



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

Sähkömagneettisen yhteensopivuuden lähtökohtien selvitys ajoneuvosuunnittelun tueksi

Walteri Koskinen

Opinnäytetyö
Kesäkuu 2018
Ajoneuvotekniikka
Auto- ja työkonetekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Ajoneuvotekniikka
Auto- ja työkonetekniikka

KOSKINEN WALTTERI:

Sähkömagneettisen yhteensopivuuden lähtökohtien selvitys ajoneuvosuunnittelun tueksi

Opinnäytetyö 35 sivua, joista liitteitä 3 sivua
Kesäkuu 2018

Tässä opinnäytetyössä käsitellään sähkömagneettista yhteensopivuutta (EMC) ja osa-alueita mitkä sisältyvät siihen. Langattoman tiedonsiirron lisääntyessä ja prosessorien kello-
taajuuksien kasvaessa tarve sähkömagneettisten häiriöiden rajoittamiseen on lisääntynyt. Laite voi häiritä ympärillään olevia laitteita säteilemällä sähkö- ja magneettikenttiä tai häiriöillä, jotka johtuvat johtimien kautta.

EMC-standardien tavoitteena on turvata laitteiden yhteensopivuus ja taata niille toisistaan riippumaton käytös. Työssä paneudutaan kotelon suojauskyvyn määrittämiseen simuloimalla sekä kapasitiivisen kytkeytymisen laskentaan. Työssä esitetään ilmiöiden takana olevaa fysiikkaa, jotta lukijalla on mahdollisuus ymmärtää asia syvällisemmin ja oivaltaa myös itse esitellyt johtopäätökset.

Työ sisältää myös yhteenvedon suunnittelutyöstä EMC-näkökulmasta ja ajatuksia siitä, kuinka sitä tulisi lähestyä. Tavanomaisia EMC-ongelmia käydään lävitse ja niihin tarjotaan esimerkkiratkaisuita. Työn tarkoitus on toimia esittelynä aiheeseen asiasta kiinnostuneille.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Vehicle Engineering
Industrial Vehicle Engineering

KOSKINEN WALTTERI:

Study of Electromagnetic Compatibility Keystones for Automotive Design Process

Bachelor's thesis 35 pages, appendices 3 pages

June 2018

This thesis is about electromagnetic compatibility (EMC) and a few related sub-topics. As the amount of wireless communications and processor clock speeds have drastically increased through the past decade, regulations have had to be periodically introduced and tightened. EMC regulations and standards are aimed to ensure compatibility between electronic devices. Electronic components can produce electric and magnetic fields that causes interference to other devices. Electromagnetic emissions can be conducted or radiated, but only the latter will be studied. Common EMC problems and solutions are introduced and considered in the thesis.

The aim of the thesis is to work as an introduction to EMC and provide all necessary details about the physics behind it. The thesis includes discussions about shielding effectiveness and step by step calculation of capacitive coupling scenarios.

Key words: EMC, electromagnetic compatibility, vehicle, product development, simulation

SISÄLLYS

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | JOHDANTO..... | 6 |
| 2 | SÄHKÖMAGNEETTINEN YHTEENSOPIVUUS | 7 |
| 2.1 | Kytkeytymisen estäminen..... | 8 |
| 2.2 | EMC-simulointityökalut | 9 |
| 3 | SÄHKÖISET ILMIÖT EMC:N TAKANA | 10 |
| 3.1 | Sähködipoli | 11 |
| 3.2 | Sähkövuo | 12 |
| 3.3 | Kappaleet sähkökentässä | 14 |
| 3.4 | Suojauskyky..... | 15 |
| 3.5 | Pyörrevirrat | 16 |
| 3.6 | Pintailmiö..... | 17 |
| 4 | KAPASITIIVISEN KYTKEYTYMISEN LASKENTA | 19 |
| 4.1 | Johtimien resistanssi | 21 |
| 4.2 | Johtimien välinen kapasitanssi..... | 22 |
| 4.3 | Tuloksien vertailua | 24 |
| 5 | SUOJAUSKYVYN SIMULOINTI..... | 27 |
| 6 | YHTEENVETO TYÖSTÄ..... | 30 |
| | LÄHTEET..... | 32 |
| | LIITTEET | 33 |
| | Liite 1. Kapasitiivisen kytkeytymisen laskenta..... | 33 |
| | Liite 2. Suojauskyvyn simuloinnilla saadut virrat antennissa. | 34 |
| | Liite 3. Suojauskyvyn simulointitulokset..... | 35 |

LYHENTEET JA TERMIT

| | |
|-------|---|
| EMC | Electromagnetic compatibility |
| CISPR | International Special Committee on Radio Interference |
| ISO | International Organization for Standardization |
| SAE | Society of Automotive Engineers |

1 JOHDANTO

Sähkömagneettiset ilmiöt ovat ajoneuvoteollisuudessa kasvava aihe. Ajoneuvojen sähköistyminen ja elektroniikan lisääntyminen on tiukentanut ja lisännyt ajoneuvoilta vaadittavia testejä. Näiden standardien ja määräysten tiukentamisen tarkoitus on varmistaa elektronisien laitteiden toimivuus kaikissa ympäristöissä myös tulevaisuudessa.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli kartoittaa mahdollisuuksia ja menetelmiä säteilevien sähkömagneettisten häiriöiden simulointiin, sekä kerätä tietoa suunnittelua tukevaksi paketiksi. Työssä keskitytään ilmiön takana olevaan fysiikkaan ja käydään lävitse muutamia esimerkki tapauksia. Työstä voi olla apua aiheesta vähän tietävälle tai kokeneemmalle henkilölle, joka haluaa palauttaa muistiinsa perusasiat.

Työ keskittyy sähkökenttiin ja kapasitiiviseen kytkeytymiseen. Työssä käydään lävitse, miksi mahdollisiin EMC-ongelmiin tulee kiinnittää huomiota jo suunnittelun alkuvaiheessa. Myös simulointiin tarvittavien lähtötietojen etsintää ja sen vaikeutta käsitellään osana simulointien hankaluutta.

Toisessa luvussa käsitellään sähkömagneettisen yhteensopivuuden yhteydessä esiintyviä käsitteitä sekä pohjustetaan aihetta yleisellä tasolla. Kolmannen luvun tarkoituksena on esitellä ilmiöiden takana olevaa fysiikkaa, jotta lukija saisi kokonaisvaltaisen käsityksen aiheesta ja pystyisi muodostamaan tekstistä omat päätelmänsä. Neljäs ja viides luku esittelevät esimerkkitapauksia simuloinnista ja laskennasta. Kuudennessa luvussa kerätään yhteen ajatuksia suunnittelutyöstä EMC-näkökulmasta.

2 SÄHKÖMAGNEETTINEN YHTEENSOPIVUUS

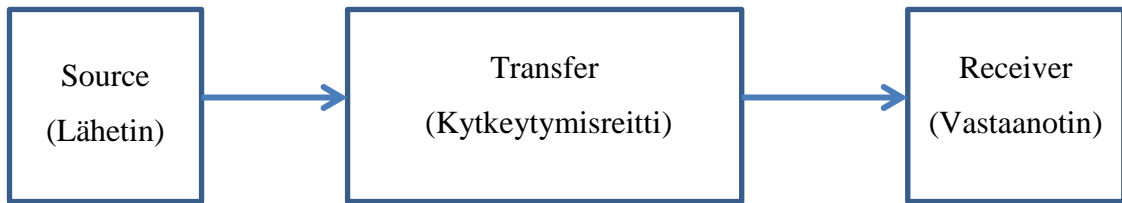
Sähkömagneettisella yhteensopivuudella eli EMC:llä (engl. Electromagnetic Compatibility) tarkoitetaan järjestelmän tai laitteen kykyä toimia vaikuttamatta ympärillä oleviin laitteisiin, sekä laitteen immuniteettia ulkoisille ja itsensä aiheuttamille häiriöille. Yhteensopivien laitteiden tulisi toimia kaikissa ympäristöstä sille tarkoitetulla tavalla. (Paul 2006, 2)

Tässä luvussa esitellään EMC-käsite, sekä siihen keskeisesti liittyviä asioita. Tekstissä kerrotaan myös tyypillisistä ongelmatapauksista, sekä kerrotaan yksinkertaisia perusratkaisuita niihin.

Sähköisille laitteille on asetettu määräyksiä, joiden tarkoituksena on taata laitteen täysi toimintakyky kaikissa ympäristöissä. Noudatettava standardi riippuu laitteen käyttötarkoituksesta sekä alueesta, jossa sitä käytetään. Ajoneuvosovelluksissa käytetään usein CIRPR-, ISO- sekä SAE-standardeja, hieman riippuen tuotteesta. Standardit sisältävät vaatimuksia laitteelle häiriön lähteenä ja vastaanottajana. Standardista riippuen laitteelle suoritettavat testit on tehtävä avoimella alueella tai käyttöön erikseen varustellussa tilassa. Tällaisessa EMC-laboratoriossa on valmiudet suorittaa mittauksia ilman ulkopuolisia häiriöitä sekä ilman seinien heijastusta. (Ott 2009, 11, 19)

Esimerkkinä EMC-ongelmista sähköisissä ajoneuvoissa voidaan käsitellä korkeajänniteakustoa. Sähköajoneuvosovelluksissa korkeajänniteakustot ovat koteloituja rakenteita. Jos johtimet kotelon sisällä eivät ole suojattuja, kotelon sisälle sijoitetut järjestelmät ovat alttiita säteilylle. Akuston tapauksessa irrallinen häiriötä vastaanottava piiri on akunhallintajärjestelmä. Eräs sen tehtävistä on valvoa akuston suorituskykyä purku- ja lataustilanteessa, jotta akusto ei pääse toimimaan turvallisten rajojen ulkopuolella. (Bosch 2014, 1138). Kyse on siis turvallisuuskriittisestä järjestelmästä, jonka toimintavarmuuteen tulee panostaa.

EMC-ongelman voidaan jakaa kolmeen eri osaan kuvan 1 mukaisesti. Nämä ovat ne avaintekijät, joihin tulee keskittyä, kun ongelmia lähdetään jakamaan vielä pienempiin osiin. Sähkömagneettisia häiriöitä esiintyy kahdessa muodossa, säteilevinä ja johtuneina häiriönä. (Paul 2006, 3)



Kuva 1. EMC-ongelman jakautuma (Paul 2006, mukaillen)

2.1 Kytkeytymisen estäminen

Häiriön lähteenä olevaa komponenttia tulisi eristää mahdollisuuksien mukaan. Tämä saattaa kuitenkin olla hankalaa, koska eristys saattaa haitata halutun signaalin kulkua. Tämä tulee vastaan usein sovelluksissa, joissa tietoa halutaan kuljettaa langattomasti. On erittäin tärkeää, että erotetaan haluttu signaali häiriöstä. Signaalin ja häiriön ero on riippuvainen näkökulmasta. Esimerkiksi perinteisen radion tapauksessa ongelma voitaisiin jakaa kahteen eri tapaukseen. Ensimmäisessä radio on säädetty lähettimen taajuudelle ja lähetys kuuluu kirkkaasti ja hyvin. Tällöin signaali on haluttu. Toisessa radio on säädetty eri taajuudelle kuin lähetin, mutta silti lähetys on selvästi kuultavissa. Tällöin signaali ei ole haluttu vaan se on häiriötä. Tällaisessa tapauksessa itse lähettimen suojaus ei ole parhain ratkaisu, vaan suodatus olisi helpoin tehdä vastaanottimen päässä. (Paul 2006, 4)

Kytkeytymisreitti on reitti, jota pitkin energia siirtyy sähköpiiristä toiseen. Kytkeytymisreitteinä voi toimia esimerkiksi laitteiden väliin kytketty johde tai johtimien välinen kapasitanssi. Kytkeytymisreittein tehokkuus on riippuvainen myös siinä kulkevasta signaalista. Lähettimen käsittelemän signaalin muokkaaminen voikin olla yksi ratkaisu ongelman selvittämiseksi. Lyhyet signaalin nousu- ja laskuajat ovat digitaalisesta signaalista syntyneen häiriön suurin syy. Yleisesti ottaen, mitä korkeampi taajuinen signaali, sitä parempi on häiriön kytkeytymisreitti. Lasku- ja nousuaikoja tulisi kasvattaa niin suureksi kuin mahdollista, ilman että se vaikuttaa piirin toimintaan. Laskemalla taajuutta ja signaalin muutosajoja laskemme siis kytkeytymisreittein tehokkuutta. (Paul 2006, 5.) Toisiaan lähellä kulkevat johtimet luovat välilleen kapasitanssia, joka on riippuvainen käytetyistä materiaaleista sekä geometriasta. Näitä kapasitansseja ei näy piirikaavioissa, vaan ne tarvitsee laskea, jotta niiden vaikutusta järjestelmän toimintaan pystytään tutkimaan (Ott 2009, 6).

Toinen tapa kytkeytymisreittein tehokkuuden alentamiseen on suojausten käyttö. Suojatut kotelot ovat kalliimpia valmistaa sekä niiden todellinen tehokkuus itse sovelluksessa ei

aina ole täysin ideaali. Tuotteiden hintojen laskemiseksi monien halvempien laitteiden kotelointi on vaihdettu muoviseen ja ne ovat sen takia alttiina elektromagneettisille häiriöille. (Paul 2006, 6)

2.2 EMC-simulointityökalut

Suuri osa sähkömagneettisista ilmiöistä on simuloitavissa. Sähkömagneettiikkaratkaisijoita käytetään moneen eri tarkoitukseen, mutta myös monet EMC-ongelmat ovat niillä löydettävissä. EMC-simulaatioiden tarkoituksena on vähentää fyysisiä prototyyppkejä ja nopeuttaa tuotteen kehitysprosessia. (Futter 2017.) Simulointiohjelmistoja ja niiden tarjoajia on monia. Tässä työssä käytetään Altairin Fekoa, sekä LTspiceä. Itse ohjelmistojen käyttö on jätetty työn ulkopuolelle.

SPICE on yleiskäyttöinen virtapiirisimulaattori. Sen nimi muodostuu sanoista Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis. Alun perin SPICE kehitettiin monimutkaisien virtapiirien analysointia varten. Sen kehitys alkoi Kalifornian yliopistossa 1970-luvun alussa. Ohjelman kehitys on Yhdysvaltojen valtion rahoittama, ja tämän takia sen kopiointi, käyttö ja jakelu on täysin ilmaista. (Paul 2006, 959) Monen EM-simulointi ohjelmiston virtapiirien ratkaisu perustuu SPICEN alkuperäiseen koodiin. Myös Feko laskee johtimille parametrit ja muodostaa niillä virtapiirin, joka ratkaistaan samoilla menetelmillä kuin SPICEssa. SPICE on helppokäyttöinen ja ilmainen työkalu. Työssä käytettiin Linear Technologyn jakamaa LTspice ohjelmistoa. Feko on monikäyttöinen 3D sähkömagnetismiratkaisija, jolla on mahdollista simuloida antennejä, niiden paikoitusta sekä monenlaisia EMC-analyyskejä (Futter 2017). Työssä Fekoa käytettiin ratkaisemaan kotelon suojauskyky.

3 SÄHKÖISET ILMIÖT EMC:N TAKANA

Säteileviä häiriöitä syntyy virtapiirissä, joissa jännitteet tai virrat vaihtuvat nopealla taajuudella. Häiriöiden riski kasvaa myös, jos signaalin nousu- ja laskuajat ovat lyhyitä. Häiriön voimakkuutta kuvataan usein sähkökentän voimakkuuden avulla. Sähkökenttä on varauksen ympärilleen luoma kenttä. Sitä voidaan kartoittaa pienien testivarausten avulla, koska varauksien sähkökentät vaikuttavat toisiinsa kaavan 1 mukaisesti (Bansal 2006, 1-2; Paul 2006, 4)

$$\bar{E} = \frac{\bar{F}}{q} \quad (1)$$

jossa \bar{E} on sähkökentän voimakkuus, \bar{F} on varaukseen vaikuttava sähköinen voima ja q on sähkövarauksen voimakkuus. Sähkökentän yksiköksi muodostuu $\frac{N}{C}$, mutta tämän sijasta käytetään usein yksikköä $\frac{V}{m}$. Yksiköiden välinen vastaavuus voidaan todeta kaavasta 2 (Inkinen, Manninen ja Tuohi 2009, 16-40)

$$\bar{E} = \frac{\bar{F}}{q} = \frac{V_A - V_B}{d} = \left[\frac{V}{m} \right] \quad (2)$$

jossa V_A ja V_B on potentiaali pisteessä ja d niiden välinen etäisyys. Sähkökentän suunta on sama kuin positiiviseen varaukseen q vaikuttava voima. Jos q on negatiivinen, ovat vaikuttava voima ja sähkökenttä vastakkaisuuntaiset.

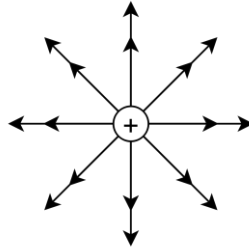
Pistemäinen sähkövaraus Q kohdistaa etäisyydellä r sijaitsevaan varaukseen q voiman, jonka suuruus voidaan laskea Coulombin lain perusteella, kuten kaavassa 3 on esitetty. Kaavassa ϵ on väliaineen permittiivisyys. (Mäkelä, yms. 2014, 117)

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{|Qq|}{r^2} \quad (3)$$

Sähkökenttä on vektorisuure, joten sen laskenta on syytä esittää myös vektorimuodossa. Vektorimuodon laskenta on esitetty kaavassa 4, jossa \vec{r}_0 on \vec{r} :n suuntainen yksikkövektori.

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q}{r^2} \vec{r}_0 \quad (4)$$

Pistemäisen varauksen ympärillä olevaa säteilykenttää voidaan kuvata vektoreilla. Kentän voimakkuus voidaan esittää vektorien pituudella kaavan 4 mukaisesti. Sähkökenttä heikkenee kääntäen verrannollisena etäisyyden r neliöön. Tällöin esitystapa olisi kuvan 2 mukainen. (Inkinen, Manninen ja Tuohi 2009, 19)



Kuva 2. Pistevarauksen sähkökenttä vektorimuodossa esitettynä (Inkinen, Manninen ja Tuohi 2006, mukailten)

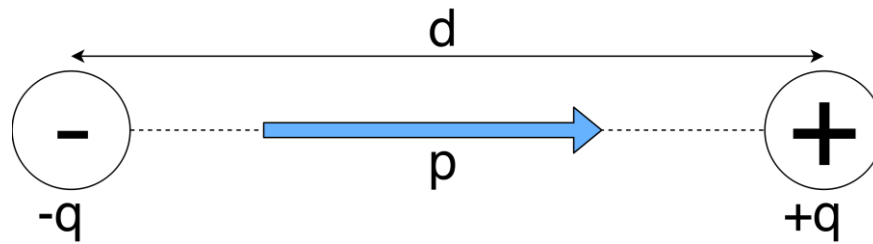
Sähkökentälle esitelty kaava 4 pätee silloin, kun varausta voidaan käsitellä pistemäisenä. Jos tarkasteltava kohde on suurempi, varausjakauma tulee jakaa hyvin pieniin varausaluihin. Tällöin voidaan selvittää yksittäisten alkioiden aiheuttama differentiaalinen sähkökenttä ja se integroimalla voidaan selvittää koko sähkökentän voimakkuus. Silloin kaava 4 esitetään kaavassa 5 esitetyssä muodossa. (Inkinen, Manninen ja Tuohi 2006, 20)

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int \frac{dq}{r^2} \vec{r}_0 \quad (5)$$

3.1 Sähködipoli

Sähködipoli muodostuu kahdesta saman suuruisesta, mutta erimerkkisestä varauksesta, jotka ovat etäisyydellä d toisistaan. Näiden varausten väliin syntyy sähködipolimomentti p , joka voidaan laskea kaavasta 6. Dipoli ja sähködipolimomentti on esitetty kuvassa 3. Sähkömagneettisen aaltoliikkeen yhteydessä puhutaan usein dipoliantennista. Tällöin viitataan sähkövarausten jaksolliseen erottumiseen. (Inkinen, Manninen ja Tuohi 2006, 24.) Dipoliantenni on yleisesti käytetty antennirakenne, joka koostuu kahdesta vastakkaisuuntaisesta johtimesta (Ott 2009, 746).

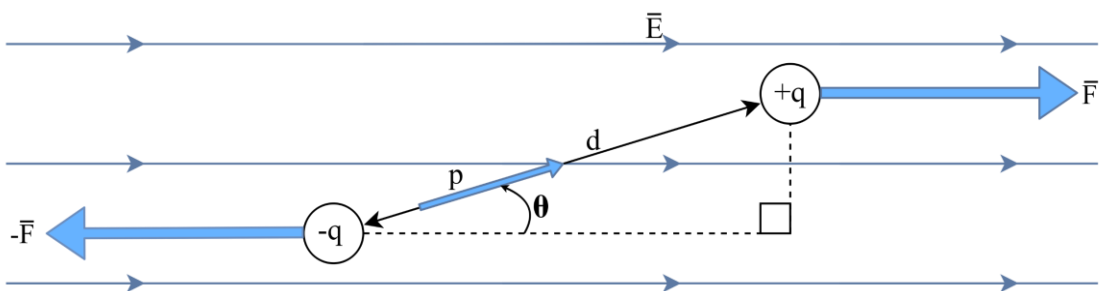
$$\vec{p} = q\vec{d} \quad (6)$$



Kuva 3. Sähködipoli ja varausten välissä vaikuttava sähködipolimomentti (Inkinen, Manninen ja Tuohi 2006, mukaillen)

Dipolin ollessa tasaisessa sähkökentässä \vec{E} sen kumpaankin varaukseen kohdistuu voima, jonka suuruus on qE . Voimien ollessa vastakkaisuuntaiset kumoavat ne toisensa. Voimat voivat kuitenkin aiheuttaa momentin, jos dipoli ei ole sähkökentän kanssa samansuuntainen. Dipoliin aiheutuva momentti voidaan laskea kaavalla 7, jossa θ on dipolimomentin \vec{p} ja sähkökentän \vec{E} välinen kulma. Kuvassa 4 esitetään havainnekuva tällaisesta tapauksesta. Sähkökentän aiheuttama voima pyrkii kiertämään dipolin sähkökentän suuntaiseksi. (Inkinen, Manninen ja Tuohi 2006, 24-25)

$$\vec{M} = qE\vec{d} \cdot \sin \theta = E\vec{p} \cdot \sin \theta \quad (7)$$



Kuva 4. Tasaisen sähkökentän aiheuttama dipolimomentti (Inkinen, Manninen ja Tuohi 2006, mukaillen)

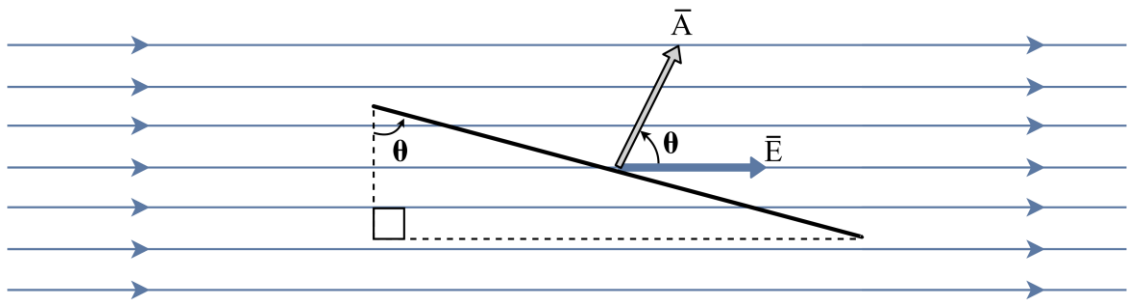
3.2 Sähkövuo

Gaussin lain avulla on mahdollista tarkastella varausjakauman aiheuttaman sähkökentän voimakkuutta. Gaussin laki määrittää, että suljetun pinnan lävitse virtaava sähkövuo on

sama kuin pinnan sisään jäävä kokonaisvaraus. Gaussin laki on yleinen sähkökenttiä koskeva lause ja se pätee myös dynaamisille sähkökentille. Sähkövuon tiheys \bar{D} voidaan määrittellä permittiivisyyden ϵ ja sähkökentän \bar{E} tuloksi kaavan 8 mukaisesti. Sähkökentässä kulkeva sähkövuoto Ψ on sähkövuon tiheyden ja vuota kohtisuoraan projisoidun pinta-alan \bar{A} tulo, kaavan 9 mukaisesti. Esimerkkitapaus on esitetty kuvassa 5. (Inkinen, Manninen ja Tuohi 2006, 28)

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E} \quad (8)$$

$$\Psi = \epsilon EA \cdot \cos \theta = \epsilon \bar{E} \cdot \bar{A} \quad (9)$$



Kuva 5 Pinnan lävitse kulkeva sähkövuoto (Inkinen, Manninen ja Tuohi 2006, mukailten)

Jos sähkökenttä ei ole tasainen tai pinta ei ole taso, tulee sähkövuoto ratkaista kaavan 9 yleisestä muodosta, joka on esitetty kaavassa 10. Pinta jaetaan pieniin tasomaisiin alkioihin $d\bar{A}$, jolloin voidaan ajatella sähkökentän olevan tasainen alkion lävitse. Kokonaissähkövuoto on tällöin pintaintegraali pinnan A yli. (Bansal 2006, 8)

$$\Psi = \int_A \epsilon \bar{E} \cdot d\bar{A} \quad (10)$$

Gaussin lain mukaan suljetun pinnan lävitse kulkeva sähkövuoto on sama kuin sen sisällä olevan varauksen suuruus. Kaavassa 11 sähkövuon kaava on johdettu muotoon, jossa sitä on helppo käsitellä. Siirtämällä vakiot integraalin ulkopuolelle integroitavaksi jäävät vain pinta-alkiot, jotka kuvastavat pinnan pinta-alaa. Esimerkiksi pinnan ollessa varausta ympäröivä pallo voidaan kaavaa havainnollisesti yksinkertaistaa. Tämä tulos ei ole riippuvainen pallon säteestä tai pinnan muodosta, vaan on voimassa kaikille suljetuille pinnoille. (Bansal 2006, 8)

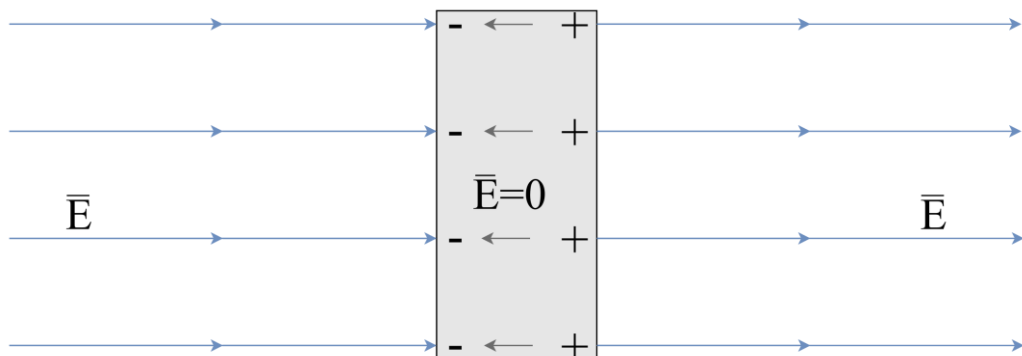
$$\Psi = \oint_A \varepsilon \vec{E} \cdot d\vec{A} = \varepsilon E \oint_A dA \quad (11)$$

$$\Psi = \varepsilon EA = \varepsilon E \cdot 4\pi r^2 = \varepsilon \cdot \frac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot 4\pi r^2$$

$$\Psi = Q$$

3.3 Kappaleet sähkökentässä

Useimmat aineet luokitellaan joko johteiksi tai eristeiksi. Johteet ovat sähköä johtavia kappaleita. Niissä on aina vapaita elektroneja, jotka eivät kuulu yksittäisen atomin elektroniverhoon, vaan voivat siirtää varausta väliaineessa vapaasti. Tuotaessa sähkökenttä johteeseen asettuvat vapaat elektronit asentoon, jossa ne kumoavat sähkökentän vaikutuksen johteen sisällä. Näin ollen johteeseen tuotu varaus siirtyy johteen pinnalle. Tämä voidaan havainnollistaa kuvan 6 tavoin. Kuvassa esitetään johtavaa levyä, johon vaikuttaa staattinen sähkökenttä. Sähkökentän lävistäessä levyä, asettuvat johtimen vapaat elektronit pintaan, josta sähkökentän suunta on ulos. Levyn pintojen varautuessa syntyy levyn sisälle uusi sähkökenttä, joka pyrkii vastustamaan ulkoisen sähkökentän aiheuttamaa muutosta. Tämä sähkökenttä jatkaa kasvuaan, kunnes se saavuttaa tasapainotilan, jossa kokonaissähkökenttä on nolla. (Inkinen, Manninen ja Tuohi 2006, 35-36)



Kuva 6. Sähkökenttä johteen sisällä (Inkinen, Manninen ja Tuohi 2006, mukailten)

Näiden oletusten avulla voidaan päätellä, ettei sähkökenttä vaikuta myöskään johteessa olevissa suljetuissa onkaloissa. Päätelmää voidaan käyttää hyödyksi tilanteessa, jossa halutaan suojata laite ulkoiselta sähkökentältä tai eristää sähkökentän lähde. Käsitettä kutsutaan faradayn häkiksi (Inkinen, Manninen ja Tuohi 2006, 36). Faradayn häkille yleisiä

käyttökohteita ovat herkäät ohjainlaitteet ja sähköisten kulkuneuvojen yhteydessä myös sähköisen voimansiirron komponentit.

3.4 Suojauskyky

Suojaukseen liittyvissä ongelmissa tulee ajatella käsitettä suojauskyky SE (eng. Shielding effectiveness). Suojauskyky määrittää sähkö- tai magneettikentän suhteen mitattuna suojan kanssa ja ilman. Suojauskykyä käsitellään desibeliasteikolla ja se on yksikötön suure. Sen määrittely on esitetty kaavassa 12, jossa E_0 on kentän voimakkuus ilman suojaa ja E_t kentän voimakkuus suojan kanssa. (Bansal 2006, 356)

$$SE = 20 \log \left| \frac{E_0}{E_t} \right| \quad (12)$$

Sähkö- ja magneettikentät voivat läpäistä suojausmateriaalia, mutta suuri osa suojausmateriaalin ohittaneesta säteilystä kuitenkin usein johtuu suojan geometriassa olevista aukkoista muista poikkeamista. Aukot voivat olla jäädytystä tai johtimien läpivientiä varten. Suojauskykyä voi heikentää myös eristeenä toimiva tiiviste, joka erottaa kannen muusta kuoresta sähköisesti ja estää edellä mainitun faradayn häkin muodostumisen. (Bansal 2006, 357)

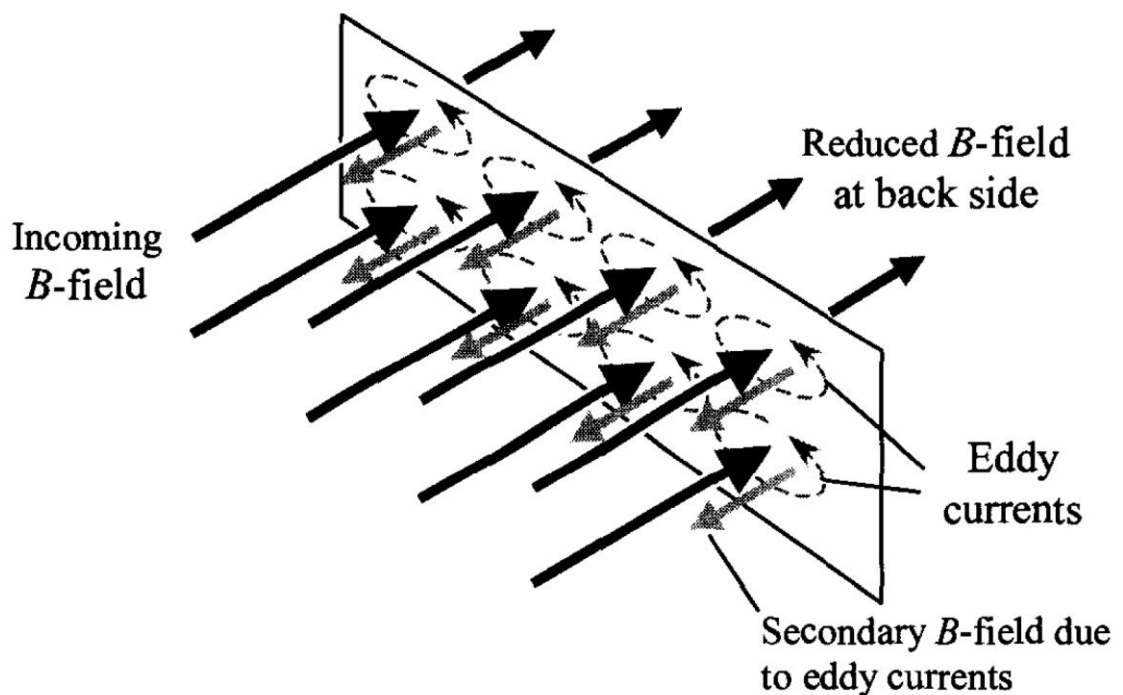
Yksinkertaistettuna reiän vaikutus suojauskykyyn voidaan esittää kaavalla 13, jossa l on yhden reiän pituus, eli pyöreän reiän tapauksessa halkaisija. n on alueella olevien reikien määrä. Esimerkiksi taajuusalueen ollessa 30 MHz tulisi reiän olla alle 16mm halkaisijaltaan, jotta suojauskykyksi saataisiin yli 30dB. Täytyy kuitenkin muistaa, että kyseessä on karkea yleistys. (Bansal 2006, 358)

$$SE = 20 \log \frac{\lambda}{2l\sqrt{n}} \quad (13)$$

$$l = \frac{\lambda}{2 \cdot 10^{\frac{SE}{20}}} = \frac{\left(\frac{2,9979 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{30 \cdot 10^6 \text{ Hz}} \right)}{2 \cdot 10^{\frac{30}{20}}} = 0.0158 \text{ m} \approx 16 \text{ mm}$$

3.5 Pyörrevirrat

Pyörrevirtoja syntyy, kun vaihtuva magneettikenttä lävistää johteen pinnan. Magneettikentän muutos saa varaukset liikkumaan johteessa, eli aiheuttaa sähkövirran. Pyörrevirrat aiheuttavat myös magneettikenttiä, joiden suunta on vastakkainen alkuperäiseen magneettikenttään nähden. Kuvasta 7 ilmiö on helposti hahmotettavissa. Syntyneen magneettikentän voimakkuus riippuu johteen resistiivisyydestä sekä paksuudesta. Jos resistiivisyys on matala ja johde on ohut, magneettikentän voimakkuus on suurempi. (Johnson, Graham 2003. 58-60)



Kuva 7. Pyörrevirtojen synty ulkoisen magneettikentän vaikutuksesta. (Johnson, Graham 2003)

Pyörrevirtoja syntyy myös johtimiin ja niiden ympärillä sijaitseviin johteisiin. Tätä käytetään hyväksi mm. ferriittihelmessä, jonka avulla voidaan vähentää johtimien häiriöitä. Lävistävä magneettikenttä aiheuttaa helmeen sisäistä induktanssia. Ferriittejä käytetään paljon, koska ne ovat edullinen tapa tuoda piiriin resistanssia korkeille taajuuksille aiheuttamatta tasavirtahäviöitä tai ongelmia matalataajuisien signaalien kanssa. Ferriittien käyttö on tehokkainta poistettaessa yli 10 MHz taajuisia häiriösignaaleja. Ferriittejä voidaan käyttää myös yhteissignaalin ja differentiaalisignaalin suodatukseen. (Ott 2009. 226-227)

3.6 Pintailmiö

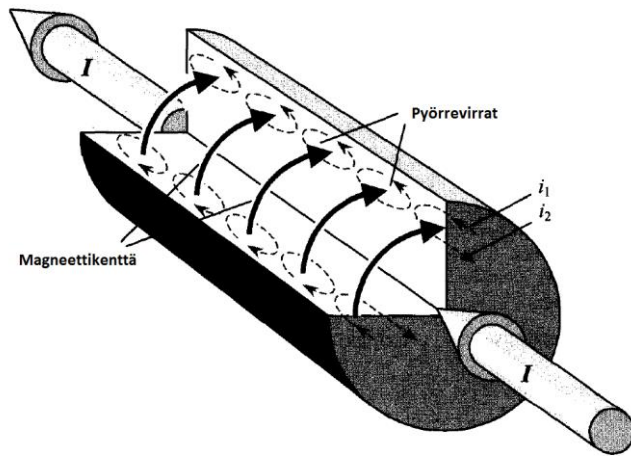
Korkeataajuinen virta ei kulje perinteisessä johtimessa tasaisesti koko johtimen poikkipinta-alalla. Johtimen sisään syntyvät magneettikentät pakottavat sen kulkemaan kapealla alueella ulkopinnassa. Virran kulkupinta-alan pienentyessä vastus johtimessa lisääntyy. Tätä vastuksen nousua kutsutaan pintailmiöksi. Johtimen efektiivisen pinta-alan korkeutta kutsutaan pinnan syvyydeksi. Pinnan syvyydellä voidaan ilmoittaa kuinka syvällä pinnasta johtimessa kulkeva virta voi kulkea. (Johnson, Graham 2003. 58)

Pintailmiön aiheuttaa vaihtovirran kulun seurauksena syntyvät magneettikentät. Virran kulkiessa johdinta pitkin se luo kohtisuoran magneettikentän johtimen ympärille. Tämän magneettikentän muutokset aiheuttavat pyörrevirtoja johtimen sisälle. Kuvassa 8 on esitelty johtimeen syntyviä pyörrevirtoja. Pyörrevirtojen suunta määräytyy magneettikentän suunnasta oikean käden säännön mukaisesti. Nämä pyörrevirrat kulkevat siis pinnassa aina virran kulkusuuntaan. Eli johtimen keskipisteessä pyörrevirrat vastustavat virrankulkua. Taajuuden kasvaessa magneettikenttä ja sen aiheuttamat pyörrevirrat voimistuvat. Pinnan syvyyden alentuessa johtimen sädettä pienemmäksi alkaa johtimen efektiivinen pinta-ala pienentyä, mikä johtaa kasvaneeseen resistanssiin. Pinnan syvyyden ja kasvaneen resistanssin voi laskea kaavalla 14 ja 15. (Johnson, Graham 2003. 58-59)

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (14)$$

$$R = \begin{cases} \frac{l}{\sigma \pi r^2} & \text{jos } r \ll \delta \\ \frac{l}{2r} \sqrt{\frac{\mu f}{\pi \sigma}} & \text{jos } r \gg \delta \end{cases} \quad (15)$$

Kaavassa σ on johtimen materiaalin sähkönjohtavuus ja μ on johtimen permeabiliteetti. r on johtimen säde. Pinnan syvyyden ollessa selkeästi johtimen sädettä suurempi sillä ei ole vaikutusta johtimen resistanssiin. Pinnan syvyyden pienentyessä resistanssista tulee taajuusriippuvainen muuttuvan pinnan syvyyden takia. (Paul 2006, 306)

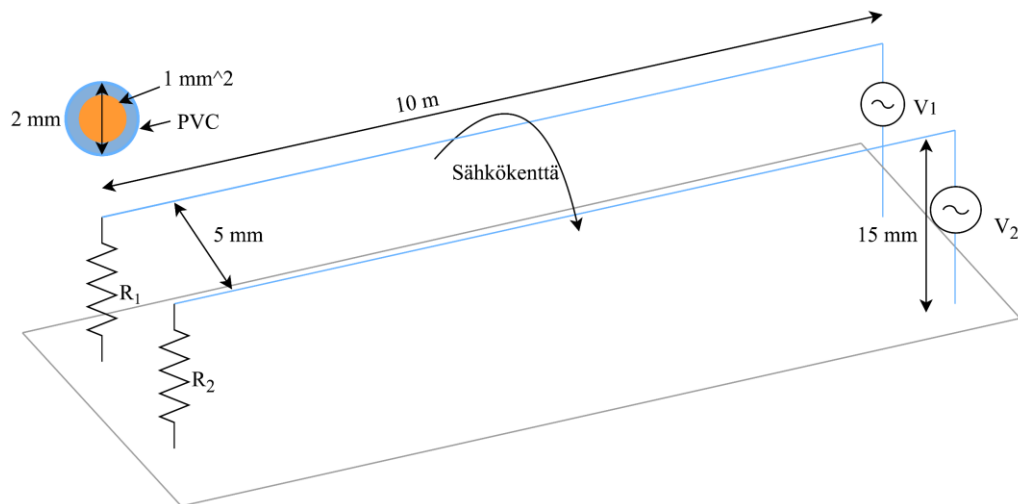


Kuva 8. Johtimessa kulkevan virran aiheuttama magneettikenttä ja pyörrevirrat. (Johnson, Graham 2003, muokattu)

4 KAPASITIIVISEN KYTKEYTYMISEN LASKENTA

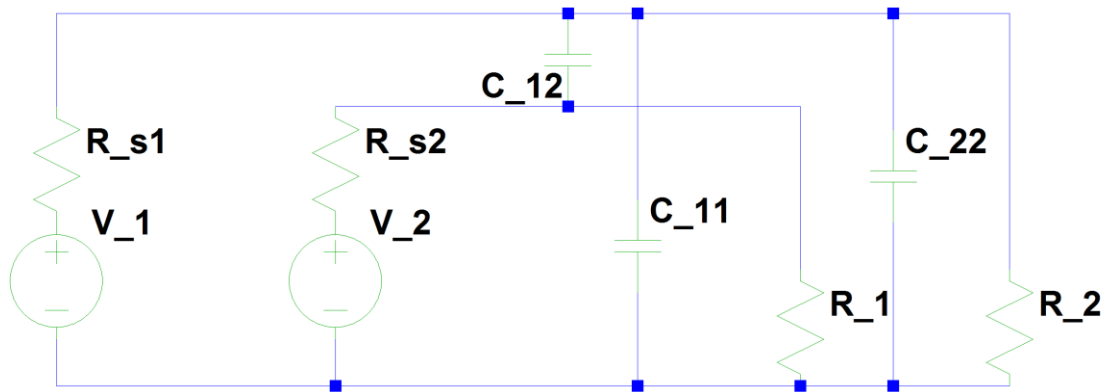
Kapasitiivinen kytkeytyminen tarkoittaa kytkeytymistä sähkökentän avulla. Kytkeytymisreitti on siis kahden johteen välinen kapasitanssi. (Paul 2006, 854)

Tämän luvun tarkoituksena on tutustua johtimien väliseen kytkeytymiseen, sekä siihen vaikuttaviin materiaaliominaisuuksiin. Ratkaistavassa ongelmatilanteessa on kaksi johdinta, joista toisessa kulkee siniaalto. Tarkoituksena on tutkia häiriötä kuljettavan johtimen vaikutusta sen lähellä sijaitsevaan vastaanottavaan johtimeen. Ongelmatilanne on kuvattu kuvassa 9. Luvussa esitellään käsin laskentaa, sekä siitä varten tehtäviä yksinkertaistuksia. Käsin laskennan tuloksia ja yksinkertaistuksien vaikutusta vertaillaan SPICEllä simuloitujen virtapiirien avulla.



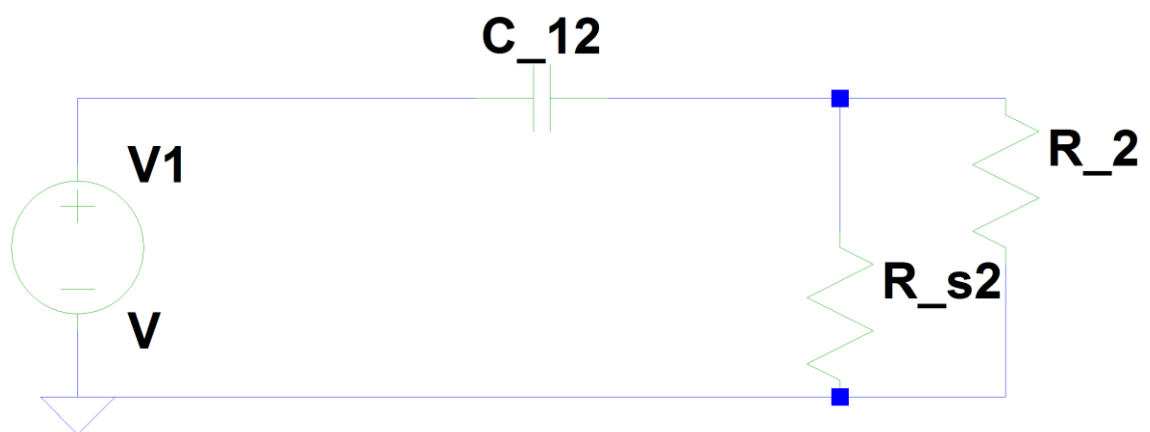
Kuva 9. Edellä ratkaistavan ongelman hahmotuskuva.

Kahden johtimen välille luodaan ekvivalentti virtapiiri, jolla on samat sähköiset ominaisuudet, kuin oikealla järjestelmällä on. Järjestelmässä kapasitanssia syntyy johtimien välille, sekä johtimien ja maatasen välille. Täten kuvan 10 ekvivalenttipiiri vastaa kuvassa 9 esitettyä piiriä. Piirissä R_s kuvaa jännitelähteiden impedansseja. C ovat kapasitansseja ja R ovat piirin terminointivastuksia. (LearnEMC 2018)



Kuva 10. Ekvivalenttipiiri kahden kapasitiivisesti kytkettyneen johtimen välillä

Kuten kuvasta nähdään, tulee yksinkertaisesta kahden johtimen tapauksesta yhdeksän komponentin laajuinen ongelma. Tämän ratkaiseminen on aikaa vievää, joten sitä kannattaa pyrkiä yksinkertaistamaan. Johtimien ja tasopinnan väliset kapasitanssit voidaan jättää usein huomioimatta, koska niiden impedanssit ovat usein huomattavasti suuremmat kuin muulla järjestelmällä. Lähettävän virtapiirin vastukset ja impedanssit voidaan jättää huomioimatta, jos kytketyminen ei kuormita niitä merkittävästi ja jännite vastuksen R_1 ylitse pysyy muuttumattomana riippumatta vastaanottavasta piiristä. Täten kuvassa 10 esitetty virtapiiri supistuisi kuvassa 11 esitettyyn muotoon, jossa ovat ainoastaan häiritsevän virtapiirin jännitelähde, johtimien väliset kapasitanssit sekä vastaanottavan piirin vastukset. Kuvassa 11 R_{s2} ja R_2 ovat vastaanottavan piirin resistansseja ja C_{12} on johtimien välinen kapasitanssi. (LearnEMC 2008)



Kuva 11. Yksinkertainen ekvivalenttipiiri johtimien välille.

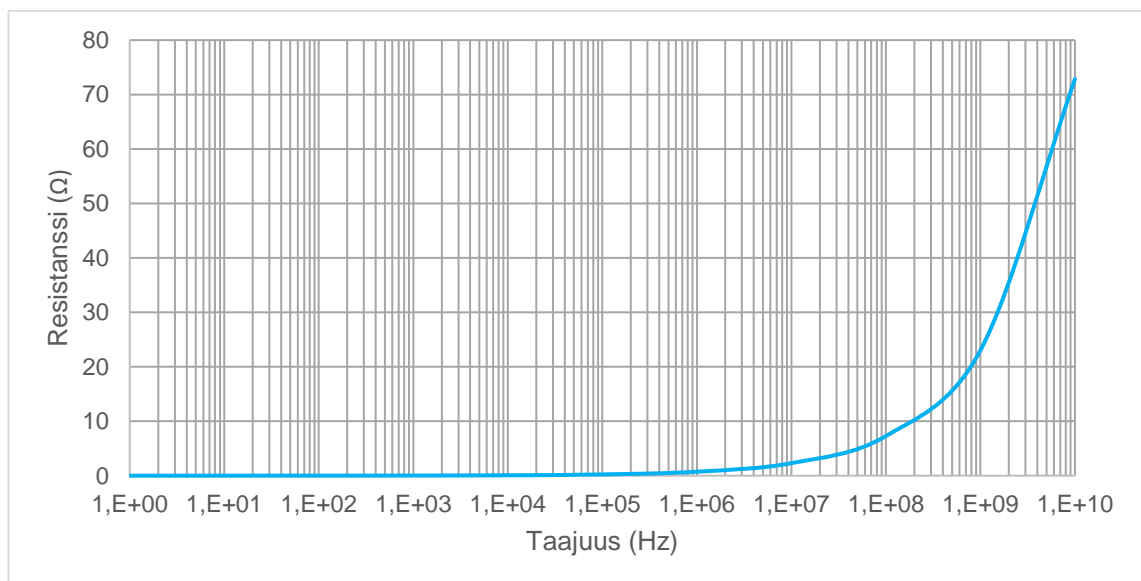
4.1 Johtimien resistanssi

Johtimen resistanssin voi laskea sijoittamalla lukuarvot aikaisemmin esitettyihin kaavoihin 14 ja 15. Esimerkkisijoitukset on esitetty kaavoissa 16 ja 17 Jos itse johtimen resistanssi on huomattavasti alhaisempi kuin muut johtimeen kytketyt vastukset, ei sen laskeminen ole tarpeellista. (Paul 2006, 306)

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot 1,5 \cdot 10^9 \text{ Hz} \cdot 1,2566 \cdot 10^{-6} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 5,8 \cdot 10^7 \frac{\text{S}}{\text{m}}}} = 0,54 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad (16)$$

$$R = \frac{10 \text{ m}}{2 \cdot 0,57 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \sqrt{\frac{1,2566 \cdot 10^{-6} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 1,5 \cdot 10^9 \text{ Hz}}{\pi \cdot 5,8 \cdot 10^7 \frac{\text{S}}{\text{m}}}} = 89,2 \Omega \quad (17)$$

Johtimen resistanssi on taajuusriippuvainen, joten se täytyy määrittää kaikille tarkasteltaville taajuuksille erikseen. Kuvassa 12 on esitetty kyseisen tapauksen johtimen resistanssi taajuuden funktiona.



Kuva 12. Johtimen resistanssin riippuvuus taajuudesta.

Kuvaajasta voidaan nähdä taajuuden kasvaessa nouseva resistanssi. Johtimen resistanssin vaikutus alkaa olemaan huomattava yli 100 MHz taajuuksilla ja se tulee huomioida laskelmissa.

4.2 Johtimien välinen kapasitanssi

Kapasitanssi johtimien välissä voidaan yksinkertaistaa johtimen pituutta kohden, kunhan voidaan olettaa sähkökentän jakautuvan tasaisesti johtimeen. Kapasitanssi voidaan laskea yhtälön 18 mukaan, jossa ϵ_r on väliaineen relatiivinen permittiivisyys. (Paul 2006, 309.) Yksi tavallisimmista johtimen eristeistä on PVC eli polyvinyylidikloridi. Sen suhteellinen permittiivisyys on 3,5 (Paul 2006, 303). Johtimien etäisyyden ollessa moninkertainen eristeen paksuuteen verrattuna voidaan se jättää huomioimatta laskuissa. Tässä tapauksessa johtimien etäisyyden ollessa vain 5 mm lasketaan tuolle välimatkalle relatiivisen permittiivisyyden keskiarvo.

$$\frac{C}{l} = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln \left(\frac{d}{2 \cdot r} + \sqrt{\left(\frac{d}{2 \cdot r} \right)^2 - 1} \right)} \quad (18)$$

$$C_{12} = \frac{10\text{m} \cdot \pi \cdot (8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}) \cdot \left(\frac{4 + (1 \cdot 3,5)}{5} \right)}{\ln \left(\frac{0,005\text{m}}{2 \cdot 0,00057\text{m}} + \sqrt{\left(\frac{0,005\text{m}}{2 \cdot 0,00057\text{m}} \right)^2 - 1} \right)} = 185,33 \text{ pF}$$

Johtimen ja maatason välisen kapasitanssin voi määrittellä kaavalla 19, jossa d_w on johtimen etäisyys johtavasta pinnasta. Kuten jo aiemmin mainittiin, tämän kapasitanssin voi jättää usein huomioimatta, sillä sen impedanssi on yleensä suuri verrattuna muuhun piiriin. Tässä tapauksessa taajuuden ollessa korkea on impedanssi hyvin alhainen. Kapasitanssia ei siis voida jättää toistaiseksi huomioimatta. Kapasitanssin synnyttävä impedanssi voidaan laskea kaavalla 20.

$$C_{11} = C_{22} = \frac{l \cdot 2\pi \cdot \varepsilon_0}{\cosh^{-1}\left(\frac{d_w}{r}\right)} \quad (19)$$

$$C_{11} = \frac{10\text{m} \cdot 2\pi \cdot 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}}{\cosh^{-1}\left(\frac{15\text{mm}}{0,57\text{mm}}\right)} = 140,38\text{pF}$$

$$Z_c = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (20)$$

$$Z_{c12} = \frac{1}{9,4248 \cdot 10^{10}\text{Hz} \cdot 185,33 \cdot 10^{-12}\text{F}} = 0,0573\Omega$$

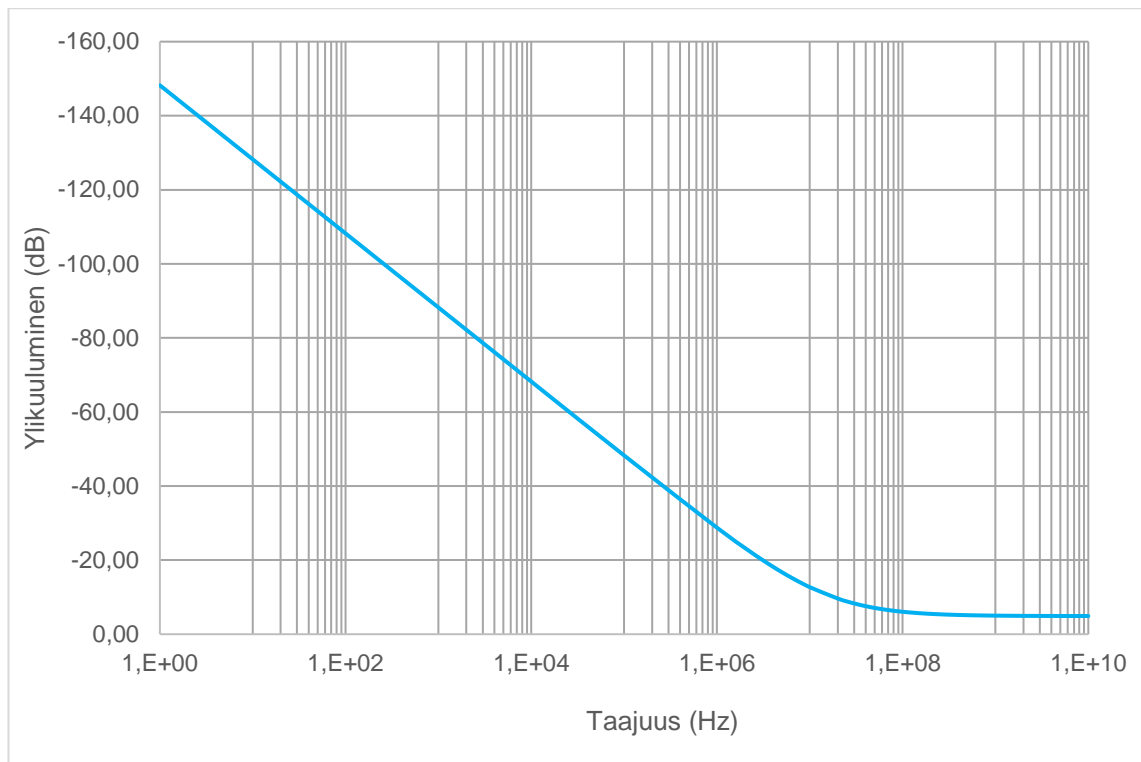
$$Z_{c22} = \frac{1}{9,4248 \cdot 10^{10}\text{Hz} \cdot 140,38 \cdot 10^{-12}\text{F}} = 0,0756\Omega$$

Nyt piirin laskennan kannalta merkittävimmät komponentit on selvitetty. Vastaanottajan ja häiriön lähettäjän välille lasketaan suhde, jolla kytketyminen tapahtuu. Tämä arvo ei ole sidoksissa kummankaan piirin jännitetasoon ja on sen takia parempi kuvaamaan monia tilanteita. Suhde lasketaan kaavalla 21 (LearnEMC 2018). Lukuarvot esitetään usein desibeliasteikolla, koska lukuarvojen suuruudet vaihtuvat taajuuden funktiona suuresti. Tulokset ovat esitetty kuvassa 13. Laskenta on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 1.

$$20 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{\left(\frac{1}{R_{s2}} + \frac{1}{R_2 + R_w} + \frac{1}{Z_{c22}}\right) \cdot \left(\left(\frac{1}{\frac{1}{R_{s2}} + \frac{1}{R_2 + R_w} + \frac{1}{Z_{c22}}}\right) + Z_{c12}\right)} \right) = 20 \cdot \log_{10} \left| \frac{V_1}{V_2} \right| \quad (21)$$

$$20 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{\left(\frac{1}{50\Omega} + \frac{1}{100\Omega + 89,2\Omega} + \frac{1}{0,0756}\right) \cdot \left(\left(\frac{1}{\frac{1}{50\Omega} + \frac{1}{100\Omega + 89,2\Omega} + \frac{1}{0,0756}}\right) + 0,0573\Omega\right)} \right)$$

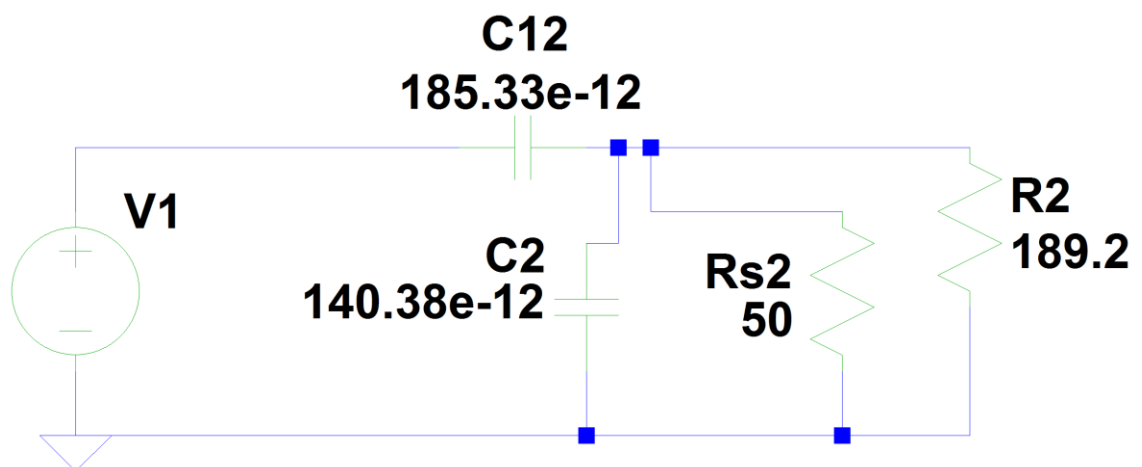
$$= -4,91\text{dB}$$



Kuva 13. Ylikuuluminen taajuuden funktiona

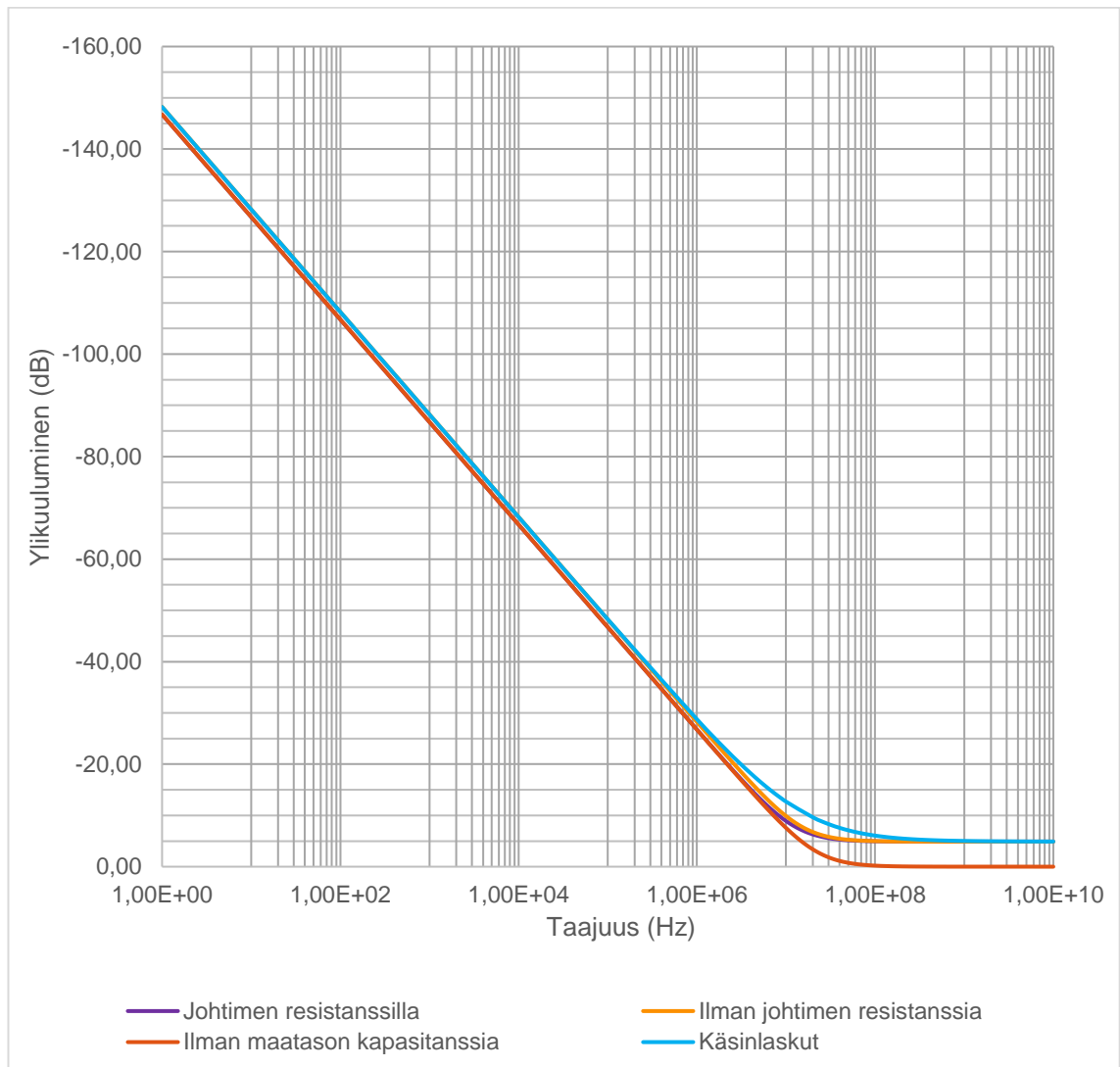
4.3 Tuloksien vertailua

SPICEllä voidaan tarkastaa tulokset sekä tutkia helposti tehtyjen yksinkertaistuksien vaikutuksia tuloksiin. Käsins laskettu piiri vastaa kuvassa 14 esitettyä piiriä, paitsi johtimen resistanssin osalta, joka on sama koko taajuusalueen. Tämän piirin simulaatiosta saatuja kuvaajaa voimme verrata käsins laskettuihin arvoihin.



Kuva 14. SPICEllä simuloitu virtapiiri, joka perustuu käsins laskettuihin arvoihin.

Laskennan eri vaiheissa tehtiin yksinkertaistuksia. SPICellä yksinkertaistukset eivät ole tämän kokoluokan piireissä laskentatehojen osalta ongelma, joten myös piirit ilman yksinkertaistuksia simuloitiin. Tuloksien vertailu on esitetty kuvassa 15. Siitä pystytään havaitsemaan johtimen resistanssin ja maatasen välille syntyvän kapasitanssin vaikutus tuloksiin. Kuvaajat ovat todella lähekkäin toisiaan n. 10 MHz asti. Juuri tuossa kohdassa voimme havaita johtimen 90Ω resistanssin aiheuttaman vaikutuksen. Se on erittäin pieni. Tämän pohjalta pystymme päättämään, että sen olisi voinut jättää huomioimatta laskelmissa. Hieman enemmän eroa syntyi, jos maatasen ja johtimen välinen kapasitanssi jätetään huomioimatta. Tässäkin eron suuruus 1 MHz matalammilla taajuuksilla on vain marginaalinen.



Kuva 15. Tuloksien vertailua.

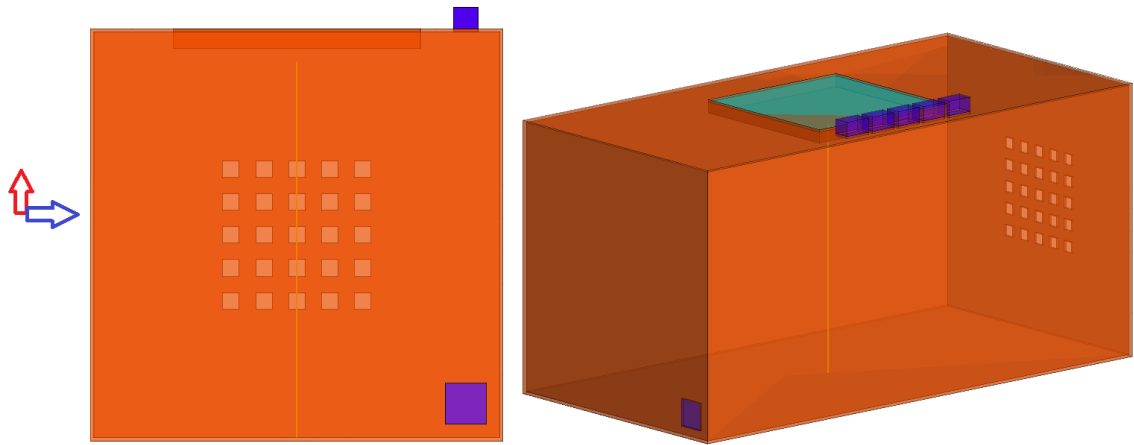
Tuloksia vertailtaessa voidaan todeta laskennan onnistuneen. Kuitenkin todellisuudessa vastaavan tapauksen laskenta olisi hankalampaa, koska johtimet eivät välttämättä pysy vakioetäisyydellä toisistaan koko pituutensa matkalla. Kytkeytymisiä saattaa syntyä moniin eri paikkoihin, ja kytkeytymisreitin resistanssia voi olla hankala arvioida. Tätä varten on kehitetty ohjelmistoja, jotka jakavat johtimet pieniin osiin, jolle suoritetaan samat laskennat edellä esitetyllä tavalla. Näiden palasien määrä saattaa pitkällä hankalan muotoisilla johtimilla nousta nopeasti satoihin tai tuhansiin segmentteihin. Näiden käsin laskenta voi tulla hyvinkin työlääksi.

5 SUOJAUSKYVYN SIMULOINTI

Kotelon suojauskyvyn simulointi on luonteva tapa aloittaa laitteen mahdollisten EMC ongelmien kartoittaminen tuotekehityksen alkuvaiheissa, jos itse koteloinnin sisälle tulevasta laitteistosta ei ole vielä tarkkaa tietoa. Hyvä lähtökohta on kuitenkin tietää millaisilla taajuusalueilla mahdolliset häiriöt ovat. Kotelon suojauskyvyn simulointi antaa mahdollisuuden löytää taajuuksia, joissa koteloinnin suojauskyky on puutteellinen. Näiden puutteellisten suojauksien ja tiedossa olevien häiriötaajuuksien ei tulisi kohdata. Simulointi on tärkeää suorittaa tuotekehityksen vaiheessa, jossa geometrian muutokset ovat vielä helposti tehtävissä. Jos häiriönlähde on myös osa tuotekehitysprosessia, suojauskyvyn tarkastelulla voidaan arvioida, mitä taajuuksia herkästi häiritsevissä komponenteissa tulisi välttää.

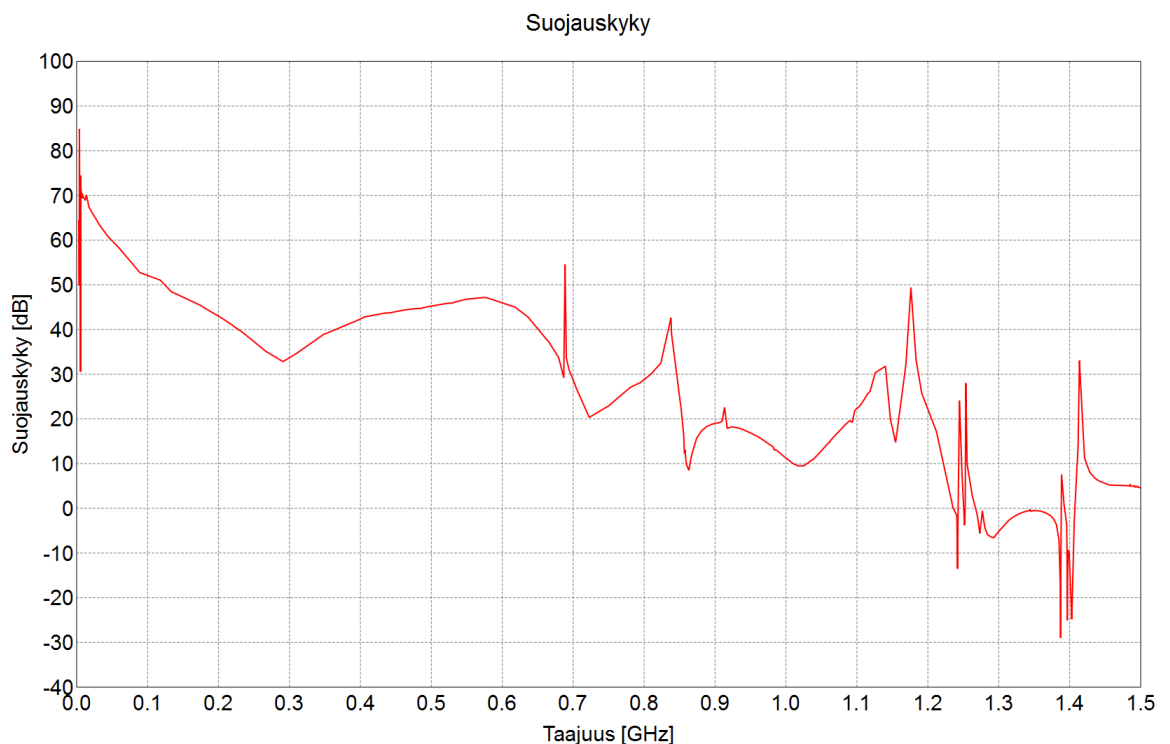
Suojauskykyä simuloitaessa voidaan ongelmaa lähestyä kahdella eri tavalla: Asettamalla lähde kotelon sisälle tai sen ulkopuolelle. Todellisessa tilanteessa tällä ei olisi vaikutusta tuloksiin, mutta laskentaan käytettävät yksinkertaistukset voivat vaikuttaa tuloksiin (Johns D, Girard G). Johns ja Girard ovat tutkineet näiden kahden simulointitavan tuloksia ja verranneet niitä mitattuihin tuloksiin. Heidän julkaisussaan Predicting Shielding Effectiveness käy ilmi, ettei tuloksissa ollut eroja merkitsevässä. He simuloivat yksinkertaisen mallin, sekä suorittivat käytännön mittauksia vastaavalle kappaleelle.

Malliksi rakennettiin yksinkertainen kotelo, jossa on muutama näppäin, näyttö, johtimien läpivienti ja jäähdytysaukot. Mallin sisälle asetettiin monopoliantenni ja säteilyn lähteeksi asetettiin tasoaalto, jonka voimakkuus on $1 \frac{V}{m}$. Ensimmäiseksi simuloitiin malli, jossa oli pelkästään monopoliantenni. Siitä saatuja tuloksia käytetään referenssiarvona malliin, jossa myös kotelo on läsnä. Kun referenssiarvot oli saatu, lisättiin simulointimalliin kotelointi suojaamaan monopoliantennia. Muut simuloinnin parametrit pidettiin samoina, jotta tulokset olisivat verrattavissa toisiinsa. Kotelo on esitetty kuvassa 16. Kotelon äärimittat ovat 500x250x250 mm ja seinämän paksuus 2 mm. Kotelon seinämät oletettiin täydellisesti sähköä johtavaksi materiaaliksi. Kuvassa antenni on näkyvissä himmeästi kotelon keskivaiheilla. Näppäimet ja kotelon vasemmalla reunalla oleva läpivienti ovat PVC-muovia.



Kuva 16. Simuloinneissa käytetty malli. Mitattava antenni on sijoitettu kotelon sisälle.

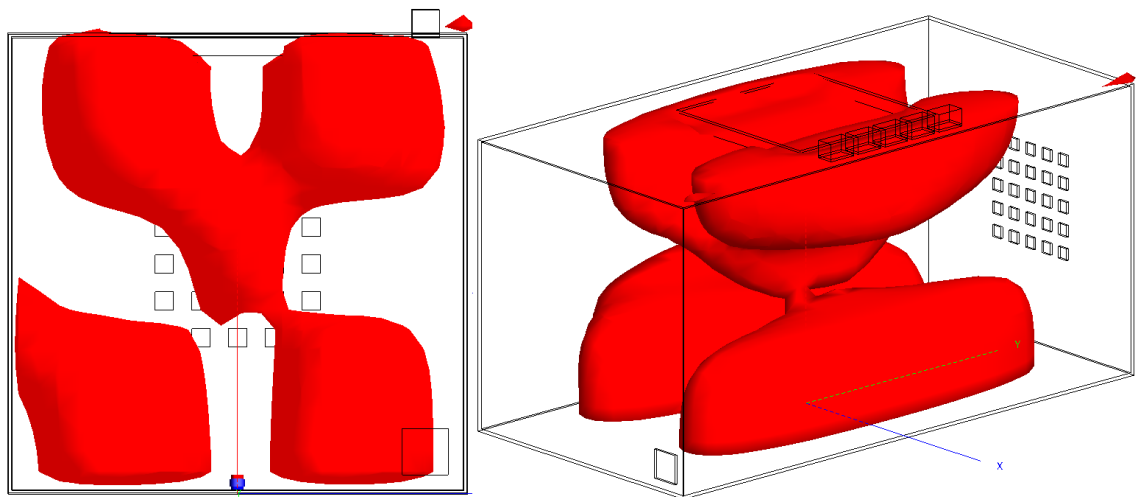
Yksi tasoalto ei kuvaa kaikkia eri suuntaisia sähkökenttiä, vaan simulaatioajot pitää tehdä erisuuntaisille aalloille erikseen. Yksinkertaistuksen vuoksi tulokset simuloitiin vain yhdestä suunnasta, sillä karkean tuloksen pystyy jo päättelemään niistä. Simulaatioajosta tarkoituksena on löytää taajuudet, joilla ongelmat syntyvät. Simuloinnin tasoalto lähestyy antennia kotelon takaa kuvassa 16 esitetyllä tavalla. Kuvassa 17 on esitetty kotelon suojauskyky taajuuden funktiona. Tarkemmat tulokset on esitetty liitteissä 2 ja 3. Tuloksista on helppo havaita, että suojauskyky laskee taajuuden noustessa. Tuloksissa näkyy myös yksittäisiä piikkejä. Nämä ovat taajuusalueita, joita tulisi välttää. Tuloksista pystytään yleisesti toteamaan hyvä suojauskyky alle 850 MHz taajuuksilla.



Kuva 17. Kotelon suojauskyky taajuudenfunktiona.

Jos häiriön taajuus on erittäin kapealla alueella, saattaa suojaus riittää myös 1,1-1,2 GHz taajuudella. Suojauskyvyn riittävyttä ei pystytä täysin toteamaan, sillä suojauskyky on vaimennuskerroin. Jotta arviointi olisi mahdollista, täytyisi lähettimen tehokkuus ja määrätty raja-arvo olla tiedossa. Tuloksista voidaan myös huomata, että kotelo ei vaimenna säteilyä kaikilla taajuuksilla, vaan päinvastoin vahvistaa sitä 1,3-1,4 GHz alueella. Tämä on mahdollista, jos häiriö osuu kotelon resonanssitaajuudelle. Aallonpituus 1,2 GHz taajuudella on n. 250 mm. Kotelon mittojen ollessa jaollinen sillä, viittaa resonanssin syntymiseen.

Ensimmäisestä simulaatioista ei pyydetty lähikenttätietoa, jotta laskenta-aikaa saataisiin säästettyä. Kun ongelmat olivat paikannettu, simulaatio ajettiin uudestaan, mutta huomattavasti kapeammalle taajuusalueelle. Tämä mahdollisti tarkan lähikenttätietojen simuloinnin, jolloin saimme 2D- ja 3D-kenttä kuvaajan, josta on helppo silmämääräisesti arvioida säteilyn vuotokohtia. Lopulliselle mallille määritettiin säteilyn voimakkuutta mukaileva 3D-pinta 1,3875 MHz taajuudelle. Määritetty pinta on esitetty kuvassa 18. Se sulkee alueen, jossa sähkökentän voimakkuus on vähintään 30% sen suurimmasta arvosta. Tälle alueelle elektroniikkaa ei kannata sijoittaa. Pintakuvaaja toimii selkeänä ja yksiselitteisenä ohjeena mekaniikkasuunnittelijalle.



Kuva 18. 70% häiriön voimakkuudesta kattava pintakuvaaja 1,3875 MHz taajuudella.

6 YHTEENVETO TYÖSTÄ

Aloittaessani opinnäytetyön tekemisen minulla ei ollut koulutustaustaa aiheesta. Muun työn ohella oli tarkoitus selvittää EMC-simulointeihin tarvittavia parametrejä ym. lähtötietoja, jotta simulaatiot onnistuisivat. EMC-simulaatioiden mahdollisuuksia oli tarkoitus tutkia eritoten sähköisten ajoneuvojen ja niiden akustojen läheisyydessä. Tiedon hankkiminen osoittautui hankalaksi, sillä suurin osa saatavilla olevasta kirjallisuudesta oli vanhaa. Fysiikka ja teoria ilmiöiden takana ei ole muuttunut, mutta simulaatio-ohjelmistot ja tietokoneet ovat kehittyneet paljon viimeisen vuosikymmenen aikana. Vuonna 2006 kirjoitettu kirja ei vain ole enää ajan hermolla. Simuloinneista löytyy paljon markkinointimateriaalia sekä julkaisuita, mutta näissä ei kuvata tarkasti itse mallin rakennuksessa tehtyjä yksinkertaistuksia ja mallintamistapoja, joiden avulla tulokset olisivat toistettavissa. Johnson ja Graham käsittelevät EMC-suunnittelua kirjassaan tavalla, johon pystyn samaistumaan: *Laita kenet tahansa kolme EMC-spesialistia samaan huoneeseen arvioimaan designiasi ja pyydä heitä päättämään yhdessä, mikä suunnittelussasi on suurin virhe. Älä pidä siitä seurannutta tappelua osoituksena heidän huonosta ammattitaidostaan, vaan hyväksy se merkinä ongelman vaikeudesta* (Johnson, Graham 2003. 697). Etsiessäni yleistä tietoa huomasin monessa lähteessä asioiden painotuksien vaihtuvan voimakkaasti. Myös yksityiskohtaisten syy–seuraussuhteiden löytäminen kirjallisuudesta ja julkaisuista tuntui hankalalta.

Simulointisovelluksissa perusasioiden tekeminen tuntui helpolta ja koulutusmateriaalia oli tarjolla, mutta ne kattoivat lähinnä antennien simuloimista. Sama teoria ja fysiikka ovat kyseessä antennien toiminnassa ja EMC:ssä, mutta EMC-suunnittelua tehdessä ei vielä tiedetä missä tai mikä osa tuotteesta toimii antennina. EMC aiheena tarkoittaa tahattomien antennien etsimistä ja niiden toimintakyvyn heikentämistä. Jotta mahdollisten ongelmakohtien löytäminen olisi mahdollista, tarvitsee niiden etsijä paljon kokemusta ja tietoa sähkötekniikasta. Ongelmakohtien löydyttyä on helpompi lähteä kohdentamaan resursseja niiden ratkaisemiseksi. Lähtötietojen saaminen vaikutti myös hankalalta. Tuotekehityksen kohteen ollessa pieni osa suurempaa järjestelmää, on mielestäni tärkeä tuntea tarkasti järjestelmän muut komponentit. Varsinkin akuston tapauksessa suurimmat häiriöt kulkeutuvat sinne inverttereiltä tai muuntajilta. Jos näiden komponenttien aiheuttamia häiriöitä johtimissa ei tunneta, on omasta tuotteesta hankala tehdä hyvin suojattu juuri

näitä häiriöitä vastaan. Parhain lopputulos saataisiin, jos tiedettäisiin lähtökohtaisesti, miltä ollaan suojautumassa.

Tätä työtä tullaan mahdollisesti jatkamaan, EMC-tietotaitoa aiotaan kasvattaa lisääntyneen kysynnän johdosta. Seuraavaksi tavoitteena on ottaa tarkemmin selvää standardeissa määrättyistä mittaustavoista ja mahdollisuuksista korvata mittaukset simulaatioilla. Myös mallien mahdollisia validointeja suoritetaan ja mittauksia pyritään suorittamaan itse, jotta kaikki sen toimenpiteet tulisivat tutuiksi. Tavoitteena on myös kartoittaa mahdollisten mittalaitteiden tarvetta ja mahdollista hankintaa.

LÄHTEET

Bansal R. 2006. Fundamentals of Engineering Electromagnetics. Yhdysvallat: Taylor & Francis Group LLC.

Bosch. 2014. Automotive Handbook. Saksa: Robert Bosch GmbH.

Futter P. 2017. Simulation in EMC. Interference technology. Luettu 14.05.2017.
<https://interferencetechnology.com/simulation-in-emc/>

Graham M. & Johnson H. 2003. High-Speed Signal Propagation Advanced Black Magic. Yhdysvallat: Pearson Education Inc.

Inkinen P., Manninen R. & Tuohi J. 2012. Momentti 2. 2.painos. Suomi: Otava.

LearnEMC. Electric-Field Coupling. Luettu 01.05.2018.
<https://learnemc.com/electric-field-coupling>

Mäkelä M., Soininen L., Tuomola S. & Öistämö J. 2014. Tekniikan kaavasto. 13.painos. Suomi: Tammertekniikka.

Ott H. 2009. Electromagnetic Compatibility Engineering. Yhdysvallat: John Wiley & Sons Inc.

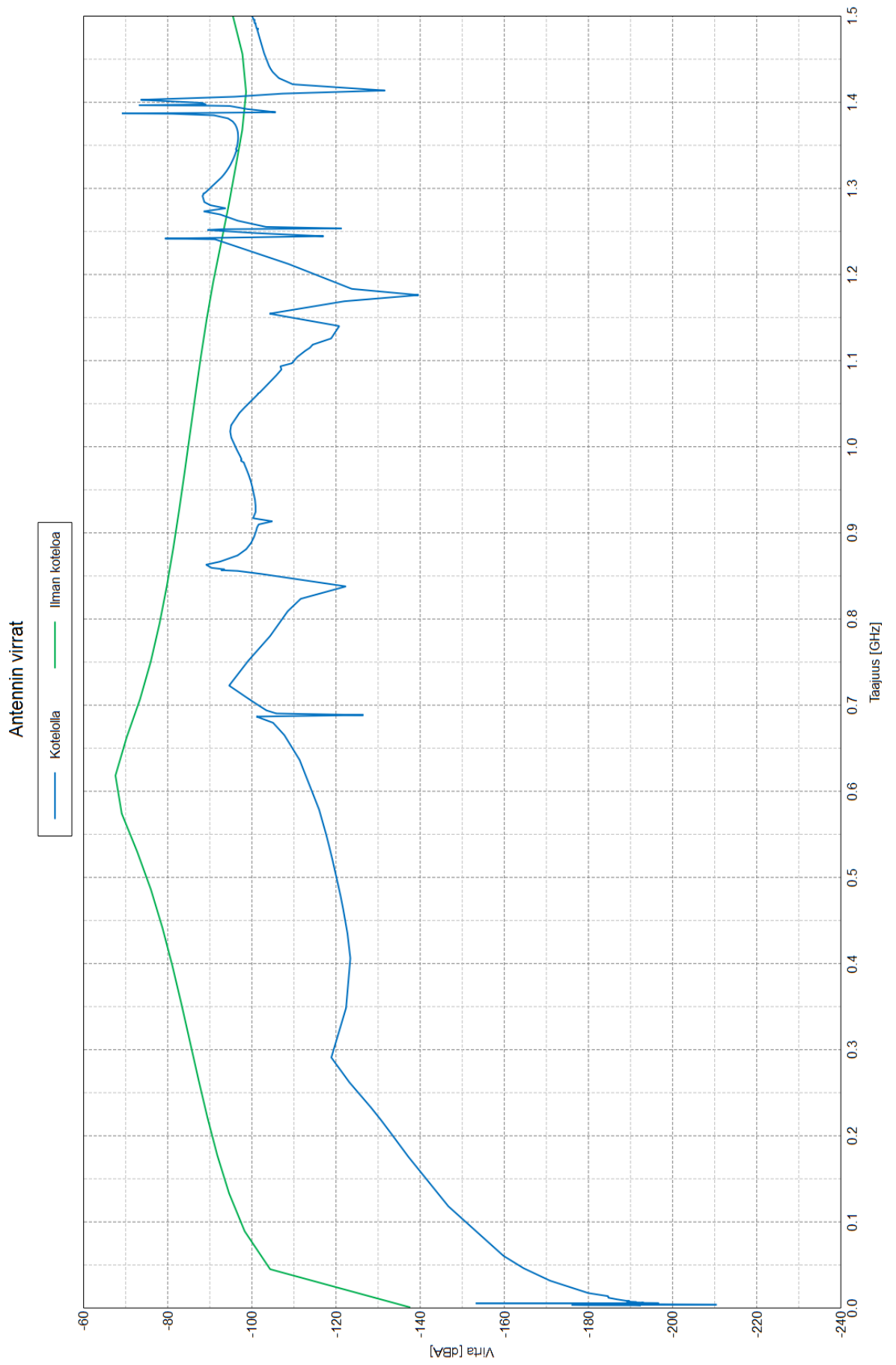
Paul C. 2006. Introduction to Electromagnetic Compatibility. 2. painos. Yhdysvallat: John Wiley & Sons Inc.

LIITTEET

Liite 1. Kapasitiivisen kytkeytymisen laskenta

| | |
|---|---|
| Johtimien välinen etäisyys | Etäisyys johtavasta pinnasta |
| $d := 5 \text{ mm}$ | $d_w := 15 \text{ mm}$ |
| $l := 10 \text{ m}$ | |
| $r := 0,57 \text{ mm}$ | |
| $f := 15 \cdot 10^9 \text{ Hz}$ | |
| $t := \frac{1}{f} = 6,6667 \cdot 10^{-11} \text{ s}$ | |
| $R_2 := 100 \Omega$ $R_{s2} := 50 \Omega$ | |
| Materiaalin sähkönjohtavuus (Kupari) | |
| $\sigma := 5,8 \cdot 10^7 \frac{\text{S}}{\text{m}}$ | |
| $\delta := \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot f \cdot \pi \cdot \sigma}} = 0,5396 \mu\text{m}$ | $A := \pi \cdot r^2 = 1,0207 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ |
| $R_w := \frac{l}{2 \cdot r} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot f}{\pi \cdot \sigma}} = 89,2189 \Omega$ | Älä huomioi, jos $r \gg \delta$ $R_w := \frac{l}{\sigma \cdot A} = 0,1689 \Omega$ |
| Permittiivisyyden keskiarvo | |
| $\varepsilon := \frac{(3,19 \varepsilon_0 \cdot 1 + \varepsilon_0 \cdot 4)}{5} = 1,2732 \cdot 10^{-11} \frac{\text{F}}{\text{m}}$ | PVC permittiivisyys $\varepsilon_{\text{PVC}} := 3,19 \varepsilon_0 = 2,8245 \cdot 10^{-11} \frac{\text{F}}{\text{m}}$ |
| Johtimien välinen kapasitanssi | |
| $C := \frac{\pi \cdot \varepsilon \cdot l}{\ln\left(\frac{d}{2 \cdot r} + \sqrt{\left(\frac{d}{2 \cdot r}\right)^2 - 1}\right)} = 185,33 \text{ pF}$ | Yksinkertaistettu $C := \frac{l \cdot \pi \cdot \varepsilon}{\ln\left(\frac{d}{r}\right)} = 184,1986 \text{ pF}$ |
| Johtimen ja maatasen välinen kapasitanssi | |
| $C_m := \frac{l \cdot 2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}{\text{arch}\left(\frac{d_w}{r}\right)} = 140,3814 \text{ pF}$ | |
| Kulmataajuus | |
| $\omega := 2 \cdot \pi \cdot f = 9,4248 \cdot 10^{10} \text{ Hz}$ | |
| Johtimien välisen kapasitanssin impedanssi | |
| $Z_{Cv} := \frac{1}{\omega \cdot C} = 0,0573 \Omega$ | |
| Johtimen ja maatasen välisen kapasitanssin impedanssi | |
| $Z_{Cmv} := \frac{1}{\omega \cdot C_m} = 0,0756 \Omega$ | |
| Suojauskyky | |
| $SE := \left(20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\frac{1}{\frac{1}{R_2 + R_v} + \frac{1}{R_{s2}} + \frac{1}{Z_{Cmv}}}}{\left(\frac{1}{\frac{1}{R_{s2}} + \frac{1}{R_2 + R_v} + \frac{1}{Z_{Cmv}}} \right) + Z_{Cv}} \right) \right) = -4,9049 \text{ dB}$ | |

Liite 2. Suojauskyvyn simuloinnilla saadut virrat antennissa.



Liite 3. Suojauskyvyn simulointitulokset

