Tampereen yliopisto

Valtteri Kassinen

SÄHKÖMAGNEETTINEN YHTEENSOPIVUUS TÄYSSÄHKÖAJONEUVOISSA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Kesäkuu 2024

TIIVISTELMÄ

Valtteri Kassinen: Sähkömagneettinen yhteensopivuus täyssähköajoneuvoissa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaatinohjelma, sähkötekniikka
Kesäkuu 2024

Täyssähköajoneuvojen yleistyminen viimeisen vuosikymmenen aikana on tehnyt sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta (EMC) olennaisen osan niiden suunnittelua ja toimintavarmuutta. Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan sähkömagneettisten häiriöiden hallintaa ja EMC:n merkitystä täyssähköajoneuvoissa, keskittyen erityisesti niihin asetettuihin standardeihin, suunnitteluun ja testaukseen. Sähkömagneettinen häiriö (EMI) voi aiheuttaa ongelmia ajoneuvojen elektronisten järjestelmien toiminnassa, ja siksi EMC-suunnittelussa keskitytään häiriöiden vähentämiseen ja häiriönsietokyvyn parantamiseen.

Työ alkaa sähkömagneettisen yhteensopivuuden perusteiden esittelyllä. Keskeisiä käsitteitä ovat häiriönsietokyky, päästöt, säteily ja johtuminen. Standardien osalta työssä käsitellään erilaisia kansainvälisiä EMC-standardeja, jotka määrittelevät sähköajoneuvojen suunnittelun ja testauksen vaatimukset. Näiden standardien tarkoituksena on varmistaa, että ajoneuvot eivät aiheuta haitallisia häiriöitä ympäristöönsä ja kestävät ulkoisia häiriöitä. Täyssähköajoneuvojen EMC-suunnittelussa huomio kiinnittyy erityisesti suurjännitteisten komponenttien, kuten akkujen ja moottorinohjausyksiköiden, tuottamiin häiriöihin. Suunnitteluratkaisut, kuten maadoitus, suojaukset ja johtimien sijoittelu, ovat keskeisiä häiriöiden vähentämisessä. Lisäksi tietokonesimulaatiot ja -mallinnukset ovat tärkeitä häiriöiden vaikutusten tutkimisessa.

Työssä esitellään myös kattavasti sähköajoneuvojen EMC-testauksen menetelmiä. Päästötestit ja häiriönsietokykytestit ovat olennainen osa EMC-testausta, joilla varmistetaan, että ajoneuvot täyttävät standardien vaatimukset ja toimivat luotettavasti ympäristössään. Latausinfrastruktuuri on myös keskeinen osa sähköajoneuvojen EMC:tä. Lataaminen voi tapahtua joko kaapelilla johtumalla tai langattomasti induktiivisesti. Molemmissa menetelmissä on omat EMC-haasteensa, kuten suurjännitteisten kenttien aiheuttamat häiriöt ja niiden hallinta. Sähköajoneuvojen latausjärjestelmässä syntyvä sähkömagneettinen häiriö johtuu sekä järjestelmän sisäisistä että ulkopuolisista häiriölähteistä. Langattoman latauksen aikana syntyy suuria magneettikenttiä, mikä aiheuttaa haasteita sähkömagneettisen yhteensopivuuden suhteen.

Sähkömagneettisten kenttien hallinta ja asianmukaisten suojatoimien käyttö ovat ratkaisevan tärkeitä häiriöiden minimoimiseksi. Täyssähköajoneuvojen EMC-suunnittelussa on tärkeää hallita häiriöiden lähteitä, kuten invertereitä ja ohjausyksiköitä, ja soveltaa kattavia testausprotokollia. Myös häiriönsietokyky on tärkeä osa täyssähköajoneuvoja EMC:tä. Se tarkoittaa ajoneuvon kykyä kestää ulkoisia sähkömagneettisia häiriöitä. Täyssähköajoneuvojen suunnittelussa tämä tarkoittaa esimerkiksi suojaratkaisujen ja komponenttien sijoittelun optimointia niin, että ajoneuvo kestää sekä omista että ulkoisista lähteistä tulevat häiriöt.

Avainsanat: sähkömagneettinen yhteensopivuus, sähkömagneettinen häiriö, standardit, testaus, täyssähköajoneuvo

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1.JOHDANTO 1
2.SÄHKÖMAGNEETTINEN YHTEENSOPIVUUS 3
2.1 Häiriönsietokyky 4
2.2 Sähkömagneettiset päästöt 4
2.3 Säteily 5
2.4 Johtuminen 7
2.5 Sähkömagneettinen häiriö 9
3.SÄHKÖMAGNEETTISEN YHTEENSOPIVUUDEN STANDARDIT 11
3.1 Standardityypit 12
3.2 Standardit sähköajoneuvoissa 13
4.EMC TÄYSSÄHKÖAJONEUVOISSA 15
4.1 Suunnittelu 15
4.2 Testaus 17
4.2.1 Päästötestit 17
4.2.2 Häiriönsietokykytestit 18
5.TÄYSSÄHKÖAJONEUVOJEN LATAUS MENETELMÄT 20
5.1 Lataus johtumalla 20
5.2 Induktiivinen lataus 22
6.YHTEENVETO 24
LÄHTEET 26

LYHENTEET JA MERKINNÄT

EMC engl. Electromagnetic Compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus

EMI engl. Electromagnetic Interference, sähkömagneettinen häiriö

ESD engl. Electrostatic Discharge, sähköstaattinen purkaus

EMP engl. Electromagnetic Pulse, sähkömagneettinen pulssi

CE engl. Conducted Emission, johtuva päästö

RE engl. Radiated Emission, säteilty päästö

PCB engl. Printed Circuit Board, painettu piirilevy

EU engl. European Union, Euroopan unioni

REES engl. Rechargeable Energy Storage System, ladattava energian varastointi järjestelmä

ISN engl. Impedance Stabilization Network, impedanssistabilointiverkko

AN engl. Artificial Network, keinotekoinen verkko

CDN engl. Coupling/Decoupling Network, kytkentä erotteluyksikkö

PWM engl. Pulse Width Modulation, pulssinleveysmodulaatio

WPT engl. Wireless Power Transfer, langaton tehonsiirto

EMF engl. Electromagnetic Field, sähkömagneettinen kenttä

1. JOHDANTO

Sähköajoneuvojen käyttöönotto on viime vuosikymmeninä kasvanut merkittävästi ympäristöystävällisenä vaihtoehtona perinteisille polttomoottoriajoneuvoille. Tämä kasvava trendi on johtanut tarpeeseen kehittää uusia tekniikoita ja standardeja sähköajoneuvojen suunnittelussa ja valmistuksessa, jotta niiden suorituskyky, turvallisuus ja toimintavarmuus voidaan varmistaa. Yksi keskeisistä haasteista tässä kehityksessä on sähkömagneettinen yhteensopivuus (EMC), joka vaikuttaa suoraan ajoneuvojen sähköjärjestelmien toimintaan ja turvallisuuteen.

Sähkömagneettinen yhteensopivuus on erityisen tärkeää sähköajoneuvoissa, joissa korkeajännitteiset sähkökomponentit, kuten akut ja moottorinohjausyksiköt, voivat tuottaa merkittäviä häiriöitä, jotka vaikuttavat niin ajoneuvon sisäisiin järjestelmiin kuin ympäröiviin laitteisiinkin. Tämän takia EMC:n huomioiminen ajoneuvojen suunnittelussa ja testauksessa on kriittisen tärkeää.

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on tutkia sähkömagneettisen yhteensopivuuden merkitystä täyssähköajoneuvoissa sekä tutkia menetelmiä ja ratkaisuja EMC:n parantamiseksi. EMC:n hallinta on tärkeää, koska se vaikuttaa suoraan ajoneuvojen elektronisten järjestelmien häiriöttömään toimintaan sekä vähentää häiriöiden mahdollisuutta ulkoisista sähkömagneettisista lähteistä, kuten radiotaajuisesta säteilystä tai sähköverkoista. Toisaalta halutaan myös olla varmoja, että täyssähköajoneuvot eivät aiheuta häiriöitä ympäristöönsä.

Tässä kandidaatintyössä käsitellään sähköajoneuvojen sähkömagneettisen yhteensopivuuden laaja-alaisia aiheita, jotka ovat olennaisia niiden suunnittelussa, testauksessa ja toiminnassa. Työ aloitetaan perusteellisella katsauksella EMC:n peruskäsitteisiin ja sen merkitykseen ajoneuvojen sähköisten järjestelmien luotettavuudessa. Tämän jälkeen työssä esitellään EMC-standardeja, sekä käydään läpi tarkemmin mitkä standardit koskevat täyssähköajoneuvoja. Lisäksi työssä tutkitaan häiriöiden hallintaa sähköajoneuvojen suunnittelussa ja esitetään ratkaisuja häiriöiden minimoimiseksi. Erityistä huomiota kiinnitetään myös sähköajoneuvojen latausjärjestelmien EMC-haasteisiin, mukaan lukien langaton lataus ja sen vaikutukset ajoneuvojen sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen. Koko työn tavoitteena on paitsi

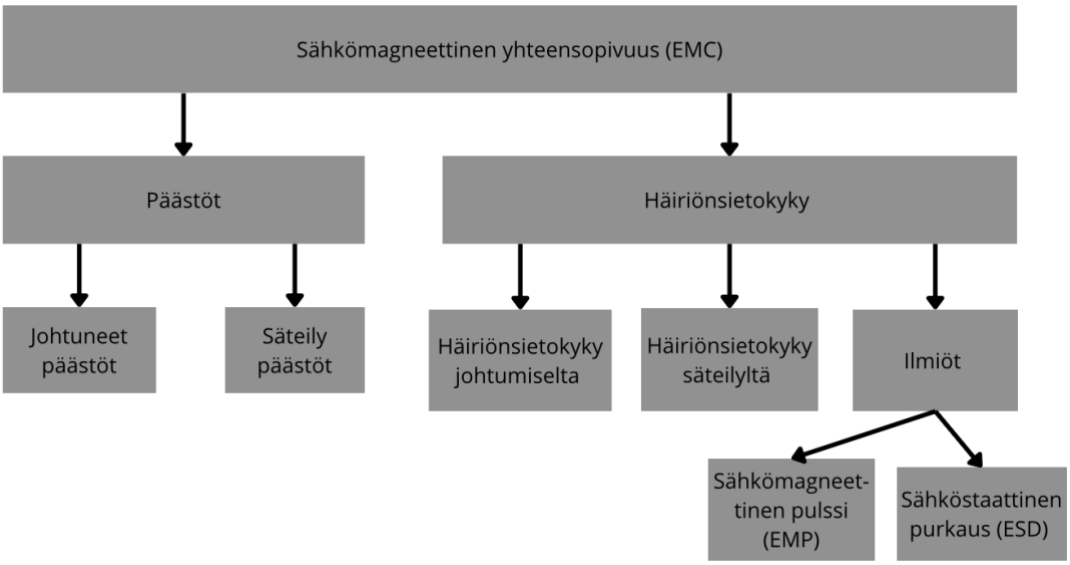
syventää ymmärrystä sähköajoneuvojen EMC-ongelmista, myös esitellä käytännöllisiä suunnittelumenetelmiä ja testausprotokollia, jotka edistävät turvallisemman ja häiriöttömämmän sähköajoneuvoteknologian kehittämistä.

2. SÄHKÖMAGNEETTINEN YHTEENSOPIVUUS

Sähkömagneettinen yhteensopivuus eli EMC tarkoittaa laitteen tai järjestelmän kykyä toimia tyydyttävästi sen sähkömagneettisessa ympäristössä [1]. Toisin sanoen jokaisen laitteen on omattava häiriönsietokyky sähkömagneettisille häiriöille, ja toisaalta jokaisen laitteen on pidettävä omat sähkömagneettiset päästöt tarpeeksi alhaisina, jotta se ei häiritse muita laitteita ympäristössään. Kaikki sähköiset laitteet tuottavat ja ovat alttiita sähkömagneettiselle häiriölle eli EMI:lle.

Monet laitevalmistajat ovat tehneet havainnon, että tuotteen heikko EMC-suorituskyky voi olla äärimmäisen kallis, sekä maineen vahingoittumisen että suorituskyvyn parantamiseksi tarvittavien toimenpiteiden kannalta, kun vika on havaittu. Tämän vuoksi monet yritykset testaavat tuotteensa EMC:n osalta ennen niiden julkaisemista, vaikka kyseisen laitetyypin kohdalla ei olisikaan sovellettavaa standardia [3].

EMC voidaan jakaa kuvan 1 mukaisesti sen aiheuttamaan johtuvaan ja säteilevään sähkömagneettisiin päästöihin sekä sen kykyyn vastustaa niitä. EMI tarkoittaa sähkömagneettista häiriötä. Erona EMC ja EMI välillä on, että EMI viittaa häiriöihin, kun taas EMC viittaa siihen, että laitteet ovat yhteensopivia ja toimivat hyvin samassa sähkömagneettisessa ympäristössä. Kuvan 1 laatikko ilmiöt viittaavat yksittäisiin ilmiöihin, jotka aiheuttavat sähkömagneettista häiriötä. Näitä ovat sähköstaattinen purkaus eli ESD ja sähkömagneettinen pulssi eli EMP. Seuraavissa luvuissa käsitellään päästöt ja häiriönsietokyky sekä säteily ja johtuminen yleisesti. [2]



Kuva 1. EMC alakategoriat [2].

2.1 Häiriönsietokyky

Laitteiden toimintaan vaikuttava sähkömagneettinen ympäristö voi vaihdella laajasti ja määrittää tarvittavan häiriönsietokyvyn tason, samoin kuin luotettavan toiminnan määritelmän. Esimerkiksi havaittujen säteilykenttien suuruus riippuu kriittisesti etäisyydestä lähteestä. Voimakkaita RF-kenttiä esiintyy tutkien, lähetyslähettimien ja RF-lämmityslaitteiden läheisyydessä. Sähkökentän voimakkuus putoaa lähetysantennin etäisyyden mukaan edellyttäen, että mittauspiste on kaukokentässä. Kentänvoimakkuuden arvo voltteina metriä kohti voidaan laskea [3]

$$E = \sqrt{\frac{30 \cdot P}{d}}\ , \tag{1}$$

jossa P on antennin säteilyteho watteina ja d on etäisyys antennista metreinä.

2.2 Sähkömagneettiset päästöt

Häiriönsietokykyyn verrattuna laitteiden päästöt ovat suhteellisen helppoja luonnehtia. Suurin osa elektroniikkalaitteiden päästöistä johtuu joko kytkennöistä tai muista sähkömekaanisista toiminnoista tai digitaalisesta kellosta tai dataan liittyvistä signaaleista. Ensin mainitut voivat olla pulsseja verkkotaajuudella, kuten tyristorin vaiheohjaimista, moottorin kommutaattorin kohinasta, yksittäisistä kytkentä "napsahduksista" tai kytkentätilan teholähteen harmonisista, ja ne johdetaan yleensä ulos laitteesta verkkojohdon kautta. Näitä päästöjä on säännelty useiden vuosien ajan esimerkiksi AM-lähetys- ja viestintäpalvelujen häiriöiden minimoimiseksi [3].

Päästöt on jaettu johtuviin päästöihin CE ja säteileviin päästöihin RE. Johtuvat päästöt mitataan kaapeleista, jotka on kytketty testattavaan laitteeseen. Säteilypäästöt estävät lähellä olevien sähkö- ja sähkömekaanisten laitteiden toimintaa. Säteilypäästöt mitataan kaiuttomassa tai puolikaiuttomassa kammiossa tai avoimella alueella, koska ne tarjoavat kontrolloidun ja häiriöttömän ympäristön, joka on välttämätön tarkkojen, toistettavien ja säädösten mukaisten EMC-säteilypäästömittausten suorittamiseksi. Kaupallisten ja

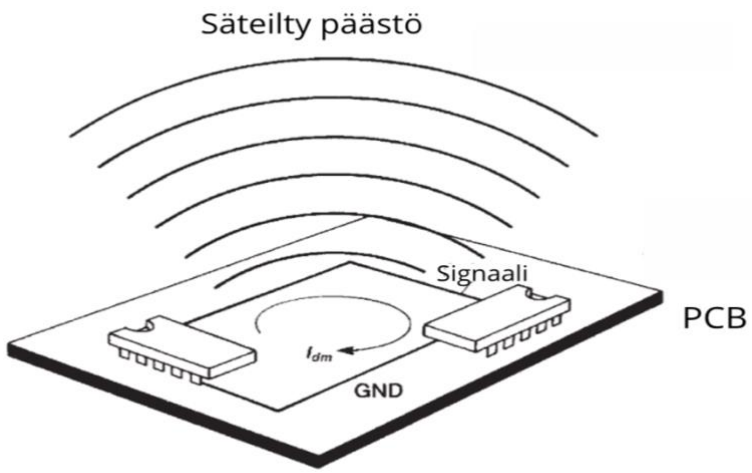
teollisuustuotteiden osalta säteilypäästömittausten taajuusalue on 30 MHz:stä 6 GHz:iin tai 30 MHz:stä 40 GHz:iin [2].

2.3 Säteily

Sähkömagneettista säteilyä digitaalisista elektroniikkalaitteista voi esiintyä joko differentiaalimoodissa tai yhteismoodissa. Differentiaalimoodin säteily johtuu piirin normaalista toiminnasta ja johtuu virran kiertämisestä silmukoissa, jotka muodostuvat piirin johtimista, kuten kuvassa 2 näkyy. Nämä silmukat toimivat pieninä silmukka-antenneina, jotka säteilevät pääasiassa magneettikenttiä. Pienen silmukka-antennin vapaata tilaa vastaava säteilykuvio on torus kuten kuvassa 3. Vaikka nämä piirinsilmukat ovat välttämättömiä piirin toiminnalle, niiden koko ja alue on hallittava suunnitteluprosessin aikana säteilyn minimoimiseksi. Differentiaalimoodin säteily voidaan esittää pienen antennin säteilynä [4]

$$E = 131{,}6 * 10^{-16}(f^2 AI)\left(\frac{1}{r}\right)\sin(\theta)\,, \tag{2}$$

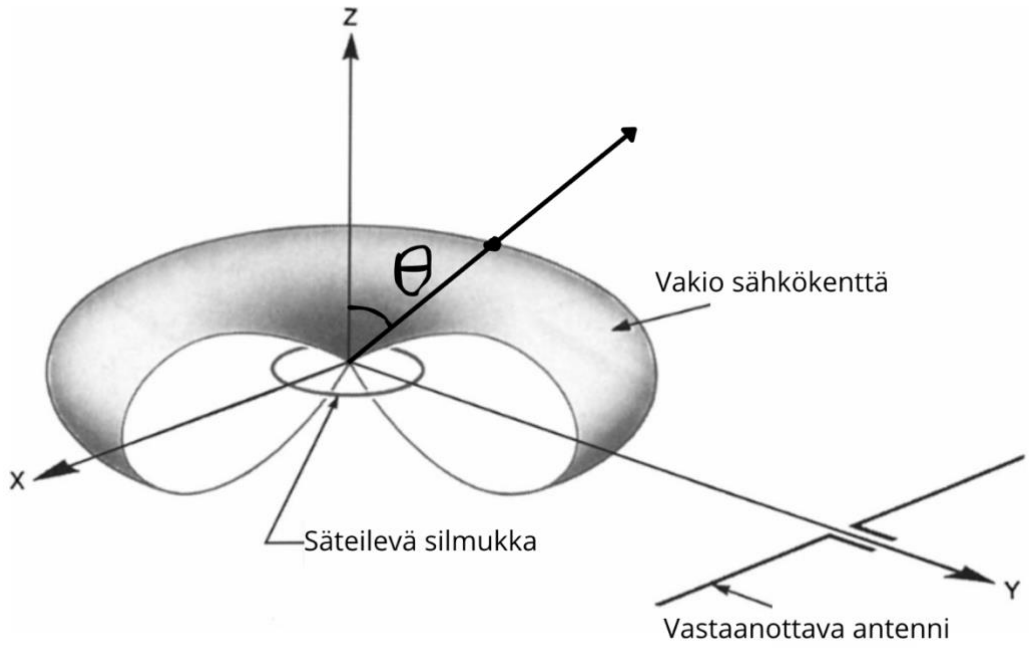
jossa E on sähkökentän suuruus V/m, f on taajuus herzeinä, A on silmukan pinta-ala neliömetreinä, I on sen virta ampeereina, r on etäisyys metreinä ja θ on havaintopisteen ja virtasilmukan tasoa kohtisuoran välisen kulman kuten kuvassa 3 näkyy.



Kuva 2. PCB-säteily [4].

Yhtälön 2 ensimmäinen termi on vakio, joka huomioi väliaineen ominaisuudet, tässä tapauksessa vapaan. Toinen termi määrittelee säteilylähteen ominaisuudet, joka on silmukka. Kolmas termi edustaa kentän heikkenemistä, kun se etenee pois lähteestä. Viimeinen termi kulman poikkeamaa huomioi mittauspisteen kulmaa suhteessa silmukan tasoon nähden kohtisuoraan suuntaan z-akselista kuten kuvassa 3. [4]

Yhtälö 2 koskee pientä silmukkaa vapaassa tilassa, ilman lähistöllä olevia heijastavia pintoja. Useimmat säteilyä koskevat EMC-mittaukset tehdään kuitenkin avoimella alueella, maatason yläpuolella, ei vapaassa tilassa. Maataso tarjoaa heijastavan pinnan, joka on huomioitava. Heijastava maataso voi lisätä mitattua säteilyä jopa 6 dB. Difrentiaalimoodin säteilyyn voi vaikuttaa pienentämällä virtaa, virran taajuutta tai silmukan kokoa. [4]



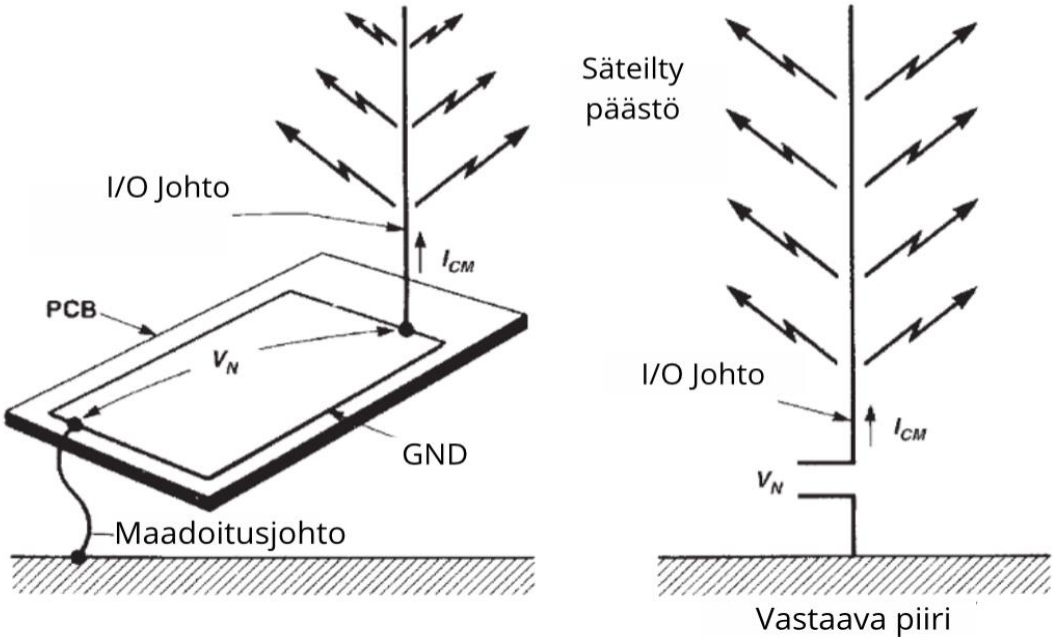
Kuva 3: Vapaan tilan säteilykuvio pienelle silmukka antennille [4].

Yhteismoodissa tapahtuva säteily on kuitenkin seurausta piirissä olevista parasiittisista ominaisuuksista ja johtuu muun muassa ei-toivotuista jännitepudotuksista johtimissa. Differentiaalimoodissa oleva virta, joka virtaa maaimpedanssin läpi, aiheuttaa jännitepudotuksen digitaalisen logiikan maajärjestelmässä. Kun kaapelit sitten kytketään järjestelmään, ne ohjataan tähän yhteismoodin maajännitepotentiaaliin, muodostaen antennin, joka säteilee kuten kuvassa 4 näkyy. Koska näitä parasiittisia impedansseja ei ole tarkoituksella suunniteltu järjestelmään eikä niitä ole esitetty dokumentaatiossa, yhteismoodissa tapahtuva säteily on usein vaikeampi ymmärtää ja hallita.

Yleismuotoinen säteily voidaan mallintaa dipoli- tai monopoliantennina, jota ohjaa maajännite. Lyhyen dipoliantennin, jonka pituus on l, mitatun sähkökentän voimakkuuden suuruus kaukokentässä etäisyydellä r lähteestä on [4]

$$E = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}(fl\mathrm{I}) \cdot \sin(\theta)}{r}, \tag{3}$$

jossa E on V/m, f on Herzeissä, I on virta antennissa, l ja r on metreinä ja θ on kulma antennin akseliin nähden, jossa havainto tehdään, kuten kuvassa 3 näkyy. Myös säteilykuvio on samanlainen. Maksimiarvo saavutetaan kun $\theta = 90$ [4].



Kuva 4. Yhteismoodi säteilyssä muodostuu antenni, josta aiheutuu säteilyä [4].

Yhtälö 3 pätee ideaaliseen dipoliantenniin, jossa virta jakautuu tasaisesti. Todellisessa dipoliantennissa virta pienenee nollaan johtimen avoimissa päissä. Pienessä antennissa virta jakautuu lineaarisesti koko antennin pituudelle, minkä vuoksi antennin keskimääräinen virta on vain puolet maksimivirrasta. Yhteismoodin virtaan voidaan vaikuttaa pienentämällä virtaa, sen taajuutta tai antennin pituutta. [4]

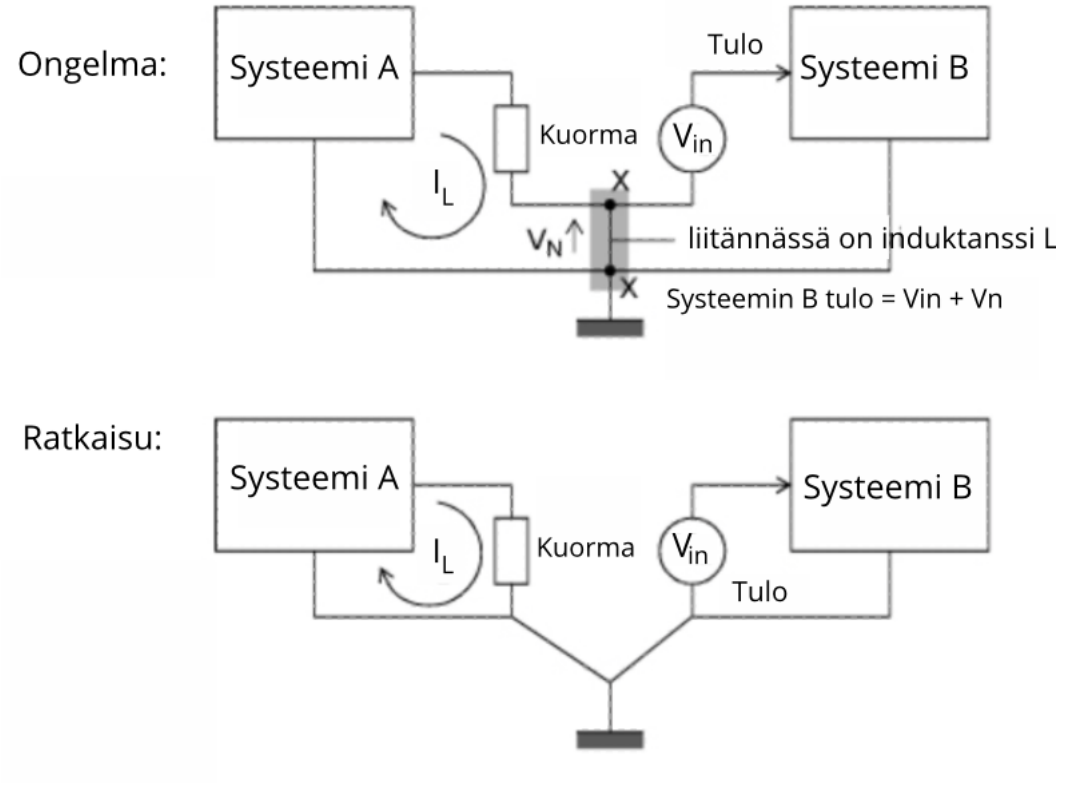
2.4 Johtuminen

Johtuva häiriönsietokyky ja päästöt viittaavat häiriöihin, jotka tapahtuvat johtumalla. Johtuneet päästöt ovat laitteen alaisuudessa syntyviä kohinavirtauksia, jotka leviävät

virtajohdon tai kaapelisarjan kautta muihin järjestelmiin tai sähköverkkoon [13]. Esimerkiksi häiriölähteellä ja toisella systeemillä on sama maa, kuten kuvassa 5. Systeemin A ulostulon virta, joka kulkee yhteisimpedassialueen läpi, aiheuttaa jännitteen sarjassa systeemin B sisääntulon kanssa. Alueen yli muodostuva jännite saadaan kaavalla [6]

$$V_n = -L\,\frac{di}{dt}, \tag{4}$$

jossa L on induktanssi henreinä. Sisäänmeno ja ulostulo voivat olla osa samaa järjestelmää, jolloin on olemassa epätoivottu paluutereitti yhteisen impedanssin kautta, mikä voi aiheuttaa sähköistä värähtelyä. [6]

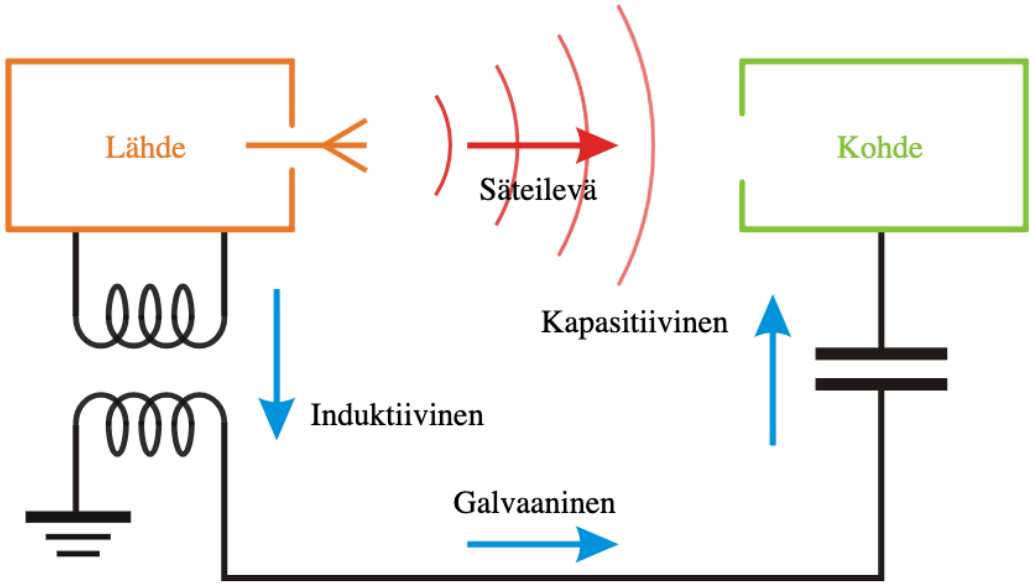


kuva 5: Yhteinen impedanssikytkentä [6].

Ratkaisu, kuten on esitetty kuvassa 5, on erottaa yhteydet niin, ettei ole yhteistä virtapolkua eikä siten yhteistä impedanssia kahden piirin välillä. Ainoa haitta tästä on tarve ylimääräisellä johdotuksella, mikä määrittelee erilliset piirit. Tämä pätee mihin tahansa piiriin, joka saattaa sisältää yhteisen impedanssin, kuten virtakiskoyhteydet. Maadoitus on yleisin yhteisen impedanssin lähde, koska maadoitusyhteys, joka usein puuttuu piirikaavioista, otetaan itsestäänselvyytenä. [6]

2.5 Sähkömagneettinen häiriö

Sähkömagneettinen häiriö on ilmiö, joka voi esiintyä, kun elektroninen laite altistuu sähkömagneettiselle kentälle. Mikä tahansa sähköpiirejä sisältämä laite voi olla altis EMI:lle. [5] EMI on jatkuva tutkimusalue, koska uusien teknologioiden ja laitteiden kehittyessä myös niiden alttius sähkömagneettiselle häiriölle voi muuttua.



Kuva 6: Sähkömagneettisen häiriön neljä kytkeytymistyyppiä [24].

Kun käsitellään EMI-kysymyksiä, huomioon otetaan lähde, reitti ja vastaanotin. Kuvassa 6 on esitelty Sähkömagneettisen häiriön neljä kytkeytymistyyppiä. Sähkömagneettinen energia etenee lähteestä jotakin kuvan 6 reittiä pitkin ja häiritsee vastaanottimen toimintaa. Kaikkien kolmen on oltava olemassa, jotta EMI-ongelma voi syntyä. Reitti voi olla johtava, säteilevä, induktiivinen tai kytkeytyä kondensaattorin kanssa tai olla tekemisissä sähköstaattisen purkauksen kanssa, tai se voi olla jonkin näiden yhdistelmä. Siksi EMI:n vaikutusten ymmärtämiseksi on otettava huomioon kaksi tekijää: päästöt ja häiriönsietokyky, mitkä käsiteltiin aiemmin. Kolme yleisintä EMI-ongelmaa ovat radiotaajuiset häiriöt, sähköstaattiset purkaukset ja virtahäiriöt. [5]

Hallitsematon sähköstaattinen purkaus on yksi EMI:n aiheuttaja ja ongelma elektroniikassa. Staattista sähköä voi syntyä monin eri tavoin, mutta yleisin tapa on materiaalien kosketus ja sen jälkeinen erottaminen toisistaan. Kun kaksi eristemateriaalia on kosketuksissa, osa elektroneista siirtyy toisesta materiaalista toiseen. Koska varaus ei liiku hyvin eristeessä, kun kaksi materiaalia erotetaan

toisistaan, tämä varaus ei välttämättä palaa alkuperäiseen materiaaliin. Jos kaksi materiaalia olivat alun perin neutraaleja, ne ovat nyt varautuneita, toinen positiivisesti ja toinen negatiivisesti. Varauksen purkautuminen varatusta johtimesta voidaan saada aikaan tarkoituksellisesti maadoittamalla kohde. Varaus voi purkautua myös kohteesta pois ilman kautta kosteuden vaikutuksesta. Mitä korkeampi kosteus, sitä nopeammin varausta vuotaa pois kohteesta [4].

3. SÄHKÖMAGNEETTISEN YHTEENSOPIVUUDEN STANDARDIT

Lähes jokaisessa maassa markkinoilla olevien sähkölaitteiden tai koneiden on oltava EMC-yhteensopivia, mikä tarkoittaa, että niiden on täytettävä EMC-säädökset ja standardit tuotteiden tarkoitettua käyttöä varten. Mitkä EMC-säädökset ja standardit ovat sovellettavissa mihinkin tuotteeseen, määritellään sen maan mukaan, missä tuote myydään loppuasiakkaalle. [2]

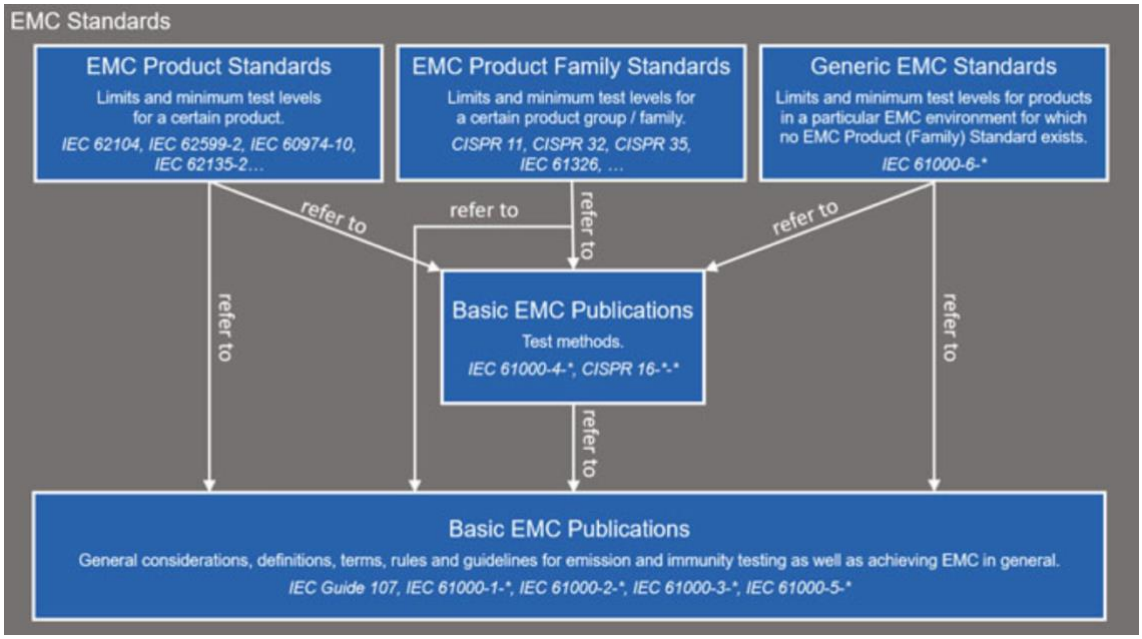
EMC-standardeja kehitetään joko kansainvälisten, kansallisten tai alueellisten organisaatioiden ja komiteoiden toimesta hallinnollisten elinten puolesta, tai hallinnolliset ja/tai sääntelyelimet laativat EMC-standardeja ja määräyksiä itse. Yleensä nimetyt hallinnolliset elimet ottavat käyttöön kansainväliset EMC-standardit, jotka on laadittu IEC, CISPR:n tai ISO:n toimesta. [2] Kansainvälinen sähkötekniikan komissio eli IEC on tärkein organisaatio EMC-standardien kehittämisessä ja CISPR on sen komitea. International Organization for Standardization eli ISO on kansainvälinen standardisoimisjärjestö [2].

Euroopassa EMC-standardeja sovelletaan yleisesti ottaen kansainvälisen standardoinnin periaatteiden mukaisesti. Euroopan unionissa (EU) EMC-direktiivi (2014/30/EU) asettaa vaatimukset sähkölaitteiden sähkömagneettiselle yhteensopivuudelle ja niiden markkinoille saattamiselle EU:ssa [7]. Tämän direktiivin tavoitteena on varmistaa, että sähkölaitteet eivät aiheuta haitallista häiriötä eivätkä ole alttiita ulkoisille häiriöille, kun niitä käytetään tavanomaisessa ympäristössä.

EMC-standardit määrittelevät termejä, sääntöjä ja testausmenetelmiä EMC:lle. Lisäksi ne määrittävät rajat ja vähimmäistestitasot sähköisille ja sähkömagneettisille päästöille ja häiriönsietokyvylle. EMC-standardit auttavat tekemään mittaukset vertailukelpoisiksi ja toistettaviksi määrittelemällä testausmenetelmät, testilaitteiston ja testiympäristön. Ennen kaikkea EMC-standardien tavoitteena on tuoda yhdenmukaisuutta EMC-testaukseen. Standardien globaali yhdenmukaisuus vähentää kaupan esteitä, ja yhteiskunnan kannalta tärkeimpänä seurauksena auttavat lisäämään maailmanlaajuista kaupankäyntiä. [2]

3.1 Standardityypit

EMC standardit ovat jaettu neljään eri luokkaan riippuen mihin niillä viitataan. Luokkia ovat tavalliset EMC-julkaisut, EMC tuote standardit, EMC tuoteperhe standardit ja yleiset EMC standardit [2]. Ne ovat sidoksissa toisiinsa ja viittaavat tavallisiin EMC-julkaisuihin kuten kuvassa 7 näkyy.



kuva 7: EMC standardityypit [2].

Tavalliset EMC-julkaisut (Basic EMC Publications) määrittelevät ehtoja ja määritelmiä EMC-testaukselle. Ne määrittelevät tarvittavat säännöt sähkömagneettisen yhteensopivuuden saavuttamiseksi, määrittävät testausmenetelmät jne. Tavalliset EMC-julkaisut ovat ne EMC-standardit, joihin muut EMC-standardit viittaavat. IEC on jakanut tavalliset EMC-julkaisut vielä yleisiin, ympäristöön, päästöihin, vastustuskykyyn ja asennuksiin. [2]

EMC tuotestandardit kohdistuvat tietyille tuotteille. EMC-tuoteryhmästandardit koskevat tuoteryhmää, jolla on yhteisiä yleisiä ominaisuuksia ja joka saattaa toimia samassa ympäristössä ja olla naapurialoilla käytettäviä. EMC-tuoteryhmästandardit ja -tuotestandardit viittaavat asiaankuuluviin perus-EMC-julkaisuihin (kyseiselle tuotteelle) ja määrittelevät päästöjen ja häiriönsietokyvyn rajat (vähimmäistestitasot). [2]

Yleiset EMC standardit (Generic EMC Standards) taas viittaavat tilanteisiin, missä ei ole määritelty tarkempia EMC-tuotestandardeja. Ne ovat yleisiä ja hieman yksinkertaistettuja

EMC-tuotestandardeja, jotka viittaavat perus-EMC-julkaisuihin yksityiskohtaisia mittaustapoja ja testausmenetelmiä varten. Yleiset EMC-standardit määrittelevät rajat ja vähimmäistestitasot rajatulle määrälle päästö- ja häiriönsietokykytestejä. [2]

3.2 Standardit sähköajoneuvoissa

Ajoneuvoteollisuudelle on määritetty useita kansainvälisiä standardeja. Standardit ovat hyvin pitkälti samat, riippumatta moottorin tyypistä, paria poikkeusta lukuun ottamatta. Eri moottori tyyppejä ovat polttomoottori, sähkömoottori ja hybridimoottori. Ne ovat määritelleet ISO ja IEC. [2] Ajoneuvoteollisuudessa hyödynnetään aiemmin esiteltyä tuoteryhmästandardeja.

IEC on asettunut ajoneuvoteollisuudelle standardit CISPR 12, 25 ja 36. Näistä CISPR 36 koskee sähköajoneuvojen EMC päästöjä tieliikenteessä. CISPR 36:2020 määrittelee rajoitukset 3 metrin mittausetäisyydelle ja mittausmenetelmät, jotka on suunniteltu tarjoamaan suojaa ulkoisille vastaanottimille 10 metrin etäisyydellä taajuusalueella 150 kHz - 30 MHz, kun niitä käytetään asuinympäristössä [8]. Siinä CISPR viittaa järjestöön, 36 on standardin numero ja 2020 julkaisuvuosi.

CISPR 25:2021 määrittelee rajat ja menetelmät radiotaajuushäiriöiden mittaamiseksi taajuusalueella 150 kHz - 5 925 MHz, koskien ajoneuvoja ja niiden sähköisiä komponentteja. Rajat suojaavat ajoneuvojen vastaanottimia häiriöiltä, joita aiheuttavat samassa ajoneuvossa olevat komponentit. Suojattavat vastaanottimet ovat esimerkiksi lähetinvastaanottimet, radiopuhelimet, GPS, Wi-Fi ja Bluetooth [22]

Häiriönsietokykyä koskevat päästöt on asettunut ISO. Ajoneuvoille ovat ISO 11451 ja 10605, sekä niissä käytetyille komponenteille ovat ISO 11452, 7637 ja 10605 [2]. ISO 11451 määrittelee yleiset ehdot, määrittelee termejä, antaa käytännön ohjeita ja vahvistaa perusperiaatteet ajoneuvojen testeihin, jotta voitaisiin määrittää ajoneuvojen kyky sietää kapeakaistaisia säteilymagneettisia häiriöitä, riippumatta ajoneuvon käyttövoimajärjestelmästä. Sähkömagneettiset häiriöt ovat rajoitettuja jatkuviin kapeakaistaisiin sähkömagneettisiin kenttiin. Laaja taajuusalue 10 kHz – 18 GHz on sallittu häiriönsietokykytesteissä [9].

ISO 10605 asiakirja määrittelee sähköstaattisen purkauksen testausmenetelmät, jotka ovat tarpeen arvioitaessa ajoneuvoissa käytettäviä elektronisia moduuleja ja valmiita

ajoneuvoja. Se koskee asennuksessa aiheutuvia, huoltohenkilöiden aiheuttamia ja matkustajien aiheuttamia sähköstaattisia purkauksia. [10]

ISO 11452 standardi määrittelee yleiset ehdot, antaa käytännön ohjeita ja vahvistaa perusperiaatteet elektronisten komponenttien testeille, jotka koskevat ajoneuvojen häiriönsietokykyä kapeakaistaisille säteilymagneettisille häiriöille. Tämä standardi on suunniteltu sovellettavaksi riippumatta ajoneuvon käyttövoimajärjestelmästä ja määrittelee testausmenetelmät, joilla mitataan elektronisten komponenttien kykyä kestää sähkömagneettisia häiriöitä tietyllä taajuusalueella 15 Hz - 18 GHz. Standardi tarjoaa ohjeet komponenttien Häiriönsietokykytestien suorittamiseen, mikä auttaa varmistamaan ajoneuvojen elektronisten järjestelmien luotettavan toiminnan erilaisissa sähkömagneettisissa ympäristöissä. [11]

ISO 7637 määrittelee testimenetelmät ja -menettelyt varmistaakseen, että 12 V:n tai 24 V:n sähköjärjestelmällä varustetut henkilöautojen ja hyötyajoneuvojen varusteet ovat yhteensopivia johtuvien sähköisten transienttien kanssa. Standardi kuvailee kokeita, joissa testataan häiriöiden altistumista ja mittausta. Se on sovellettavissa kaikenlaisiin tieliikenteessä käytettäviin ajoneuvoihin riippumatta niiden käyttövoimajärjestelmästä. Lisäksi standardissa annetaan toiminnan suorituskyvyn luokittelu häiriöille. [12]

WPT-järjestelmien eli langattoman tehon siirron (wireless power transfer) standardoinnin tarpeeseen on vastattu kolmella kansainvälisellä standardilla, jotka takaavat turvallisuuden, yhteensopivuuden ja tehokkuuden. IEC 61980-1 on yksi ensisijaisista standardeista, joka määrittelee yleiset vaatimukset sähköautojen langattomille latausjärjestelmille. Se kattaa laajan aihealueen sähköturvallisuudesta sähkömagneettisen yhteensopivuuden (EMC) ja sähkömagneettisten kenttien (EMF) altistusrajojen osalta. Tämän jälkeen ISO 19363 keskittyy erityisesti turvallisuus- ja yhteentoimivuusvaatimuksiin, jotka koskevat magneettikenttien WPT-järjestelmiä sähkökäyttöisissä tieliikenneajoneuvoissa. Viimeisimpänä SAE J2954 tarjoaa rakenteelliset ohjeet WPT-järjestelmien suunnitteluun ja testaamiseen, määritellen erilaisia teholuokkia ja kohdistamismenetelmiä varmistaakseen, että eri valmistajien järjestelmät toimivat harmonisesti. [20] WPT-järjestelmistä lisää luvussa 5.2. Seuraavassa luvussa tarkastellaan, miten näitä standardeja sovelletaan käytännössä täyssähköajoneuvojen EMC-suunnittelussa ja -testauksessa.

4. EMC TÄYSSÄHKÖAJONEUVOISSA

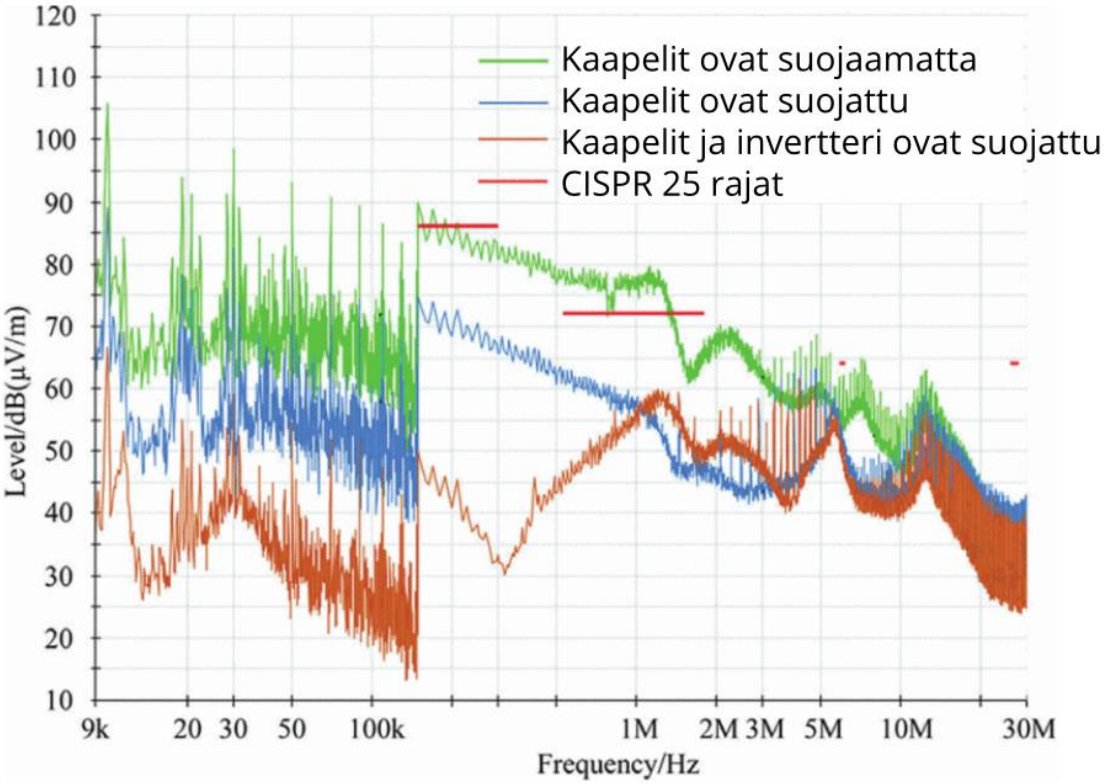
Sähköajoneuvojen sähkömagneettinen yhteensopivuus kohtaa suurempia haasteita kuin perinteisten öljyä polttavien ajoneuvojen, johtuen energian varastointilähteiden, ajojärjestelmien ja ajoneuvon ohjausyksiköiden muutoksista. Korkean tehon ja korkean jännitteen sähkökomponenttien käyttö tuottaa suurta sähkömagneettista häiriötä. Toisaalta korkeasti integroidut ajoneuvoelektroniikkajärjestelmät ovat alttiimpia sähkömagneettisille häiriöille, mikä on suoraan yhteydessä ajoneuvojen turvallisuuteen. [14] Täyssähköajoneuvo määritellään tässä ajoneuvoksi, jota voidaan käyttää sähkömoottorilla, joka ottaa virtaa akusta ja jota voidaan ladata ulkoisesta lähteestä [15]. Liittyen sähköajoneuvojen EMC:hen on tärkeä ottaa huomioon sen suunnittelu ja testaus, joita käsitellään seuraavissa alaluvuissa.

4.1 Suunnittelu

Sähköajoneuvoissa EMC suunnittelu on tärkeää etenkin aiemmin tunnistetuille EMI lähteille, kuten invertereille ja ohjausyksiköille. EMI:n minimoimiseksi on tutkittava erilaisia tekijöitä, kuten tehoväylän jännitepiikit, ulkoisten kaapeleiden aiheuttama säteilykohina, säteily suojakotelon läpi ja riittämätön piirilevysuunnittelun aiheuttama sisäinen kohina. [16] Suunnittelun apuna käytetään myös tietokoneohjelmia komponentti- ja ajoneuvotasolla. Nämä EMC-mallit ovat tärkeitä tutkittaessa sähkömagneettisten häiriöiden jakelumekanismeja ja leviämistä komponenttien välillä sekä koko ajoneuvon sisällä. [17]

Täyssähköajoneuvoissa on erilaisia järjestelmiä, mitkä vaativat toimiakseen erisuuruiset jännitteet. Näitä ovat esimerkiksi ajoneuvon ohjausyksikkö, sähköinen työntövoimajärjestelmä ja näytöt. Työntövoimajärjestelmä on suurin häiriön aiheuttaja täyssähköajoneuvossa ja sen suojausta käytetään häiriöiden poistamiseen. Vaihtosuuntaajien kytkentäprosessin aikana invertterin pääpiirissä oleva loiskapasitanssi aiheuttaa jännitepiikin, mikä voi vaikuttaa koko järjestelmän toimintaan. Kaikissa elektronisissa järjestelmissä on piirejä, jotka toimivat matalalla jännitteellä. Ne ovat herkkiä sähkömagneettisille häiriöille. Lisäksi viihdejärjestelmissä on langattomia laitteita, jotka voivat aiheuttaa merkittäviä häiriöitä. Tämän vuoksi sähkömagneettisen yhteensopivuuden suunnittelu on tärkeää, ei pelkästään järjestelmien suojaamiseksi ulkoisilta häiriöiltä, vaan myös niiden itsensä tuottamien häiriöiden eliminointiin. [16]

Sähkömagneettisia häiriöitä voidaan tehokkaasti vaimentaa suojauksella, suodatuksella ja järjestelmäperiaatteiden optimoinnilla. On myös yleisiä suunnitteluohjeita täyssähköajoneuvojen suunnitteluprosessissa. Suuritehoinen piiri tulisi sijoittaa mahdollisimman lähelle kuormaa. Eri toiminnoilla tai tehotasoilla varustetut kaapelit on eroteltava toisistaan. Signaalilinjat ja viestintälinjat tulee sijoittaa mahdollisimman kauas päävirtalinjoista, ja rinnakkaisia linjoja on vältettävä. Moottorinohjaimen ja moottorin välisissä yhteyksissä tulisi käyttää suojattuja kaapeleita, ja suojakerros on maadoitettava molemmista päistä. [14]



Kuva 8: Säteillyt päästöt 9 KHz – 30 MHz verrattuna CISPR 25 rajoihin [14].

Kuvassa 8 olevat mittaustulokset osoittavat, että säteilyhäiriöt vähenevät huomattavasti alle 10 MHz:n taajuuksilla, kun kaapelit suojataan. Vielä tehokkaampaa vaimennusta saadaan, jos myös invertteri suojataan. Vaikka metallikotelo auttaa vähentämään säteilyhäiriöitä, osa häiriösignaaleista voi yhä päästä ulos kapeiden rakojen kautta. Jos häiriösignaalin aallonpituus osuu sopivasti raon kokoon, se voi jopa vahvistua. Tämä selittää, miksi vaimennus 1 MHz:n ja 3 MHz:n välillä on heikompi kuin pelkän kaapelin suojauksessa. Tästä syystä inverttereiden suojaus ja maadoitus tulisi asettaa etusijalle, kun optimoidaan EMC-suojauksia. [14] Kun näitä verrataan luvussa 3.2 esiteltyyn standardiin CISPR 25 huomataan, että suojaamattomilla kaapeleilla ei päästä alle standardissa määrättyjen rajojen. Yli 10 MHz taajuuksilla pysytään kuitenkin rajoissa.

Vain kun testataan valmista ajoneuvoa voi arvioida kaikkien komponenttien yhteensopivuus. CISPR määrittelee rajat ja menetelmät radiotaajuushäiriöiden mittaamiseksi taajuusalueella 150 kHz - 1000 MHz. Jos EMC-ongelma ilmenee ajoneuvotason EMC-testissä, toimittaja saatetaan ottaa mukaan ratkaisun löytämiseksi muuttamalla komponentin suunnittelua, vaikka kaikki elektroniset komponentit läpäisisivät komponenttitason EMC-testauksen. Tämä osoittaa, että komponenttisuunnittelun lisäksi koko ajoneuvon EMC-ongelmien riski tulisi ottaa huomioon, ottaen huomioon komponenttien väliset yhteydet, johtosarjat ja niiden suojakotelot. [16] EMC-testaus toteutetaan standardien asettamin tavoin ja siitä lisää seuraavassa alaluvussa.

4.2 Testaus

Sähköajoneuvojen sähkömagneettisten päästöjen ja häiriönsietokyvyn testaus on monimutkaisempaa verrattuna polttomoottorilla varustettuihin ajoneuvoihin. Tämä johtuu siitä, että sähköajoneuvoilla on uudelleenladattava energian varastointijärjestelmä REESS (Rechargeable Energy Storage System), joka vaatii erityisiä testejä. REESS koostuu akusta ja akun hallintajärjestelmästä. Sähköajoneuvot ladataan latausasemien kautta, jotka ovat liitettyinä AC-virtalinjaan, mikä edellyttää johdettujen päästöjen mittaamista latauskaapeleista. Lisäksi sähköajoneuvoissa voi olla erikoisviestintäjärjestelmiä latausaseman ja ajoneuvon välillä, mikä korostaa tarvetta mitata johdettujen päästöjen tasot tietoliikenneliitännöistä. Myös energian varasointi järjestelmien lataaminen aiheuttaa omat haasteensa, mitkä käsitellään luvussa 5. Sähköajoneuvojen laturien ja muiden elektronisten komponenttien on oltava kestäviä AC-virtalinjojen generoimille sähkömagneettisille kentille. Tämä korostaa tarvetta kattaville sähkömagneettisen yhteensopivuuden testeille sähköajoneuvojen turvallisuuden ja suorituskyvyn varmistamiseksi. Sähköajoneuvojen päästö- ja häiriönsietokykytestejä on kahdenlaisia, johdettuja ja säteiltyjä. [13] Näitä käydään läpi seuraavissa alaluvuissa.

4.2.1 Päästötestit

Kuten luvussa 2.4 todettiin johtuneet päästöt ovat laitteen toiminnasta aiheutuvia kohinavirtoja, jotka kulkeutuvat johtimen kautta muihin järjestelmiin tai sähköverkkoon. Johtuneita päästöjä voi syntyä laitteen virtaportista, signaali-/ohjausportista tai telekommunikaatioliitännöistä sähköajoneuvoissa. Sähköajoneuvo voi lähettää

tahattomia sähkömagneettisia päästöjä sähköverkkoon ja vaikuttaa muihin samaa sähköverkkoa käyttäviin laitteisiin. [13]

On tärkeää mitata sähköajoneuvojen johtuneiden päästöjen tasot telekommunikaatioliitännöistä. Näitä testejä suoritetaan, kun ajoneuvo latautuu latausasemasta tai suoraan sähköverkosta. Mittaukset tehdään keinotekoisen verkon (AN) tai impedanssistabilointiverkon (ISN) yli. Huippu- ja keskimääräiset mittaustasot verrataan rajoituksiin, ja tulosten tulee olla määritettyjen rajojen alapuolella. Tämä testi on tarkoitettu mittaamaan radioaaltopäästöjen tasoa, joita ajoneuvo aiheuttaa konfiguraatiossa, missä REESS-lataustila kytkettynä verkkoon sen AC- tai DC-virtajohdoilla ja verkko- ja viestintäyhteyksillä varmistaakseen sen yhteensopivuuden asuin-, kaupallisten ja kevyiden teollisten ympäristöjen kanssa. Lataustason tulisi olla välillä 20 % ja 80 %. Jos virrankulutusta voidaan säätää, virran on oltava vähintään 80 % nimellisarvostaan. [13]

Sähköajoneuvoissa on monimutkaisia sähkö- ja elektronisia laitteita, kuten AC/DC-muuntajia, ajoneuvon latureita, regeneratiivista jarrutusjärjestelmää jne. Siksi säteilypäästöt voidaan jakaa kahteen osaan sähköajoneuvoissa: muut kuin REESS-lataustila kytkettynä virtaverkkoon ja REESS-lataustila kytkettynä virtaverkkoon. Muille kuin REESS-lataustilaan kytketyille virtaverkoille suoritetaan kapeakaista- ja laajakaistaisia päästötestejä. Poiketen pelkästään polttomoottorilla varustetuista ajoneuvoista, sähköajoneuvojen laajakaistaisten päästöjen mittauksissa ajoneuvoa on ajettava dynamometrillä ilman kuormaa tai ei-johtavilla telineillä tasaisella 40 km/h nopeudella. REESS-lataustilaan kytkettyjen virtaverkkojen testeihin suoritetaan vain laajakaistaisten päästöjen mittauksia. Latauskaapeli on kytkettävä ajoneuvoon keinotekoisen verkon avulla virtaverkoille ja impedanssistabilointiverkon avulla kommunikaatiolinjoille. [13]

4.2.2 Häiriönsietokykytestit

Sähköajoneuvoille on myös kahdenlaisia häiriönsietokykytestejä. Nämä ovat johdettu häiriönsietokyky ja säteilyn häiriönsietokyky. Sähköajoneuvojen sähköjärjestelmien johdettua häiriönsietokykyä häiriöille, jotka johtuvat AC- ja DC-virtajohtojen kautta kulkevista häiriöistä, tulee testata. Sähköisiä nopeita muutos- ja piikkihäiriöitä aiheutetaan sähköajoneuvoille, kun ajoneuvo on REESS-lataustilassa. Akun varausasteen tulee olla välillä 20 % ja 80 %. Kaikki muut laitteet ajoneuvossa on oltava pois päältä. Sähköajoneuvoa on seurattava testien aikana. Sähköiset piikit aiheutetaan

jokaisen johdon ja maan välillä sekä johtimien välillä käyttämällä kytkentä erotteluyksikköä CDN. Piikkien tasot ovat ±500V DC-virtajohtimille ja ±1000V ja ±2000V AC-virtajohtimille. Piikkitestit tulee suorittaa kaikille vaiheille. Sen sijaan sähköisiä nopeita muutos- / piikkitestejä tulee soveltaa virtajohtoihin yhteismuodossa. Muutoksen tasot ovat ±2000V AC- ja DC-virtajohtimille. [13]

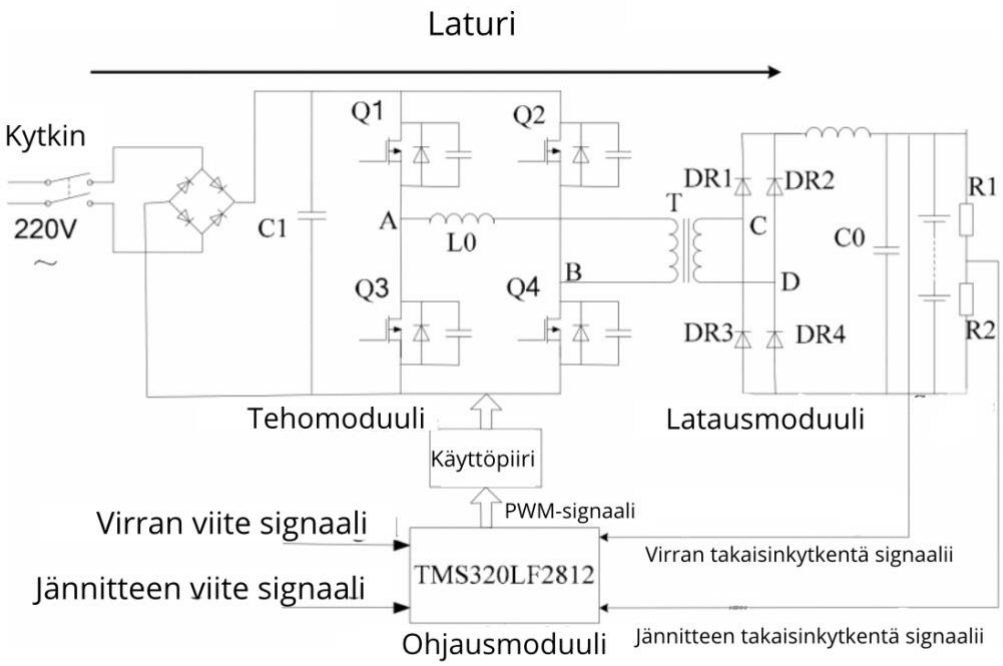
Sähköajoneuvojen tulisi olla kestäviä säteileville sähkömagneettisille kentille. Sähkömagneettisia kenttiä sovelletaan sähköajoneuvoihin silloin, kun ajoneuvo on REESS-lataustilassa ja muussa kuin REESS-lataustilassa. Ajoneuvo on oltava liikkumattomina ja moottori sammutettuna REESS-lataustilatestien aikana. Akun varausasteen tulee olla välillä 20 % ja 80 %. Toisaalta ajoneuvon on ajettava tasaisella nopeudella 50 km/h muissa kuin REESS-lataustilanteissa. Myös muita kuin REESS-lataustilanteita toistetaan jarrusyklin tilassa. Laitteet, jotka pystytään ajoneuvossa pitämään päällä, tulisi olla käynnissä. [13]

5. TÄYSSÄHKÖAJONEUVOJEN LATAUS MENETELMÄT

Täyssähköajoneuvojen tärkeä osa on niiden latausmenetelmät, vaikka ne eivät ole osa itse ajoneuvoa. Lataaminen tapahtuu yleensä kaapelilla eli johtumalla, mutta myös langaton lataus on vaihtoehto [18]. Nämä sähköajoneuvojen latausmenetelmät tuovat mukanaan omat EMC-haasteensa. Seuraavissa alaluvuissa tarkastellaan näitä menetelmiä ja niiden vaikutuksia sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen.

5.1 Lataus johtumalla

Sähköajoneuvojen latausjärjestelmä koostuvat tyypillisesti neljästä osasta: AC/DC-teholähteen tasasuuntaajamoduuli, tehomoduuli, ohjausmoduuli ja latausmoduuli. Kuvassa 9 on esitelty latausjärjestelmä. Siinä 220 V yksivaiheinen AC-jännite muutetaan DC-jännitteeksi VDCin käyttäen AC/DC-tasasuuntaajamoduulia ja kondensaattorisuodatinta. Tämä DC-jännite syötetään tehoyksikön sillanmuuntimeen, joka toimii PWM-tilassa (pulssinleveysmodulaatio). Sillanmuuntimen neljän transistorin Q1-Q4 kytkentätiloja ohjataan ohjausmoduulin tuottamalla PWM-aallolla, joka on korkeataajuinen ja puolijaksoiltaan symmetrinen pulssi. Tämän korkeataajuuspulssin jännite pienennetään korkeataajuusmuuntajassa ja muutetaan tasasuuntaussillalla DR1-DR4 DC-kanttiaaltoaalloksi. Saatu tasavirta suodatetaan LC-suodattimella ja se lataa akun. Ohjausmoduuli saa latausparametrit, kuten virta- ja jännitesignaalit, sähköajoneuvon energianhallintajärjestelmästä. Ohjaustehoyksikkö ja latausmoduuli suorittavat DC/DC-muunnoksen ja tuottavat tarvittavan latausjännitteen ja -virran akulle. [21]



Kuva 9: Sähköajoneuvon latausjärjestelmä [21].

Sähköajoneuvojen latausjärjestelmässä on sekä järjestelmän sisäisiä että ulkopuolisia häiriölähteitä. Järjestelmän sisäiset häiriöt johtuvat pääasiassa siitä, että tehoyksikön neljän transistorin kytkentätilat muuttuvat nopeasti. Piirin induktanssi- ja kapasitanssikomponentit, kuten transistorin oma johtoinduktanssi ja muiden laitteiden hajainduktanssit ja -kapasitanssit, aiheuttavat häiriöjännitettä ja häiriövirtaa. Nämä häiriöt voivat vaikuttaa paitsi tehoyksikköön myös heikentää ohjausjärjestelmän suorituskykyä, kun häiriövirta kulkee virtalähteen ja maadoituksen kautta ohjauspiiriin. Suuren sähkövirran muutosnopeuden omaava virtasilmukka voi myös säteillä sähkömagneettisia aaltoja, aiheuttaen voimakasta sähkömagneettista häiriötä, joka vaikuttaa muihin ajoneuvon osiin. [21]

Sähköautot kytketään sähköverkkoon latauskaapelilla, ja lataus teho voi olla jopa 22 kW. Tässä prosessissa sähköverkko toimittaa ajoneuvolle vaihtovirtaa, joka muunnetaan tasavirraksi akun lataamiseksi. Tätä varten käytetään tehoelektroniikkakomponentteja kuten DC-DC muuntimia. Nämä voivat aiheuttaa korkeataajuisia häiriöitä, jotka on otettava huomioon sähkömagneettisen yhteensopivuuden kannalta. EMC-häiriöt voivat levitä molempiin suuntiin, eli sekä sähköautojen järjestelmiin että sähköverkkoon päin. Kansainväliset EMC-standardit ja määräykset, kuten aiemmin esitelty CISPR 25 ja IEC 61851-21-1, ovat kehitetty, jotta häiriöt voidaan pitää alle määräysten. [19]

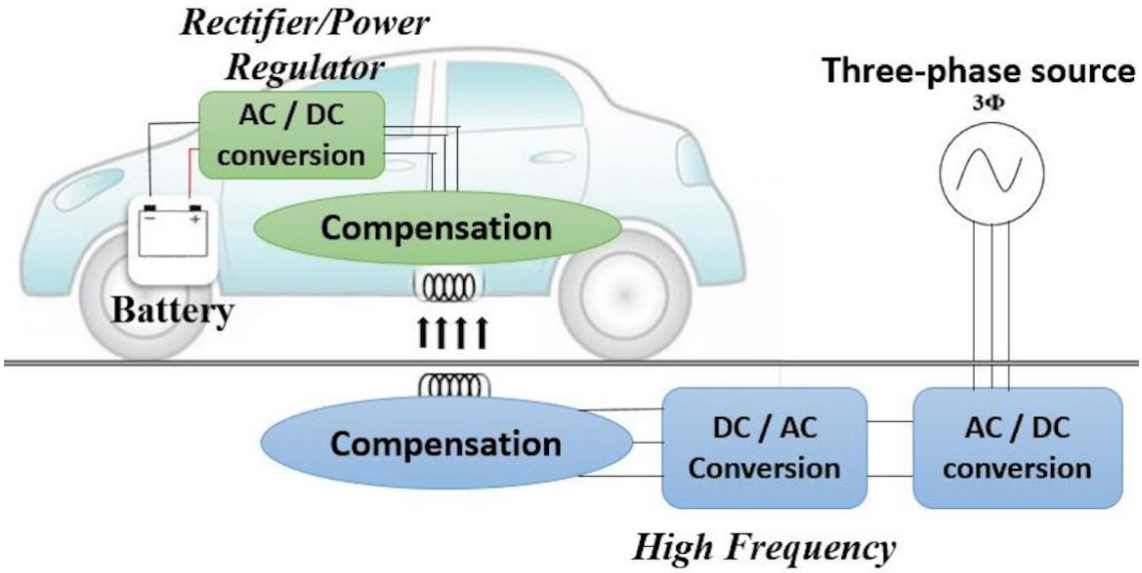
Sähköajoneuvojen latausjärjestelmässä syntyvä sähkömagneettinen häiriö johtuu sekä differentiaalimuotoisesta (DM) että yhteismuotoisesta (CM) virrasta, jotka ovat esitelty

luvussa 2.3. DM-häiriöt syntyvät, kun transistorien kytkimet latausjärjestelmän tehoyksikössä kytkeytyvät nopeasti päälle ja pois, luoden häiriösignaaleja, jotka voivat säteillä ympäröivään tilaan. CM-häiriöt puolestaan syntyvät laitteiston ja maadoitusviivan välisistä kapasitansseista, jotka voivat johtaa häiriövirtoja laajalle alueelle järjestelmässä. [21]

Esimerkiksi edellä mainittujen häiriöiden takia standardien noudatus ja suunnittelu ovat tärkeitä EMC hallinnassa. Latausjärjestelmän sähkömagneettisen yhteensopivuuden parantamiseksi on otettu käyttöön useita suunnittelumenetelmiä. Tehoyksikön ja piirilevyjen EMC-suunnittelu keskittyy häiriöiden lähteiden hallintaan ja häiriöiden leviämisen estämiseen järjestelmässä. Tähän kuuluu piirilevysuunnittelussa komponenttien ryhmittely nopeuden ja virran mukaan sekä johtimien mitoitus, jolla minimoidaan häiriöiden siirtyminen eri komponenttien välillä. Maadoituksessa käytetään monipistemaadoitusta, mikä vähentää maajohtimien induktanssia ja siten myös maadoitusimpedanssia. Tämä auttaa rajoittamaan yhteismuotoisen impedanssin kautta kulkevia häiriöitä. Suojaussuunnittelu kattaa sekä järjestelmän kotelon että kaapelit, käyttäen korkean johtavuuden materiaaleja ja maadoitusta häiriöiden estämiseen. [21]

5.2 Induktiivinen lataus

Langaton latausteknologia sähköautoille edustaa keskeistä edistysaskelta pyrkimyksessä kohti ekologisempaa liikennettä. Yhteiskuntien siirtyessä kestävämpään elämäntapaan langattoman latauksen käytännöllisyys ja tehokkuus sähköautoissa ovat avainasemassa. Langaton tehonsiirto eliminoi tarpeen fyysisille liittimille, mikä parantaa käyttömukavuutta ja lisää turvallisuutta, koska käyttäjän ei tarvitse olla kosketuksessa johtavien osien kanssa. WPT:n integroiminen yksityisten ja julkisten pysäköintialueiden infrastruktuuriin voi merkittävästi lisätä sähköautojen käytännöllisyyttä ja houkuttelevuutta mahdollistamalla vaivattoman latauksen. [20]



Kuva 10: Sähköajoneuvon langattoman latauksen periaate [23].

Langattoman sähköautojen latauksen haasteet liittyvät ajoneuvokohtaisen maan ja ajoneuvon ilmaväliin, sekä latausalustan ja ajoneuvon kelojen sijaintiin, kuten kuvassa 10 näkyy. Tämän seurauksena kelojen välillä on alhainen ja sijaintiriippuvainen magneettikytkentä, mikä aiheuttaa suuremman reaktiivisen tehon syöttämisen järjestelmään. Tämä laskee hyötysuhdetta. Lisäksi induktiivisen latauksen aikana syntyy suuria magneettikenttiä, mikä aiheuttaa haasteita sähkömagneettisen yhteensopivuuden suhteen. Tarkoituksenmukaisten magneettikenttien lisäksi syntyy vuotokenttiä, mitkä voivat aiheuttaa häiriöitä. Nämä kentät eivät osallistu energiansiirtoon, mutta voivat aiheuttaa ei-toivottuja sähköisiä ja magneettisia kenttiä ja sähkömagneettista häiriötä. Latausasemassa sijaitseva invertteri, joka tuottaa maakelalle korkeataajuista vaihtovirtaa, synnyttää samanaikaisesti merkittäviä sähkömagneettisia häiriöitä korkean kytkentätaajuuden vuoksi. Näiden häiriövirtausten tutkiminen on siksi tärkeä osa induktiivisten latausjärjestelmien EMC-suunnittelua. Täytyy myös varmistaa, että syntyvät harmoniset eivät yllä viestintäpalveluiden spektriin, on määritettävä sopivat standardit ja rajat WPT-järjestelmien suunnittelulle ja niiden säteilykentille. [18]

6. YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä selvitettiin sähkömagneettisen yhteensopivuuden merkitystä täyssähköajoneuvoissa sekä menetelmiä ja ratkaisuja EMC:n parantamiseksi. Työssä käsiteltiin aluksi sähköajoneuvojen EMC:n perusteet, EMC-standardit ja niiden soveltaminen. Näiden jälkeen voitiin siirtyä tarkastelemaan suunnitteluratkaisuja häiriöiden minimoimiseksi ja latausjärjestelmien EMC-haasteita.

EMC voidaan jakaa kahteen pääkomponenttiin: häiriönsietokykyyn ja päästöihin. Häiriönsietokyky tarkoittaa laitteen kykyä kestää ulkopuolelta tulevia sähkömagneettisia häiriöitä ilman toimintahäiriöitä. Päästöt puolestaan viittaavat laitteen tuottamiin sähkömagneettisiin häiriöihin, jotka voivat vaikuttaa muihin laitteisiin. Sähkömagneettiset päästöt voivat olla joko johtuvia, säteileviä, induktiivisia tai kapasitiivisia. Johtuvat päästöt leviävät johtojen kautta, kun taas säteilevät päästöt kulkeutuvat ilmassa sähkömagneettisina aaltoina. Näiden päästöjen hallinta on erityisen tärkeää sähköajoneuvoissa, joissa häiriölähteitä on paljon ja ne voivat aiheuttaa merkittäviä ongelmia ajoneuvon ja sen ympäristön laitteille. EMC parantamiseksi onkin tärkeää soveltaa kokonaisvaltaista lähestymistapaa, joka kattaa suunnittelun, testauksen ja standardien noudattamisen.

EMC-standardit ovat tärkeitä varmistamaan, että sähköajoneuvot eivät aiheuta häiriöitä ympäristölleen eivätkä ole alttiita ulkoisille häiriöille. Standardit määrittelevät testausmenetelmät ja rajat sähkömagneettisille päästöille ja kyvylle vastustaa niitä. Kansainväliset standardit, kuten IEC ja ISO, asettavat vaatimukset sähköajoneuvojen EMC:lle. Euroopassa EMC-standardeja sovelletaan yleisesti kansainvälisten standardien mukaisesti.

Täyssähköajoneuvojen EMC-suunnittelu ja -testaus ovat monimutkaisempia kuin perinteisissä ajoneuvoissa. Suunnittelussa on huomioitava esimerkiksi invertterien ja ohjausyksiköiden häiriöt. EMC-mallit auttavat tutkimaan häiriöiden leviämistä ajoneuvon sisällä. Sähköajoneuvoissa on erilaisia järjestelmiä, jotka vaativat erisuuruiset jännitteet. Työntövoimajärjestelmä on suurin häiriön aiheuttaja täyssähköajoneuvossa, ja sen suojausta käytetään häiriöiden poistamiseen. Myös piirit, jotka toimivat matalalla jännitteellä ja ovat herkkiä sähkömagneettisille häiriöille. EMC-testaus toteutetaan standardien mukaisesti, ja se on keskeinen osa ajoneuvon turvallisuuden ja suorituskyvyn varmistamista.

Sähköajoneuvojen latausjärjestelmät, kuten johtumalla tapahtuva lataus ja langaton lataus, tuovat mukanaan omat EMC-haasteensa. Johtumalla latauksessa häiriöitä voivat aiheuttaa esimerkiksi tehoelektroniikkakomponentit. Langattoman latauksen haasteita ovat muun muassa suuret magneettikentät ja niiden vaikutus ajoneuvon sähköjärjestelmiin. On myös otettava huomioon kelojen sijainti ajoneuvossa ja latausalustalla.

Keskeisiä havaintoja ovat, että EMC:n huomioiminen suunnittelussa ja testauksessa on kriittistä ajoneuvojen turvallisuuden ja suorituskyvyn kannalta. Myös latausjärjestelmät tuovat mukanaan erityisiä EMC-haasteita, jotka vaativat huolellista suunnittelua ja testausmenetelmiä. Sähköajoneuvojen sähkömagneettisen yhteensopivuuden parantaminen edistää turvallisempaa ja häiriöttömämpää sähköajoneuvoteknologian kehittämistä.

LÄHTEET

[1] International Electrotechnical Commission (IEC). *Electropedia: The World's Online Elec- trotechnical Vocabulary*. Feb. 5, 2021. URL: http://www.electropedia.org.

[2] Keller, Reto B. *Design for Electromagnetic Compatibility--In a Nutshell Theory and Practice*. 1st ed. 2023. Cham: Springer Nature, 2023. Web.

[3] Wilson, Peter. *Circuit Designer's Companion (4th Edition)*. Fourth edition. San Diego: Elsevier, 2017. Print.

[4] Ott, Henry W., and Henry W. Ott. *Electromagnetic Compatibility Engineering*. Rev. ed. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2009. Print.

[5] *Clinical Engineering Handbook*, edited by Joseph Dyro, Elsevier Science & Technology, 2004. *ProQuest Ebook Central*, http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=293542. Created from tampere on 2024-02-19 16:01:28.

[6] Williams, Tim. *EMC for Product Designers (4th Edition)*. 4th ed. San Diego: Elsevier, 2001. Web.

[7] EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON DIREKTIIVI 2014/30/EU. Pdf-dokumentti. Viitattu 28.2.2024. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fi/TXT/PDF/?uri=OJ:JOL_2014_096_R_0079_01&from=EN

[8] IEC. 22.7.2020. CISPR 36:2020. Verkkosivu. Viitattu 29.2.2024. https://webstore.iec.ch/publication/27203

[9] ISO. 6.2015. ISO 11451-1:2015. Verkkosivu. Viitattu 29.2.2024. https://www.iso.org/standard/62477.html

[10] ISO. 6.2023. ISO 10605:2023. Verkkosivu. Viitattu 29.2.2024. https://www.iso.org/standard/79094.html

[11] ISO. 6.2015. ISO 11452-1:2015. Verkkosivu. Viitattu 29.2.2024. https://www.iso.org/standard/59609.html

[12] ISO. 3.2013. ISO 7637-2:2011. Verkkosivu. Viitattu 29.2.2024. https://www.iso.org/standard/50925.html

[13] Kozan, Merve Deniz, and Erdal Usta. "EMC Test Requirements for Electric Vehicles." *2019 5th International Electromagnetic Compatibility Conference, EMC Turkiye 2019*. Vol. 1. IEEE, 2019. 1–3. Web.

[14] Hu, Jian et al. "Analysis and Optimization of Electromagnetic Compatibility for Electric Vehicles." *IEEE electromagnetic compatibility magazine* 8.4 (2019): 50–55. Web.

[15] U.S. Department of energy. 6.6.2021. Electric vehicle (EV) definition. Verkkosivu. Viitattu 14.3.2024. https://afdc.energy.gov/laws/12660

[16] Guler, Sunay, Sibel Yenikaya, and Mustafa Simsek. “EMC Design for Battery Electric Vehicle (BEV) Propulsion System.” *2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*. Piscataway: Chamber of Turkish Electrical Engineers, 2019. 286–289. Web.

[17] I. Hoda, J. Li and H. Funato, "EMC Design and Development Methodology for Traction Power Inverters of Electric Vehicles", *International Power Electronics Conference*, pp. 2073-2077, 2018.

[18] Sulejmani, Emir, Michael Beltle, and Stefan Tenbohlen. “EMC of Inductive Automotive Charging Systems According to Standard SAE J2954.” *Vehicles* 5.4 (2023): 1532–1552. Web.

[19] Supa Stolben, Inti Runa et al. “Influences of Ground Connection and Cable Length on the EMC Behavior of Electric Vehicles during Conductive Charging Operations.” *2023 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe*. Vol. 2023-. IEEE, 2023. 1–4. Web.

[20] Grazian, Francesca et al. “Survey on Standards and Regulations for Wireless Charging of Electric Vehicles.” 2019 AEIT International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE). AEIT, 2019. 1–5. Web.

[21] Zhai, Li et al. “Study on Electromagnetic Interference Restraining of Electric Vehicle Charging System.” 2011 4th International Conference on Power Electronics Systems and Applications. IEEE, 2011. 1–4. Web.

[22] IEC. 22.7.2020. CISPR 25:2021. Verkkosivu. Viitattu 30.5.2024. https://webstore.iec.ch/publication/64645

[23] Mohamed, Naoui et al. “Review on Autonomous Charger for EV and HEV.” 2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS). IEEE, 2017. 1–6. Web.

[24] Wikipedia. 10.11.2023. Sähkömagneettinen yhteensopivuus. Verkkosivu. Viitattu 30.5.2024. https://fi.wikipedia.org/wiki/Sähkömagneettinen_yhteensopivuus