaistehokkuus (SE) muodostuu kolmesta osasta, jota kuvaa yhtälö (3.5).

$$SE(\text{dB}) = R(\text{dB}) + A(\text{dB}) + B(\text{dB}) \quad (3.5)$$

missä SE = Vaimennuksen kokonaistehokkuus

R = Heijastuminen

A = Absorbointi

B = Uudelleen heijastuminen

Aikaisemmissa kappaleissa käsitelimme sähkömagneettisen säteilyn etenemistä tyhjiössä valon nopeudella, tyhjiössä säteily siis kulkee esteettä, kunnes kohtaa johtavan aineen, jolloin jokin, tai kaikki näistä kolmesta säteilyä vaimentavasta tekijästä astuu voimaan.

Sähkökentän (E_0) törmätessä johtavaan materiaaliin, esimerkiksi kotelointiin, se indusoi materiaalin pintaan sähkövirran, joka puolestaan luo oman vastakkaisuuntaisen sähkökentän (E_R). Törmäävän sähkökentän (E_0) ja takaisin heijastuvan sähkökentän (E_R) amplitudi-ero määrittää koteloinnin heijastushäviön (R). Materiaalin virranjohtokyky paksuutta kohden on rajallinen riippumatta siitä, käytetäänkö koteloinnin materiaalina terästä vai kuparia, joka tarkoittaa sitä, että osa törmäävästä sähkökentästä absorboituu syväälle materiaaliin ja sähkökenttä heijastuu materiaalin toiselle puolelle. Kuinka voidaan välttyä säteilyn heijastumisesta koteloinnin toiselle puolelle? Mitä paksumpi kotelointi, sitä parempi virran absorbointivaimennus (A) koteloinnin läpi. Absorbointivaimennus riippuu tunkeutumissyvyyden (δ) kerrannaisista, tunkeutumissyvyys on ilmaisu sähkömagneettisen säteilyn ominaisuudesta, jossa se pyrkii rajoittamaan vaihtosähkövirran kulkua johteen pinnassa. Tunkeutumissyvyys pienenee säteilyn taajuuden kasvaessa, ja materiaalin johtavuuden ja permeabiliteetin kasvaessa. Sähkökentän voimakkuus vaimenee 8,6 dB jokaista tunkeutumissyvyyttä kohti. Häviöt uudelleen heijastumisesta (B) ovat usein merkityksettömiä, absorbointihäviön (A) ollessa suurempi kuin 10 dB, mutta on oleellinen matalilla taajuuksilla koteloinnin materiaalin ollessa ohut. Tunkeutumissyvyys:

$$\delta = (\pi \times f \times \mu_r \times \sigma)^{-0.5} \quad (3.6)$$

missä δ = tunkeutumissyvyys (m)

f = Sähkömagneettisen säteilyn taajuus (Hz)

μ_r = Materiaalin suhteellinen permeabiliteetti (N)

σ = Materiaalin johtavuus (S/m)

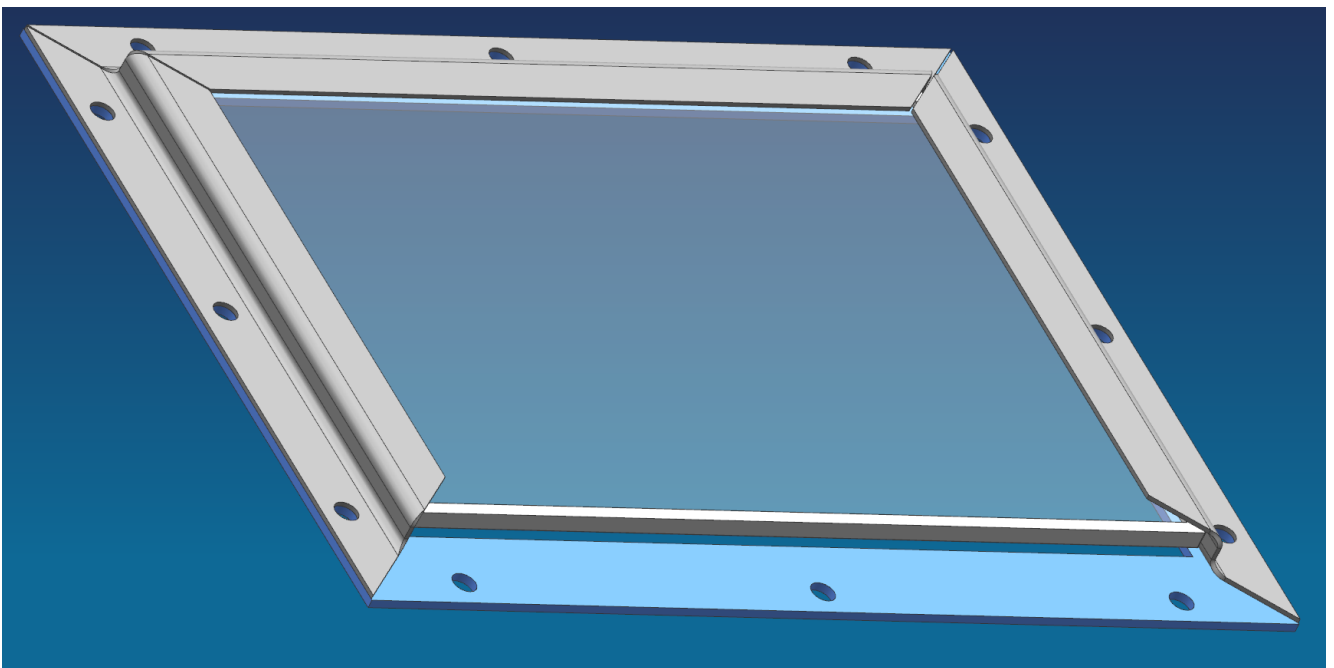
Hyvän johtavuuden omaavat materiaalit, kuten alumiini tai kupari heijastavat sähkökenttiä paremmin kuin teräs. Lähikentässä ($d < \lambda/2\pi$ (2)) sähkökentän impedanssi on korkea, jolloin heijastushäviö (R) on myös korkea. Lähikentässä magneettikentän impedanssi on matala, jolloin heijastushäviö (R) on myös matala. Tasoallion tarkastelussa heijastushäviö pienenee sähkökentän taajuuden kasvaessa ja kasvaa magneettikentän taajuuden kasvaessa. (Williams 2007, 382-383)

4 ONGELMAKOHTEET

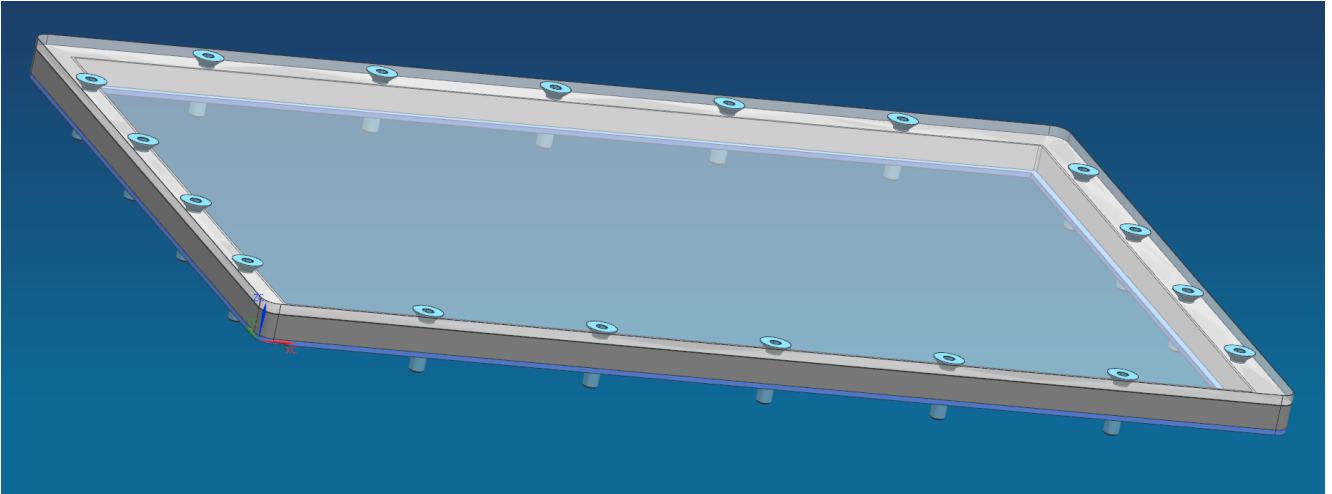
4.1 Ajajan näyttö

Opinnäytetyön aloituspalaverin myötä sain tehtäväkseni suunnitella ajoneuvon ajajan näytölle suojan, jolla päästäisiin MIL-STD 461-G säteilevien häiriöiden raja-arvoihin. Ajajan näyttöä on mitattu standardin säteileviä emissio- ja sietorajoja vastaan aikaisempina vuosina. Ajajan näytön ollessa ajoneuvon asennettuna sietomittauksissa näyttö pimeni tietyllä taajuusalueella, mutta ongelmaa ei saatu toistettua mitattaessa pelkkää näyttöyksikköä testipöydällä. Emissiomittauksissa näytön säteily ylitti MIL-STD 461-F standardin raja-arvot.

Tehtävääni kuului ongelmaan perehtyminen, protoversioiden nimikkeistäminen Patrian järjestelmään, proto versioiden 3D-mallinnustyö, protoversioiden tilaus- ja valmistuksen ohjaus. Näytön suojauksessa päädyin kahteen ulkonäöltään erilaiseen konfiguraatioon, joiden perimmäisenä tarkoituksena on koteloida kojetauluun upotettava näyttöyksikkö ja täten vaimentaa näyttöön kohdistuvia ja näytöstä lähtevää säteilyä (KUVA 15) ja (KUVA16).



KUVA 15. Näytön suojaus, konfiguraatio 1



KUVA 16. Näytön suojaus, konfiguraatio 2

Standardin asettamien vaatimusten lisäksi suunnittelussa täytyi ottaa huomioon osien yksinkertainen valmistettavuus Patria Land-yhtiön omalla koevalmistusverstaalla, mahdollisimman vaivaton saatavuus tilattaville komponenteille sekä erinäiset käytettävyyteen liittyvät seikat, kuten suojauksen irrotettavuus kojetaulusta huoltotoimenpiteiden ajaksi. Yksikössä on myös kosketusnäyttöominaisuus, joka helpottaa huoltotoimenpiteitä, mutta tätä ominaisuutta ei voitu säilyttää suunnittelemisni suojausratkaisuissa.

Molemmat näytönsuojat koostuvat kolmesta pääkomponentista: metallikehys, sähköä johtava suojalasi sekä sähköä johtava tiivistekkehys. Näyttö, sekä näytönsuojan kaikki komponentit tulee olla hyvin maadoitettuna keskenään ja kojetaulun kanssa, näin saadaan varmistettua, että häiriösignaalit eivät säteile johtavista osista vaan vaimenevat maapotentiaaliin.

Piirustusteni mukaiset näytönsuojien kehykset saatiin valmistettua koevalmistusverstaalla ruostumattomasta teräksestä, sekä alumiinista. Tanskalainen PSC ja suomalainen Q-Flex toimittivat sähköä johtavat suojalasiset, sekä sähköä johtavat tiivistekkehukset piirustusteni mukaisesti. Lisätietoa näytönsuojauksessa käytetyistä komponenteista valmistajien datalehdistä (LIITE 1).

4.2 Pyyhinjärjestelmän moottori

Ajoneuvossa oleva pyyhinjärjestelmä tulee moottoreineen samalta laitevalmistajalta ja järjestelmä halutaan säilyttää samana lukuun ottamatta pyyhinjärjestelmän moottoria, jolle halutaan MIL-STD 461

standardin mukainen EMC-optio. Pyyhinjärjestelmässä on yksi harjallinen tasasähkömoottori kulma- vaihteistolla, jota ohjataan edellisessä kappaleessa mainitun näyttöyksikön avulla. Hiiliharjallinen moottori aiheuttaa sähkömagneettisia häiriöitä johtimia pitkin sekä säteilemällä ympäristöön, eikä pyyhinjärjestelmän valmistajalla ei ole valikoimassaan harjattomia tasasähkömoottoreita (BLDC).

Patrian sisäisestä dokumentaatiosta sain selvitettyä pyyhinjärjestelmän moottorin ja vaihteiston sähköiset ja mekaaniset ominaisuudet. Moottorin sähköisistä ja mekaanisista arvoista oleellimmat tiedot ovat TAULUKKO 3 mukaiset.

TAULUKKO 3. Lähtötiedot moottorille

Nimellisjännite	24 VDC
Nimellisvirta	2,5 A
Maksimivirta	12 A
Nimellispyörimisnopeus	45 rpm
Vääntömomentti	5 Nm
Vaihteiston välityssuhde	55:1
Paino	1,1 kg

Vaihteellisen sähkömoottorin momentti (M) vaihteiston akselilta voidaan laskea yhtälön (4.1) avulla.

$$M = T_n \times \eta \times R \quad (4.1)$$

missä M = Momentti (Nm)

T_n = Moottorin nimellismomentti (Nm)

η = Vaihteiston hyötysuhde (≤ 1)

R = Vaihteiston välityssuhde (\mathbb{N})

Moottorin nimellispyörimisnopeus vaihteiston akselilta saadaan laskettua yhtälön (4.2) avulla.

$$n = \frac{n_{Motor}}{R} \quad (4.2)$$

missä n = Nimellispyörimisnopeus (rpm)

n_{Motor} = Moottorin nimellisyörimisnopeus (rpm)

R = Vaihteiston välityssuhde (N)

Keskusteluja ja kokouksia käytiin laitevalmistajien ja heidän myyntiedustajiensa kanssa Patrialla sekä sähköpostin välityksellä. Opinnäytetyön aikana yhteydenottoja tehtiin yhteensä kahdeksaan eri yritykseen pyyhinjärjestelmän moottorin korvaamisesta ja MIL-STD 461 optiosta. Näistä yrityksistä Saksalaisen Dunkermotorenin BLDC-moottorit ovat entuudestaan tuttuja ja Patrian käyttämiä, joten tätä vaihtoehtoa suosittiin.

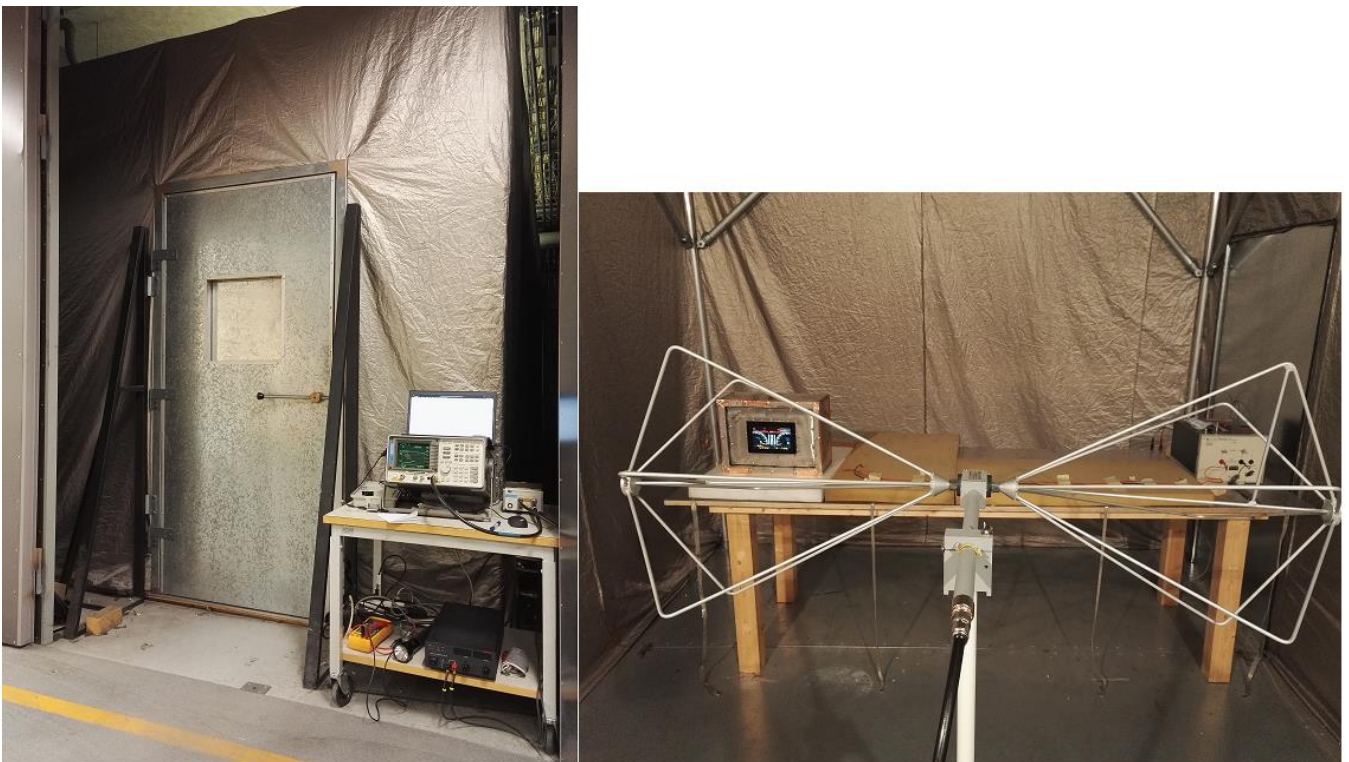
Opinnäytetyön aikana haasteita toivat erilaiset seikat moottoreiden hankinnassa muutenkin kuin suunnittelutyön myötä. Saksassa valmistetut moottorit, kuten Dunkermotorenin BLDC-moottorit olivat opinnäytetyön tekemisen aikana poliittisten päätösten myötä rajoitettuja liikkumaan puolustusvälineollisuuden toimijoille, kuten Patrialle. Opinnäytetyön aikana pyyhinjärjestelmän moottorin hankinta jäädytettiin toistaiseksi ja etsittiin vaihtoehtoista ratkaisua.

Mahdollisena yhteistyökumppanina MIL-STD 461-optio integrointiin pyyhinjärjestelmään on moottorivalmistaja Intecno. Yhteydenoton tavoitteena oli tuoda ajoneuvon pyyhinjärjestelmän valmistaja sekä Intecno yhteen, jotta pyyhinjärjestelmän valmistaja saisi BLDC-moottorin valikoimiinsa. Näiden kahden yrityksen yhteistyö yksinkertaistaisi myös Patrian hankintaosaston toimintaa pyyhinjärjestelmäoptioiden tilausprosessissa.

5 EMC-MITTAUKSET OSANA PROJEKTIA

5.1 Patrian omat mittaustilat

Patrialla on käytössään oma EMC-kammio, jossa voidaan suorittaa MIL-STD 461-G standardin mukaisia mittauksia pienille ja keskisuurille laitteille ja laitteistoille. EMC-kammio ei sovellu kokonaisen ajoneuvon EMC-mittaamiseen, mutta suorittamalla mittauksia ajoneuvoon asennettaville laitteille tai laitteistoille saadaan suuntaa-antavaa dataa suunnittelun ja asennusten vaatimustenmukaisuudesta. Mittauskammiota käytetään hyödyksi tuotesuunnittelussa, prototyyppien testauksissa ja eri laitevalmistajien tuottamien dokumenttien paikkansapitävyyden varmentamiseksi.



KUVA 17. Patrian EMC-kammio

Kammiossa tehtävät mittaukset rajoittuvat mitattavan laitteen, tai laitteiston säteilevien ja johtuvien emissioiden mittaamiseen, MIL-STD 461-G standardin osalta tämä tarkoittaa, että kammiossa voidaan suorittaa mittaukset CE102 ja RE102. Opinnäytetyön rajaamisen ja projektin kannalta on oleellista tutkia näytön suojausvaihtoehtoja RE102 ja RS103, koska säteilevät emissiot ja säteilevä sieto ovat olleet ajajan näytön ongelma-alueita.

5.2 SGS FIMKO

5.2.1 Yrityksen kuvaus

SGS (Société Générale de Surveillance, eli Yleinen seuranta yhdistys) on tarkastus-, verifiointi-, testaus- ja sertifiointiyritys, joka aloitti näiden palveluiden tarjoamisen 1900-luvun puolivälissä. Pääkonttori sijaitsee Genevessä, Sveitsissä.

SGS Fimko on osa SGS Finland Oy:tä ja on toiminut Suomessa vuodesta 1924 lähtien tarjoten edellä mainittuja palveluita eri osa-alueilla, kuten: maataloudessa, autojen tarkastuksessa, kuluttajatuotteiden testauksessa ja järjestelmäsertifioinneissa.

SGS FIMKO:n avasi palvelunsa kesällä 2016 Tuusulassa, jossa sijaitsee yksi kooltaan suurimmista Pohjois-Euroopan kaupallisista EMC-mittaushuoneista. Tässä laboratoriossa testataan pääasiassa suurikokoisia ja painavia laitteita, esimerkiksi traktoreita, metsätyökoneita, isoja teollisuustuotteita ja Patrian sotilasajoneuvoja. (SGS Finland asiakaslehti 2016)

5.2.2 Patrian ajoneuvomittaukset

Patria laatii ajoneuvo-, tai projektikohtaisesti dokumentin, joka sisältää viimeisimmät standardit kyseisen ajoneuvon tyyppihyväksyntää varten. Dokumentista käy ilmi luettelomaisesti eri standardien nimitykset, sekä soveltuvuus kyseiseen ajoneuvoon joko suoraan standardiin viitaten, tai lisäehdoin, esimerkiksi asiakasvaatimusten myötä. Luettelossa on esimerkiksi EMC-standardien osalta ajoneuvon tyyppihyväksynnän saamiseksi pakollinen E-sääntö N:o 10 (UN/ECE Regulation N:o 10) sekä viimeisin voimassa oleva revisio MIL-STD461:stä, jonka mukaan ajoneuvolle tai erillisille laitteille halutaan suorittaa tiukemmat mittaukset asiakasvaatimusten myötä. (Patrian sisäinen dokumentti)

Tyyppihyväksynnän kehysdirektiivinä toimi aiemmin 2007/46/EC, joka on sittemmin muutettu Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksella 661/2009. Neuvoston asetuksessa 661/2009 viitataan suoraan E-sääntö N:o 10:en soveltuvuudesta kaikille ajoneuvo luokille (M, N, O). ((EY) N:o 661/2009 Liite IV)

Direktiivin 2007/46/EC mukaan tyyppihyväksyntä on kuitenkin valinnaista ajoneuvoille, jotka on suunniteltu tai valmistettu asevoimien, väestönsuojelun, palolaitosten ja yleisestä järjestyksestä vastaavien voimien käyttöön. (2007/46/EC 2007, 4)

5.3 MIL-STD 461 F&G

MIL-STD 461 katselmoidaan viiden vuoden välein, jolloin myös päätetään tarve standardin revisioimiseen. Standardin G-revisio julkaistiin vuonna 2015 ja nykyisen revision katselmointi tapahtuu ensi vuonna, 2020. Patrian EMC-mittaustilat noudattavat viimeisintä revisiota niiltä osin, kun tiloissa on mahdollista. Ajoneuvokohtaisten mittausten verifiointi tapahtuu asiakkaan läsnä ollessa, jolloin mitaukset täytyy suorittaa kolmannen osapuolen testauslaboratoriossa ja standardin noudattaminen siirtyy testauslaboratoriolle.

TAULUKKO 4. MIL-STD 461-G oleelliset muutokset

Missä muutos ilmenee	Muutos lyhyesti
Kappale 4.3.7.2	Testaustilassa ei saa olla testauksen kuulumatonta irtaimistoa tai henkilöitä RE ja RS-mittausten aikana.
Kappale 4.3.10.3	Emissiomittauksissa on määritelty viiveaika taaajuusalueille. Lisäyksen myötä esimerkiksi kello- taajuuksista aiheutuvat emissiot ovat helpommin havaittavissa mittauksissa.
Kappale 4.3.11	Passiivilaitteiden (antennit, virtakoettimet, LISN) kalibrointi täytyy suorittaa vain laitteiston käyttöönoton yhteydessä tai passiivilaitteen korjaustöiden yhteydessä.
Kuvio 2, 3, 4 ja 5	Testattavat laitteet eivät enää ole lattialla testauksen aikana.
Kappale 5.18.1	RE102-mittauksen ylärajataajuus kaikille alustoille on 18 GHz.

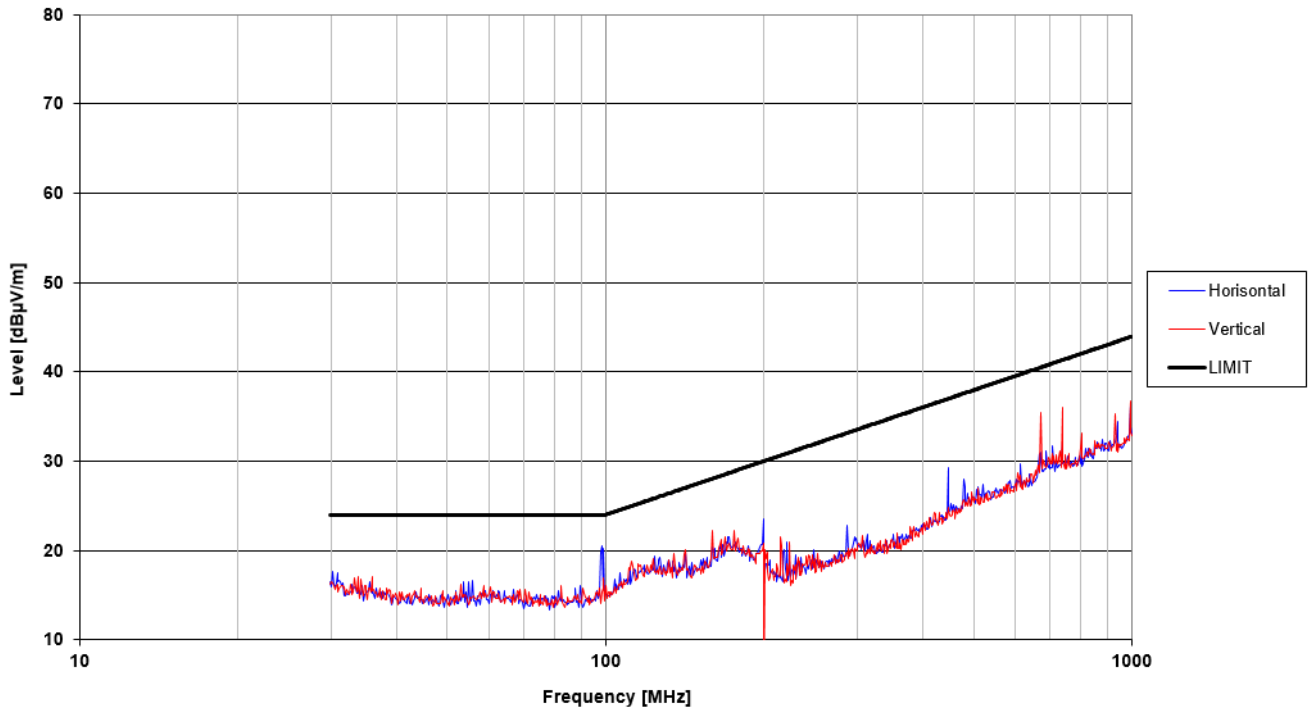
Kappale 5.21.1	RS103- mittaus on nyt pakollinen maavoimille suunnatuille laitteille ja järjestelmille. Mittauksen taajuusalue on 2 MHz-18 GHz, ellei sopimuksessa ole toisin määritelty.
----------------	---

6 TULOKSET JA YHTEENVETO

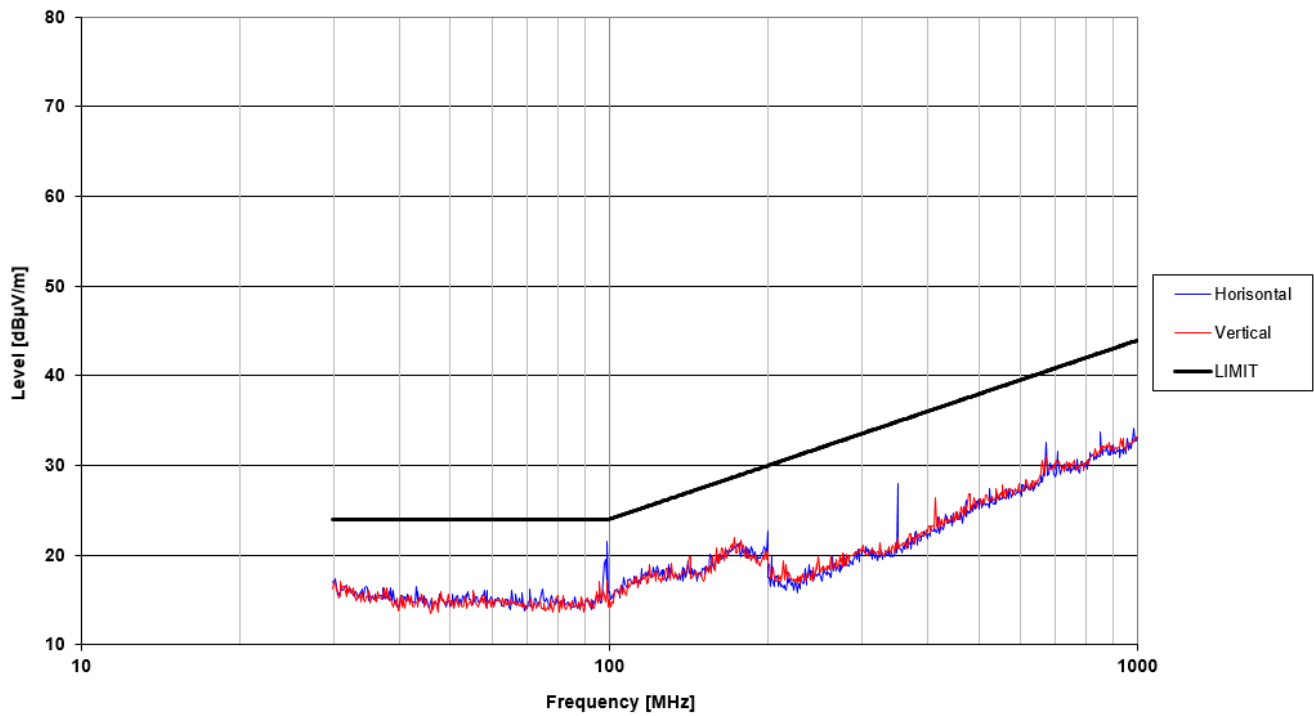
MIL-STD 461 mukaisten mittausten suorittaminen Patrian omassa EMC-kammiossa on otettu huomioon standardin G-revision julkaisemisen jälkeen niiltä osin, kun sitä voitiin soveltaa. Asiakas on usein läsnä ajoneuvokohtaisten EMC-mittausten verifiointissa ja tällöin mittaukset täytyy suorittaa valtuutetussa testauslaboratoriossa ja standardien noudattaminen siirtyy laboratoriolle. Suuri osa G-revision muutoksista kohdistuu mittauksiin ja mittausten verifiointiin, jotka eivät sovellu tässä opinnäytetyössä käsiteltyyn Patrian ajoneuvoon.

Opinnäytetyön myötä ajajan näytön suojaukseen suunniteltiin ja toteutettiin kaksi erilaista ratkaisua, joiden soveltuvuus MIL-STD 461-G standardia vastaan todettiin näytön emissioiden vaimentumisena. Mittaustulokset (KUVA 18) ja (KUVA 19). Ajajan näytön säteilevän siedon suojausvaimennuskyvyn todentaminen suoritetaan testauslaboratoriossa, kun Patrian ja testauslaboratorion aikataulut kohtaavat. Ajajan näytön valmistajalle saatiin luotua tapaamisen myötä kuva Patrian tavoitteesta saada ajajan näyttö MIL-STD 461-G yhteensopivaksi, jonka myötä valmistaja aloitti yrityksen sisäisen selvityksen näytön sähkömagneettisen yhteensopivuuden parantamiseksi.

Pyyhinjärjestelmän moottorin MIL-STD 461-G option suunnittelu osoittautui haastavaksi eri valmistajien moottorien toimitusvaikeuksien ja -aikojen takia. Opinnäytetyön aikana avattiin keskustelu pyyhinjärjestelmän valmistajan sekä moottorivalmistaja Intecon välillä hiiliharjallisen moottorin korvaamisesta harjattomalla moottorilla sekä MIL-STD 461-G yhteensopivan moottorin toimittamisesta pyyhinjärjestelmän valmistajalle tai suoraan Patrialle.



KUVA 18. RE102 mittau tulokset, näytön suojaus, konfiguraatio 1



KUVA 19. RE102 mittau tulokset, näytön suojaus, konfiguraatio 2

LÄHTEET

ASETUS (EY) N:o 661/2009. 2009. Moottoriajoneuvojen, niiden perävaunujen sekä niihin tarkoitettujen järjestelmien, osien ja erillisten teknisten yksiköiden yleiseen turvallisuuteen liittyvistä tyyppihyväksyntävaatimuksista. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1558552122738&uri=CELEX:32009R0661>. Viitattu 22.5.2019

Direktiivi 2007/46/EC. 2007. Puitteiden luomisesta moottoriajoneuvojen ja niiden perävaunujen sekä tällaisiin ajoneuvoihin tarkoitettujen järjestelmien, osien ja erillisten teknisten yksiköiden hyväksymiselle. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007L0046&from=FI>. Viitattu 22.5.2019

Direktiivi 2014/30/EU. 2014. Sähkömagneettista yhteensopivuutta koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön yhdenmukaistamisesta. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=celex%3A32014L0030>. Viitattu 20.4.2019.

Eurofarad tuotekuvasto 926. Pariisi.

Komponenttivalmistajan opas. 2010. EMI Filter Hints and Tip. Saatavissa: http://www.mouser.cn/pdfDocs/Syfer_EMI_FilterHintsTips.pdf. Viitattu 22.5.2019

Richardt, M. 2016. SGS Finland Asiakaslehti.

Räisänen, A. & Lehto, A. 2003. Radiotekniikan perusteet. 11., uudistettu painos. Helsinki: Otatieto.

Standardi MIL-STD 461-G. 2015. Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. Saatavissa: http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0300-0499/MIL-STD-461_8678/. Viitattu 23.4.2019.

Sääntö (UN/ECE) sääntö nro 10. 2012. Yhdenmukaiset vaatimukset, jotka koskevat ajoneuvojen hyväksyntää sähkömagneettisen yhteensopivuuden osalta. Saatavissa: <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29fdocstts.html>. Viitattu 22.5.2019

Williams, T. 2007. EMC for Product Designers. Neljäs painos. Oxford: Elsevier.

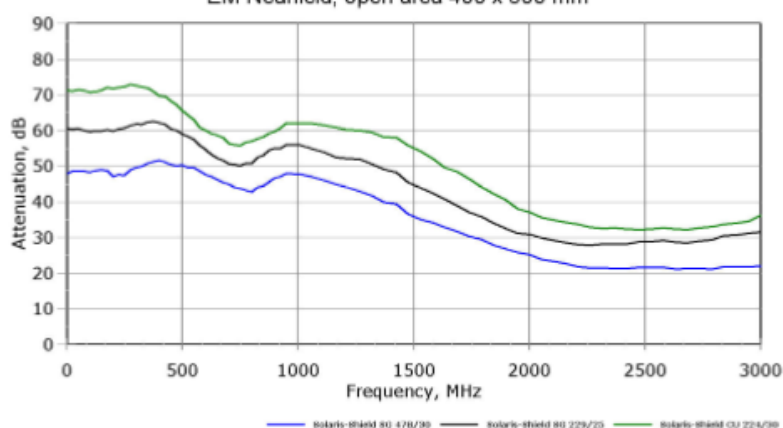
Zurek, S. 2011. Encyclopedia Magnetica. Saatavissa: http://www.encyclopedia-magnetica.com/doku.php/file/skin_depth_magnetica.png. Viitattu 8.5.2019.

Solaris-Shield™

Electromagnetic Shielding Properties

Performance characteristics

EM Nearfield, open area 400 x 300 mm



Material:

Sheet cast PMMA with EMI-Shielding metal mesh embedded into one single layer.

Sheet size:

1500 x 1000 mm
Thickness: 1.5 - 4.0 mm
Special thicknesses upon request.

Mesh types:

Standard:
Stainless Steel SG 229/25,
100 OPI, Ø 0.025 mm
Single-sided blackened

Copper CU 224/30,
100 OPI, Ø 0.030 mm
Double-sided blackened

Special:

Other mesh types and double-sided blackened St. Steel Mesh upon request.

Optical Properties

Material / Mesh type	Total transmittance
Solaris-Shield™ SG 229/25	75%
Solaris-Shield™ SG 478/30	81%
Solaris-Shield™ CU 224/30	72%

Mesh orientation

Windows can be cut in all angles between 0 to 90°
Typical 30 to 45° in order to avoid Moiré.

Mechanical processing:

Sawing, CNC milling and laser cutting into desired size and shape, optimized for application-specific needs

Termination:

Conductive Silver- or Nickel Busbar, creating direct contact from mesh wire ends to termination / ground plane.

Surface treatment

Fine Mat and Hard Mat surface treatments can be applied to Solaris-Shield™

Colour:

Standard: Clear (S000)
Special: Solaris-Shield™ can be produced in most Solaris™, Solaris™ VFD and Solaris™ IR colours upon request

Mesh position:

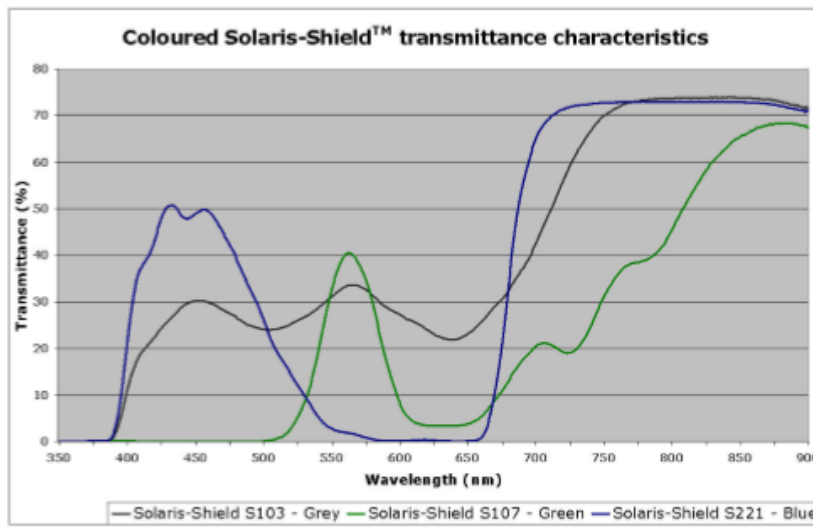
Standard: Close to rear surface. Mesh can be positioned close to the front surface too, in order to fulfill application-specific needs.

Mechanical Properties (PMMA)

Parameter (selected)	Test	Values
Tensile strength (rupture)	DIN 53455	76 MPa
Elongation at rupture	DIN 53455	6 %
Flexural strength (rupture)	DIN 53452	130 MPa
Specific heat	-	1.32 J/g °C
Heat stability □Vicat (3 mm)	DIN 53460	110 °C
Linear thermal exp. coefficient	VDE 0304	0.08 mm/m °C ⁻¹
Thermal conductivity	-	0.17 W/m K
Refractive index	-	1.49
Fire behavior	UL94	HB

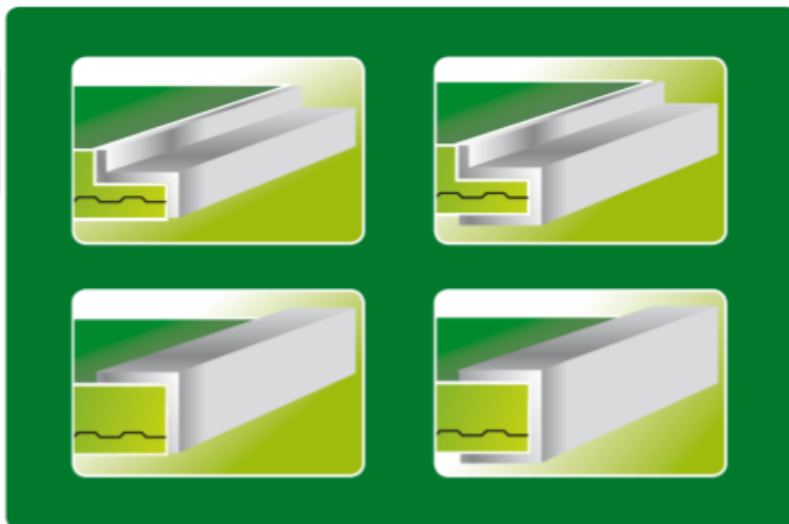
Solaris-Shield™

Colour options □ examples



Colour:
 Standard: Clear (S000)
 Special: Solaris-Shield™ can be produced in most Solaris™, Solaris™ VFD and Solaris™ IR colours upon request.

Busbar / Termination examples



Termination:
 Conductive Silver- or Nickel Busbar, creating direct contact from mesh wire ends to termination / ground plane.



EmiClare Sigma

EmiClare is a range of EMI shielded windows designed by Optical filters for optimum optical performance without sacrificing EMI shielding performance.

Sigma is the standard EmiClare polycarbonate window which offers a cost effective solution with short delivery times.

Product format

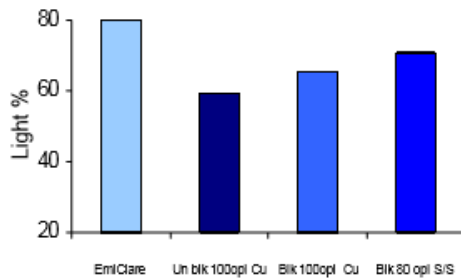
EmiClare Sigma is a fully laminated polycarbonate window with EmiClare EMI shielding. Manufactured in large sheets, EmiClare Sigma is available in a range of standard thicknesses. The front surface is either a non-glare or clear hard coating and the rear surface is clear hard coated. It is available in sheets or as finished parts terminated with a silver busbar

Substrate Properties

- Optical grade polycarbonate.
- High impact resistance.
- UL94 HB flammability rating.
- High clarity non-glare or hard coated clear gloss front surface finish.
- Hard coated clear gloss rear surface.
- Chemical resistance to DIN 42 115.
- 3H pencil hardness scratch resistance.

Optical properties

EmiClare mesh provides higher brightness of image.



Actual light transmissions of the fully laminated window at 500-550nm are:

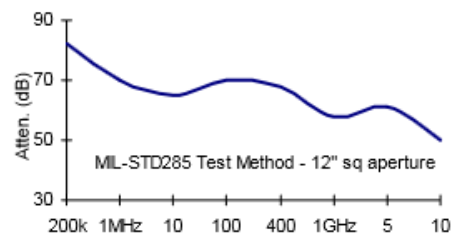
- 65-68% Non glare front surface finish.
- 66-70% Clear gloss finish both sides.

Quality

EmiClare Sigma windows are manufactured in Optical filters ISO9001 approved facility and inspected to the Optical Inspection Standard OIS/4.

Shielding effectiveness

This graph is a guide to the typical shielding effectiveness of EmiClare mesh.



Termination

EmiClare Sigma windows are CNC machined to size with either a stepped or square edge profile. A silver painted busbar is used to terminate the mesh in a 'L' or 'C' shape cross-section, this has 5-10db reduction in shielding compared with direct contact to the mesh. Windows can be supplied with additional conductive gaskets, environmental seals and tapes.

Please refer to *EmiClare Sigma Technical Guide* for details on steps and busbar widths.

Product Range

Sheet Size:

- 500 x 660mm (nominal usable area).

Standard Thickness :

- 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 and 4mm (+/-0.2mm)

Please refer to *EmiClare Sigma XL* for large panel products .

Finish:

- Non-glare or clear gloss hard coating.
- # *EmiClare Ultra* are custom built windows using *EmiClare* mesh, available in glass or polycarbonate with options including extended mesh and sunlight readability filter.

Service

- Sheets ex-stock
- Finished window lead times from 5-10 working days.

File Ref: Issue: 7 - August 2006

Optical Filters Ltd. Unit 13-14 Thame Park Business Centre, Thame, Oxfordshire, OX9 3XA England
Telephone: +44 (0) 1844 260 377 Fax: +44 (0) 1844 260 355 - VAT no. GB 537 3354 41 Company registered in
England no. 2289077

www.opticalfilters.co.uk

Oriented Wires in Silicone **S-Range**



P & P Technology SP, SS, SR, SW & SF ranges of gasket materials consist of Monel, aluminium or phosphor bronze wires embedded into solid silicone, sponge silicone or fluorosilicone with a flame retardant variant also being available.

The material can be supplied in strip form or as a complete gasket with options for self-adhesive tape, compression stops & limit collars.

Carrier

SP	Solid Silicone Elastomer (grey) to ZZ-R-765 2b 40
SS	Sponge Silicone (grey) to AMS3195
SR	Solid Silicone Fire Retardant (Black) to ZZ-R-765
SG	Sponge Silicone Fire Retardant (black) to AMS3195
SF*	Fluorosilicone (blue) to Mil-R-25988 Gr5
SE	Solid Silicone with Fluorosilicone Edge

Wire

Monel	0.11mm diameter to QQ-N-281
Aluminium	0.12mm diameter Alloy 5056
Phosphor Bronze	0.114mm diameter Cu Sn 6%

Physical Properties

Elastomer Hardness	Solid Carrier 35±5 Shore Micro
Compression	20% maximum recommended
Wire Count	140±15% per cm ²
Temperature Range	-65°C to +200°C

Pressure Sensitive Adhesive

Thickness	0.07mm
Release Liner	White silicone coated paper
Adhesive Type	Modified acrylic
Adhesion - Initial	13N / 25mm
Adhesion - Aged	31N / 25mm
Temperature Range	-30°C to +130°C

Shielding Effectiveness (dB) - in accordance with Mil Std 285 compression between 12-15%.

Frequency	Attenuation	Field
10KHz	55	H
100KHz	83	H
1MHz	>102	H
10kHz	>121	E
1MHz	>141	E
10MHz	>120	E
100MHz	>140	E
400MHz	>102	P
1GHz	95	P
10GHz	60	P

Storage

Non Adhesive version 10 years
Adhesive version 1 year

* The SF version is recommended where the gasket may be in contact with mineral oils, etc.

* The Monel version meets salt spray Test to ASTM B117-03



P & P Technology Ltd
1-3 Finch Drive, Springwood Industrial Estate
Braintree, Essex, CM7 2SF, UK
Tel: +44 (0) 1376 550525 Fax: +44 (0) 01376 552389
Email: info@p-p-l.co.uk Web: www.p-p-l.co.uk

