

Jori Ala-Aho

TASASUUNTAUSPIIRIN IMPEDANSSISOVITUS RADIOTAAJUUKSILLA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastajat: Mikko Heino ja Taneli Riihonen
05/2021

TIIVISTELMÄ

Jori Ala-Aho: Tasasuuntauspiirin impedanssisovitus radiotaajuuksilla
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikka
05/2021

Langaton energiansiirto on yhä yleistyvää ja yksi sen tekniikoista on radiotaajuinen energiansiirto, jossa energia siirtyy radiotaajuisten sähkömagneettisten aaltojen avulla. Tässä työssä tutkitaan radiotaajuisten energian vastaanotinlaitteistossa tarvittavaa RF-DC-tasasuuntauspiiriä sekä tämän piirin impedanssisovitusta. Impedanssisovitus toteutetaan Powercast PCC110-RF-DC-tasasuuntauspiirille, joka sovitetaan toimimaan vapaassa käytössä olevalla SRD860-kaisalla, jonka keskitaajuus on 868 MHz:ä.

Työ koostuu teoria- ja tutkimusosasta. Teoriaosassa käsitellään aluksi yleisesti erilaisia langattoman energiansiirron tekniikoita. Käsiteltäviä tekniikoita ovat lähialueen tekniikat: induktiivinen, resonoiva induktiivinen ja kapasitiivinen kytketyminen. Tämän lisäksi työssä tarkastellaan kaukoalueen tekniikoita: radiotaajuista energiansiirtoa ja lasereita hyödyntävää energiansiirtoa. Tämän jälkeen teoriaosassa käsitellään impedanssisovitusta ja erilaisia sovituspirejä, minkä tarkoituksena on valita sopiva piirityyppi työn tutkimusosaan. Sovituspiirin tarkoituksena on parantaa vastaanotinpiirin sovitushyötysuhdetta, mikä käytännössä tarkoittaa sitä, että suurempi osa vastaanotinpiiriin syötetystä tehosta saadaan siirtymään tasasuuntauspiirille. Sovituspiirityypiksi valikoitui yhden resonanssin L-sovituspieri. Se on piiritopologia, jossa on kaksi komponenttia, toinen sarjassa ja toinen rinnan. Kumpikin komponentista voi olla kela tai kondensaattori. Se on yksinkertainen toteuttaa ja sillä saadaan piiri sovitettua toimimaan tietyllä taajuudella niin, että teoriassa koko syötetty teho siirtyy PCC110-piirille.

Tutkimusosassa suunnitellaan sovituspieri mittaamalla ensin sovitettavan PCC110-piirin impedanssi eri syöttötehoilla. Tämän jälkeen valitaan sopiva sovitustopologia erilaisten L-sovituspieriien joukosta ja määritetään eri syöttötehoja vastaaville impedansseille sovituspieriien komponenttiarvot. Piirit rakennetaan simulaattoriin ja niitä simuloidaan sopivimman sovituspieriin valitsemiseksi. Valittu sovituspieri rakennetaan tämän jälkeen piirilevyille ja sille suoritetaan piirianalyysaattorilla mittaukset vaihtelevilla syöttötehoilla. Tuloksista huomataan, että mitatut tulokset vastaavat melko hyvin simuloituja tuloksia, vaikkakin sovitushyötysuhteiden huiput ovat hieman siirtyneet taajuusakselilla.

Avainsanat: Langaton energiansiirto, radiotaajuinen energiansiirto, RF-DC-tasasuuntauspiiri, impedanssisovitus, Powercast PCC110

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. LANGATON ENERGIANSIIRTO	3
2.1 Langaton energiansiirto yleisesti	3
2.2 Langattoman energiansiirron historiaa ja käyttökohteita	5
3. IMPEDANSSISOVITUSPIIRI	9
3.1 Impedanssisovitus	9
3.2 Sovitustekniikat	9
3.3 L-sovituspäiri	10
4. PCC110:N IMPEDANSSISOVITUS	13
4.1 Powercast-päirit	13
4.2 PCC110:n sovitushyötysuhteet ilman sovituspäiriä	14
4.3 Kytkenä	15
4.4 Kytkenän simulointi	16
4.5 Kytkenän mittaaminen	19
5. YHTEENVETO	23
LÄHTEET	24

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ADS	engl. Advanced Design System, elektroniikan suunnitteluohjelmisto
DC	engl. Direct Current, tasavirta
IoT	engl. Internet of Things, esineiden Internet
IMD	engl. Implantable medical devices, implantoitavat lääketieteelliset laitteet
ISM	engl. Industrial, Scientific and Medical, taajuuskaista tutkimuskäyttöön
MINIX	engl. Microwave ionosphere nonlinear interaction experiment, Japanissa suoritettu energiansiirtoon keskittynyt tutkimus
MPT	engl. Microwave power transfer, mikroaaltotehonsiirto
RF	engl. Radio frequency, radiotaajuus
RF-DC	engl. Radio Frequency – Direct Current, Radiotaajuisen signaalin tasasuuntaaminen
RFID	engl. Radio frequency identification, radiotaajuinen etätunnistus
SMA	engl. SubMiniature version A, radiotekniikassa käytetty liitin
SPS	engl. Solar power satellite, aurinkoenergialla toimiva satelliitti
SRD860	engl. Short-range device 860, taajuuskaista 863-873 MHz:ä
B	suskeptanssi
R	resistanssi
X	reaktanssi
Z	impedanssi
Γ	heijastuskerroin

1. JOHDANTO

Langaton sähkönsiirto on yleistynyt viime vuosien aikana erilaisissa kannettavissa elektroniikkalaitteissa. Laitteissa käytetty tekniikka on kuitenkin mahdollistanut energian siirron vain hyvin lyhyillä etäisyyksillä, käytännössä laturi ja itse laite joudutaan pitämään kiinni toisissaan, jotta lataaminen on mahdollista. Tästä rajoituksesta päästään käyttämällä energiansiirrossa radiotaajuista sähkömagneettista säteilyä. Tekniikka on hyödyllinen, sillä sen avulla voidaan syöttää energiaan erilaisiin esineiden internet -laitteisiin (engl. IoT), joiden määrän odotetaan kasvavan huomattavasti tulevaisuudessa. Näin voidaan luopua kokonaan ympäristölle haitallisista paristoista ja akuista.

Tässä työssä käsitellään langatonta energiansiirtoa yleisesti sekä käydään läpi tarkemmin radiotaajuista (engl. Radio frequency RF) säteilevää energiansiirtoa. Työ sisältää tutkimusosan, jossa käsitellään Powercast PCC110 radiotaajuista tasasuuntauspiiriä (engl. Radio Frequency – Direct Current RF-DC). Piiriä hyödyntäviä tasasuuntauslaitteistoja on saatavilla kaupallisesti, mutta niiden ongelmana on niiden käyttämä taajuusalue. Useissa tapauksissa ne toimivat parhaiten taajuusalueella, jonka keskitaajuus on 915 MHz:ä. Tämä alue on kuitenkin Suomessa matkaviestinverkkojen käytössä. Työssä pyritään selvittämään piirien toimintaa sekä rakentamaan tasasuuntauslaitteisto, joka toimii muutetulla taajuusalueella. Käytännössä tämä tapahtuu suunnittelemalla tasasuuntauspiirille impedanssisovituspiiri, jolla tasasuuntauspiiri saadaan toimimaan parhaiten SRD860-kaistalla, jonka keskitaajuus on 868 MHz:ä.

Suunniteltavaksi sovituspieriksi valikoituu L-sovituspieri, jossa on kaksi reaktiivista komponenttia, toinen sarjassa ja toinen rinnan. Sovitusta suunniteltaessa huomataan, että sovitusta voidaan suunnitella toimimaan optimaalisesti vain tietyllä syöttöteholla, koska tasasuuntauspiirin impedanssi vaihtelee syöttötehon funktiona. Työssä päädytäänkin suunnittelemalla useampi sovituspieri, joista kukin toimii optimaalisesti tietyllä syöttöteholla. Simulaatioita hyväksi käyttäen pyritään valitsemaan piireistä paras kompromissi rakennettavaksi piirilevylle. Rakennetulle piirille suoritetaan mittaukset ja todetaan, että mittaukset vastaavat melko hyvin simulointeja. Kuitenkin erojakin löydetään ja pohditaan niiden syitä. Lopuksi pohditaan miten sovitusta voisi parantaa.

Luvussa kaksi käsitellään langatonta energiansiirtoa yleisesti ja käydään läpi erilaisia käyttökohteita. Luvussa kolme käsitellään impedanssisovitusta sekä tarkemmin L-sovituspäiriä ja käydään läpi muutama tapa suunnitella piiri. Luvussa neljä käsitellään aluksi PCC110-päiriä ja sen sovitushyötysuhdetta ilman sovituspäiriä. Tästä siirrytään eri sovituspäiriien suunnitteluun ja simulointiin. Luvun loppuksi piiri rakennetaan fyysisesti ja sille suoritetaan mittaukset. Luvussa viisi on työn yhteenveto.

2. LANGATON ENERGIANSIIRTO

2.1 Langaton energiansiirto yleisesti

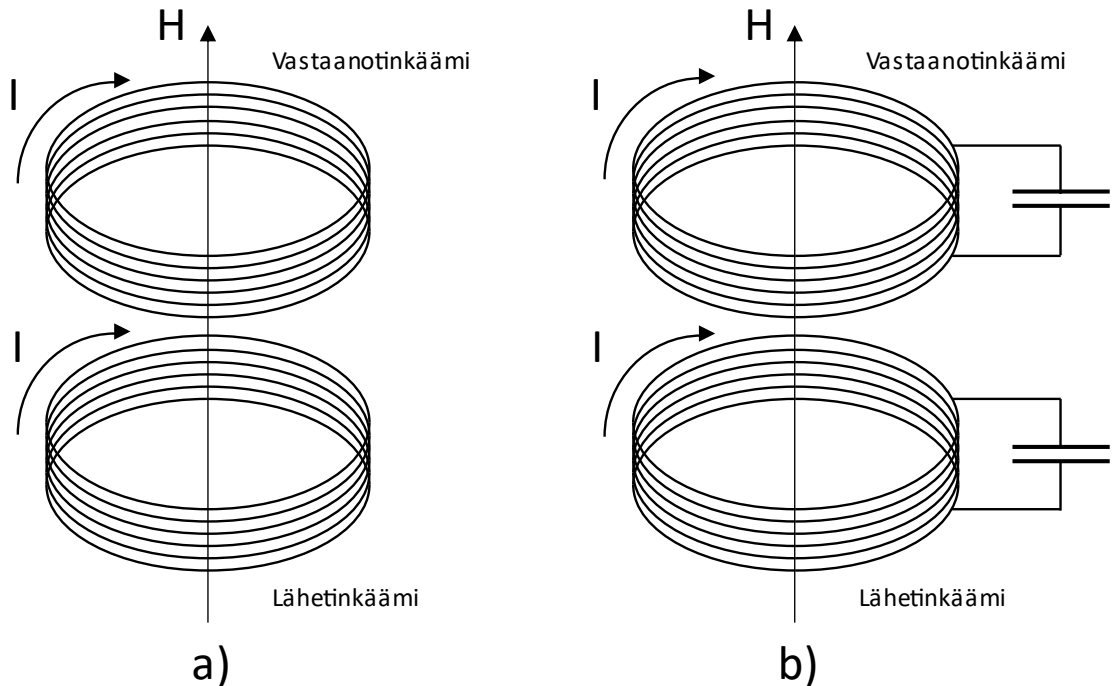
Langattomalla energiansiirrolla tarkoitetaan sähköenergian kuljetusta ilman fyysistä siirtotietä kuten sähköjohtoa. Energiansiirto tapahtuu sähkömagneettisia kenttiä hyväksi käyttäen lähettäjän ja vastaanottajan välillä. Langattomat sähköenergian siirtotekniikat voidaan jakaa kahteen kategoriaan niiden toimintasäteen perusteella lähialueen (engl. near-field) ja kaukoalueen (engl. far-field) tekniikoihin. Lähialueen tekniikat voidaan vielä edelleen jakaa lyhyen matkan (engl. short-range) ja keskipitkän matkan (engl. mid-range) tekniikoihin. Lyhyen matkan tekniikoilla voidaan toteuttaa energiansiirtoa, joka tapahtuu maksimissaan yhden aallonpituuden päässä antennista, kun taas keskipitkän matkan tekniikoilla voidaan saavuttaa maksimissaan kymmenen aallonpituuden etäisyys. Kun halutaan saavuttaa pidempiä kantamia, käytetään radioaaltoihin perustuvia kaukoalueen tekniikoita. [1]

Lähialueluokan tekniikoita ovat induktiivinen ja kapasitiivinen kytkeytyminen. Induktiivinen kytkeytyminen on eniten käytetty langattoman energiansiirron tekniikka. Siinä lähetin ja vastaanotin koostuvat käämeistä ja kun lähetinkäämin läpi kulkee vaihtosähköä, se luo muuttuvan magneettikentän. Tämä magneettikenttä lävistää vastaanotinkäämin ja käämiin syntyy vaihtosähkövirta. Sovelluksesta riippuen tämä virta voidaan joko tassaunnata tai muuntaa matalataajuisemmaksi vaihtosähköksi. Induktion kantamaa voidaan parantaa käyttämällä resonanssiipiiriä. [1]

Kuvassa 1 on havainnollistettu induktiivista sekä resonanttia induktiivista energiansiirtoa. Kuvassa on vasemmalla puolella induktiivinen kytkeytyminen, jossa on kaksi käämiä päällekkäin. Alempan käämiin kytketty vaihtovirta saa aikaan vaihtovirran ylemmässä käämissä sähkömagneettisen induktion seurauksena. Oikeanpuoleisessa kuvassa on resonanssiipiiri, johon on käämien lisäksi lisätty kondensaattorit. Kondensaattorit lisäämällä saadaan lähetin ja vastaanotin resonoimaan. [1] [2]

Kapasitiivinen kytkeytyminen käyttää kahden elektrodin, anodin ja katodin, sähkökenttiä energian siirtämiseen [3]. Kahdesta metallilevystä koostuvat anodi ja katodi muodostavat kondensaattorin. Lähettimeen kytketty vaihtojännite saa vastaanottimessa aikaan muuttuvan jännitteen sähköstaattisen induktion seurauksena. Lähetinpuolen vaihtojännitteen taajuus vaikuttaa siirron hyötysuhteeseen, suuremmalla taajuudella saavutetaan korke-

ampi hyötysuhde. Lisäksi hyötysuhteeseen vaikuttavat jännitteen amplitudi ja kondensaattorien kapasitanssit. [4] Kapasitiiviseen kytkeytymiseen perustuvat sovellukset ovat huomattavasti harvinaisempia kuin induktioon perustuvat.



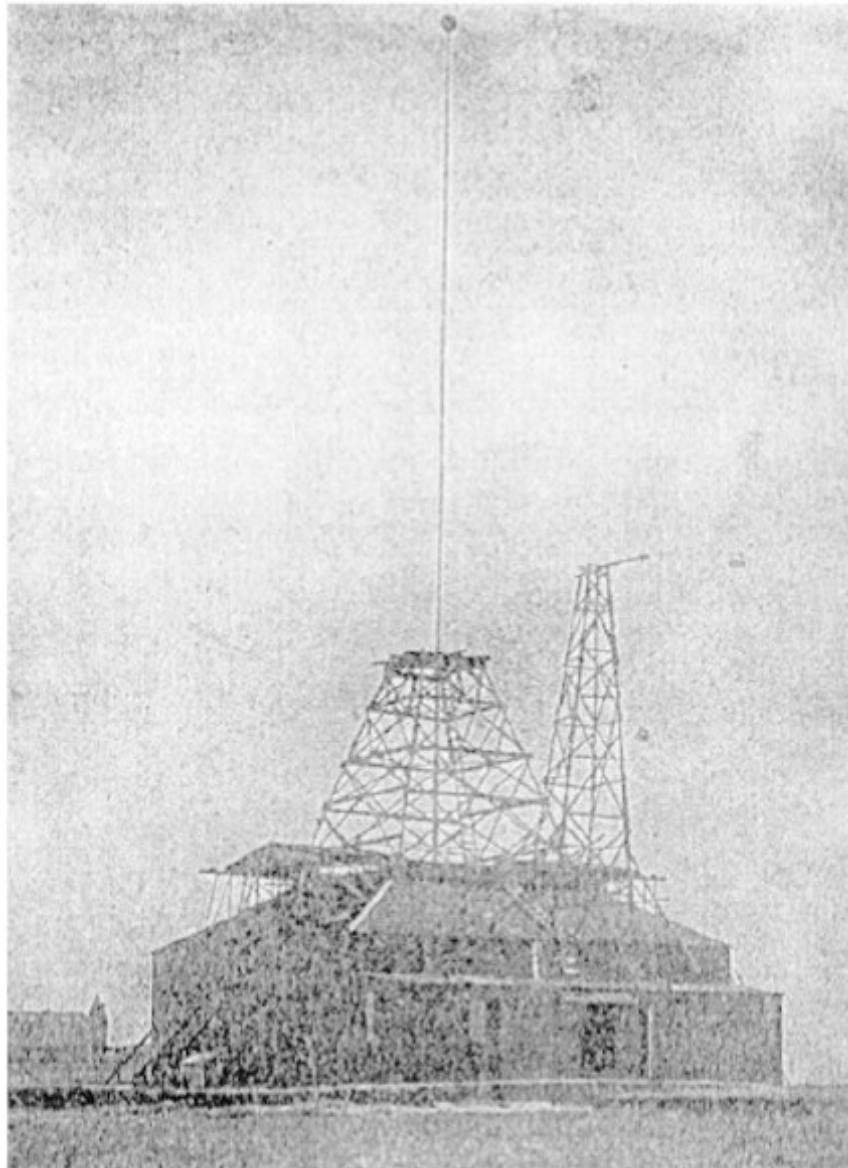
Kuva 1. Lähialueen tekniikoita a) induktiivinen kytkeytyminen b) resonoiva induktiivinen kytkeytyminen.

Kaukoalueluokkaan kuuluva radiotaajuinen energiansiirto perustuu sähkömagneettiseen säteilyyn, jonka taajuus voi vaihdella sadoista MHz:stä useisiin GHz:hin riippuen halutusta toimintataajuusalueesta. Tämä tapahtuu antenneista muodostuvien lähettimen ja vastaanottimen välillä. Vastaanottopäässä signaali tasasuunnataan tai muunnetaan matalammalle taajuudelle. Vähän tehoa kuluttavissa sovelluksissa voidaan jättää kokonaan lähetin pois ja kerätä laitteen tarvitsema energia kokonaan ympäröivästä säteilystä. [1]

Pitkän kantaman energiansiirrossa voidaan käyttää myös lasereita hyödyntävää tekniikkaa. Siinä laser lähettää koherenttia valoa eli valoa, jonka kaikki säteilevät aallot ovat aallonpituudeltaan saman mittaisia ja ne ovat samassa vaiheessa. Vastaanottopäässä valo kohdistetaan vastaanottimen valosähkökennoon. Valosähkökenno on herkkä laserin tuottamalle monokromaattiselle valolle. Lasersäteilyn aallonpituus on radiotaajuisesta säteilystä korkeataajuisempaa, jonka vuoksi säteily on herkempää vaimenemaan pölyn ja vesihöyryn vaikutuksesta kuin pidempi aallonpituisen radiotaajuinen säteily.

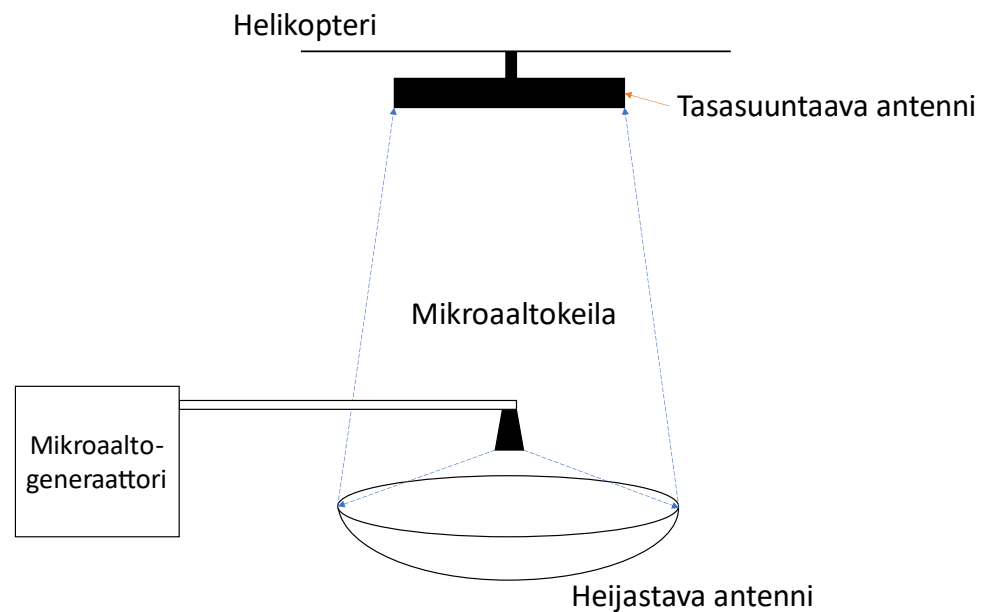
2.2 Langattoman energiansiirron historiaa

Langattoman sähköenergiansiirron historia ulottuu 1800-luvun lopulle. James Maxwellin yhtälöt 1870-luvulla ennustivat, että energiaa voidaan siirtää sähkömagneettisten kenttien avulla. Yhtälöiden mukaan muuttuva sähkökenttä indusoi magneettikentän ja muuttuva magneettikenttä indusoi sähkökentän. Myöhemmin Heinrich Hertz teki kokeita ja todensi yhtälöiden paikkansa pitävyyden. [5] Vuonna 1899 Nikola Tesla teki ensimmäiset kokeensa langattomasta energiansiirrosta. Tesla rakensi "Tesla Tower" -nimisen laitteen. Se koostui suuresta käämistä ja korkeasta mastosta, jonka päässä oli halkaisijaltaan metrin pallo. Laite ei kuitenkaan toiminut halutulla tavalla, koska siinä käytetty taajuus oli vain 150 kHz:ä ja teho säteili joka suuntaan. [1] "Tesla Tower" on kuvattuna kuvassa 2.



Kuva 2. Tesla Tower oli ensimmäisiä radiotaajuisen energiansiirron laitteita. [1]

Tesla Towerin jälkeen 1930-luvulla kehitettiin elektroniputket magnetroni ja klystroni, jotka toimivat 1–10 GHz:n alueella. Toisen maailmansodan jälkeen korkean tehon ja hyötysuhteen mikroaaltoputket kehittyivät. 1960-luvulla W.C Brown kehitti mikroaaltoputkien pohjalta tasasuuntaavan antennin (engl. rectenna). Tasasuuntaava antenni on antenni, joka vastaanottaa ja tasasuuntaa mikroaaltoja. Tällaisia antennejä hyödyntämällä Brown rakensi helikopterin, joka sai vaatimansa energian langattomasti mikroaalloilla (Kuva 3). [1]



Kuva 3. Brown kehitti helikopterin, joka sai kaiken tarvitsemansa energian mikroaalloista.

Kuvassa ellipsin muotoiseen heijastavaan antenniin lähetetään mikroaaltoja. Antenni muodostaa mikroaaltokeilan, joka osuu helikopterin tasasuuntaavaan antenniin [5]. Kokeessa käytetyn heijastavan antennin ansiosta mikroaallot saadaan hyvin suunnattua haluttuun kohteeseen, jolloin hyötysuhde paranee. 1960-luvun jälkeen aurinkoenergialla toimivat satelliitit (engl. solar power satellite SPS) ovat olleet suurin tutkimuksen kohde. 1980- ja 1990-luvuilla Japanissa kehitettiin mikroaaltotehonsiirtoa (engl. Microwave power transfer MPT).

Myös useita muita MPT-kokeita ja tutkimuksia tehtiin 1990-luvulla ympäri maailmaa. Tutkimuksissa keskityttiin SPS:n lisäksi kaupallisiin sovelluksiin. Useimmiten käytössä olivat ISM-kaistat 2,45 ja 5,8 GHz. [1] ISM-kaistat ovat taajuusalueita, jotka on tarkoitettu tutkimuskäyttöön. Näitä tutkimuksia olivat muun muassa Kanadassa ja Japanissa tehdyt lentokonetestit ja useat maalta-maalalle tehdyt testit. [1]

2.3 Radiotaajuisen energiansiirron käyttökohteita

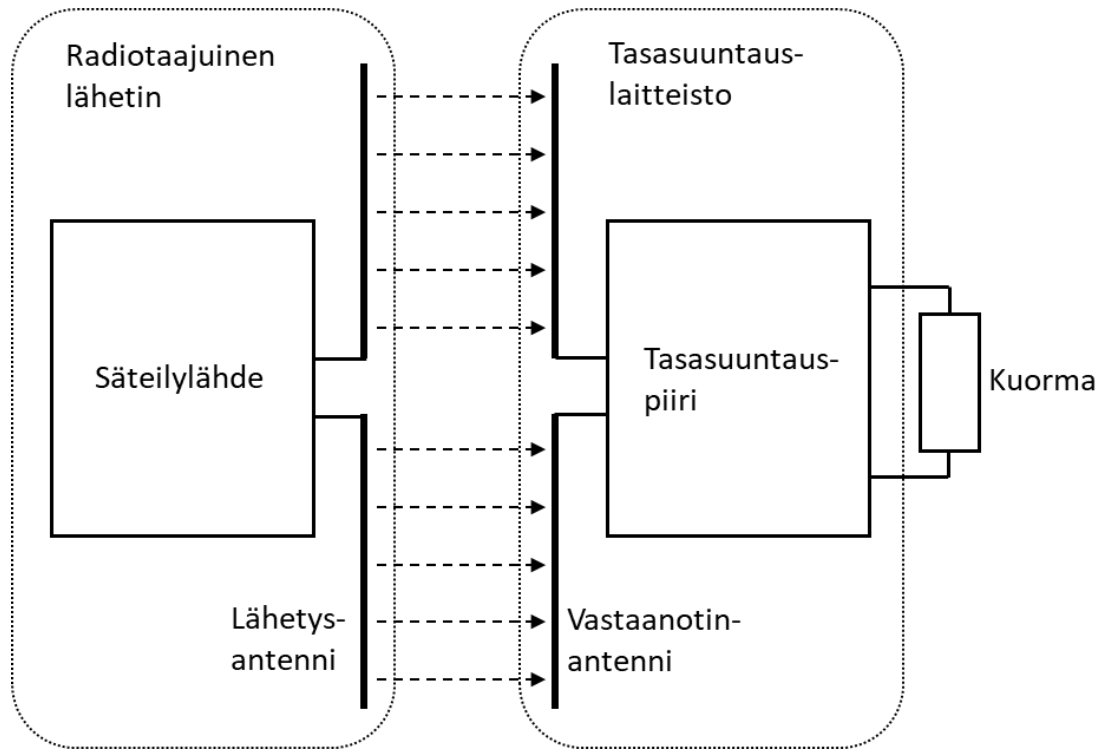
Radiotaajuista energiansiirtoa käyttävien laitteiden määrä tulee kasvamaan huomattavasti tulevaisuudessa. Tällä hetkellä tekniikka on käytössä RFID-tunnisteissa, joista täysin passiiviset tunnisteet keräävät kaiken tarvitsemansa energian radiotaajuisesta säteilystä [6]. Erityisesti erilaisten vähän virtaa kuluttavien esineiden Internetin laitteiden määrä kasvaa. Matkapuhelimet, tabletit ja kannettavat tietokoneet voidaan tulevaisuudessa ladata langattomasti. Nämä vaativat jo huomattavasti enemmän tehoa kuin edellä mainitut IoT-laitteet. Sähköautojen ja muiden sähköä käyttävien kulkuneuvojen lataaminen voidaan myös toteuttaa langattomasti. Näiden lataaminen vaatii jo huomattavan suuria tehoja, useita kilowatteja.

Muita sovelluskohteita ovat implantoitavat lääkinnälliset laitteet (engl. implantable medical devices IMD). Nämä laitteet tarvitsevat vain milliwatteja tai vähemmän energiaa. Tällaisia laitteita ovat sydämentahdistin, sisäkorvaistute ja verkkokalvon proteesit. Tärkeää näiden toiminnassa on se, että mahdollisimman pieni osa energiasta imeytyy kudokseen. [7]

2.4 Radiotaajuinen energiansiirto

Tässä työssä keskeisenä asiana on radiotaajuisen signaalin muuttaminen tasasähköksi. Tällainen tasasuuntauslaitteisto koostuu useimmiten vastaanotinantennista, impedanssisovituspiiristä, itse tasasuuntauspiiristä ja kuormasta, johon tasasähkö syötetään. Tällaista laitteistoa on havainnollistettu kuvassa 4.

Sähkömagneettinen säteily osuu vastaanottoantenniin, jonka päiden välille syntyy varausero. Tämä varausero aiheuttaa vaihtosähkön syntyminen antennin terminaalien välille. Tämä vaihtosähkö täytyy useissa tapauksissa tasasuunnata ja sitä varten on tasasuuntauspiiri. Tasasuuntauspiiri on mahdollista toteuttaa monella tavalla, mutta yksinkertaisimmillaan se voi koostua diodista, jonka tehtävä on sallia virran kulkeminen vain yhteen suuntaan. Tämän jälkeen tasasuunnattu sähkö syötetään kuormaan. [8]



Kuva 4. Radiotaajuisen signaalin tasasuuntauslaitteisto.

3. IMPEDANSSISOVITUSPIIRI

3.1 Impedanssisovitus

Tämän työn tutkiva osa keskittyy erityisesti tasasuuntauspiirin impedanssisovitukseen. Työssä sovitetaan PCC110-piiri 50Ω :n siirtolinjaan, jonka jälkeen piiriä simuloidaan ja mitataan sovituksen onnistuminen.

Impedanssisovitus on kuorman sovittamista lähteeseen siten, että ne ovat toistensa kompleksikonjugaatteja. Sovituksen tarkoituksena on se, että saadaan maksimaalinen teho siirtymään lähteestä kuormaan eli minimoidaan hukkaan menevä heijastuva teho. Mikäli impedansseja ei ole sovitettu, osa tulevasta tehosta heijastuu takaisin lähteeseen. [9]

3.2 Sovitustekniikat

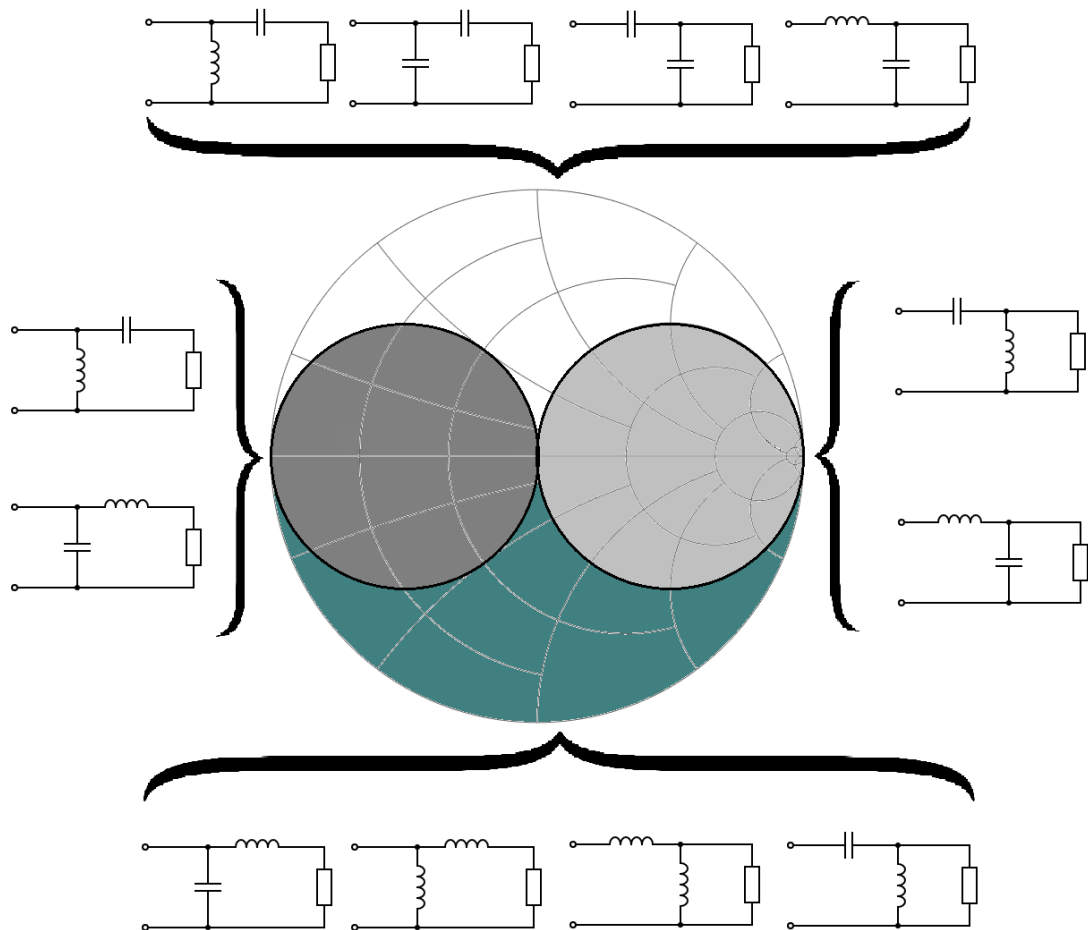
Sovituspiirin toteuttamiseen on useita vaihtoehtoja ja useimmiten valinnassa täytyy tehdä jonkinlaisia kompromisseja. Huomioon otettavia asioita on muun muassa piirin yksinkertaisuus, kaistanleveys, toteutuksen mielekkyys ja muokattavuus. Useimmiten mitä yksinkertaisempi piiri, sitä heikompi kaistanleveys sovituksella saadaan. Kuitenkin monimutkaisempien piirien käyttäminen tulee suurissa valmistusmäärissä kalliiksi ja ne syövät piirilevyiltä pinta-alaa. Lisäksi sovituskomponenteissa tapahtuvat tehohäviöt kasvavat piirin monimutkaistuessa.

Yksi tapa on tehdä impedanssisovitus diskreetein kela- ja kondensaattorikomponentein. Tällöin siis sovituspäiri koostuu keloista ja kondensaattoreista, ja erilaisilla piiritopologioilla voidaan tehdä sovituspäirejä, joilla on erilaisia ominaisuuksia. Erilaisia topologioita ovat L-, T- ja π -piirit. Piirien nimitykset kuvaavat piirin rakennetta. L-päirissä kaksi komponenttia on L-kirjaimen muodossa, T-päirissä kolme komponenttia on T-kirjaimen muodossa ja π -päirissä kolme komponenttia on π -kirjaimen muodossa. [10]

Tämän työn sovituspäiriksi valittiin yksinkertainen yhden resonanssin L-sovituspäiri, jonka kaistanleveys on pieni. L-päirin sovitus on täydellinen vain tietyllä taajuudella, jota vastaavalle piirin impedanssille komponenttiarvot on määritetty. Tällöin siis koko piiriin syötetty teho siirtyy kuormaan eli PCC110-päiriin. Kuitenkin piiri on helppo toteuttaa, ja kytkennän käyttö tapahtuu joka tapauksessa pienellä 10 MHz:ä leveällä kaistalla 868 MHz:n ympärillä, joten L-päiri on tähän tarkoitukseen riittävä.

3.3 L-sovituspääpiiri

Tarkastellaan seuraavaksi tarkemmin L-kytkentää ja kytkennän komponenttien arvojen määrittämistä. L-kytkentä koostuu joko kondensaattorista ja käämistä tai kahdesta kondensaattorista tai kahdesta käämistä. L-kytkennässä toinen komponentti on sarjaan kytketty ja toinen on rinnan kytketty. Erilaisia topologioita on kahdeksan kappaletta ja ne on esitetty kuvassa 5. [10]

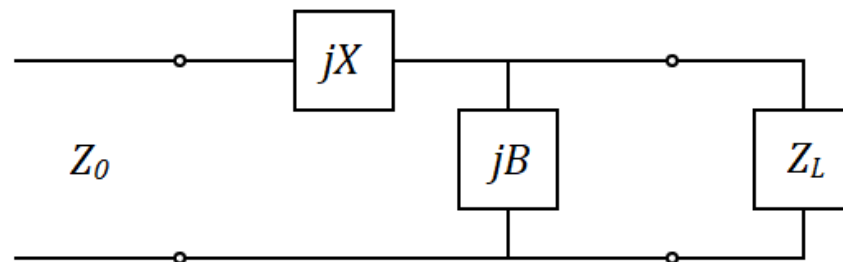


Kuva 5. Mahdolliset sovituspääpiiritopologiat Smithin kartan eri alueille.

Sovituspiirin topologiaa valittaessa on tärkeää tietää mille alueelle sovittavan piirin impedanssi sijoittuu Smithin kartalla. Smithin kartta on graafinen työkalu, jolla voidaan helposti tehdä impedanssisovitus ilman tarpeita numeerisia laskelmia. Kartta on ympyrän muotoinen, ja siihen on merkitty vakioresistanssipyörät ja vakioreaktanssiviivat. Vastaavasti voidaan peilikuvana piirtää kartalle vakiokonduktanssipyörät sekä vakiosuskeptanssiviivat, mutta näitä ei ole näkyvissä kuvassa 6. Ominaisimpedanssi on merkitty ympyrän keskelle ja muut impedanssit on normalisoitu tähän. Kaikkia kuormaimpedansseja ei ole mahdollista sovittaa kaikilla eri topologioilla, vaan eri sovituspääpiireille on Smithin kartalla alueet, joissa sovitus on mahdollinen.

Smithin kartalla sovitus tapahtuu siten, että lähteen ja kuorman impedanssit merkitään kartalle ja tämän jälkeen pyritään lisäämään sopivat komponentit, joilla impedanssi saadaan liikkumaan kuormaimpedanssista lähtöimpedanssiin. Käytännössä tämä tapahtuu siten, että sarjaan kytketyt reaktanssit liikuttavat impedanssia vakioresistanssiympyröitä pitkin, jotka ovat kartan oikealla puolella. Rinnankytketyt reaktanssit taas liikuttavat impedanssia vakiokonduktanssiympyröitä pitkin, jotka ovat Smithin kartalla vasemmalla. Kondensaattori liikuttaa impedanssia kartalla alaspäin ja kela liikuttaa impedanssia ylöspäin. [9]

Toinen tapa määrittää L-kytkennän komponenttiarvot on laskennallinen menetelmä. Valitaan sovitustopologiaksi piiri, jossa lähdeimpedanssilta tarkasteltaessa ensimmäinen komponentti on sarjassa ja toinen komponentti on rinnan. Määritetään laskemalla tällaisen piirin reaktiiviset komponentit. Kuvassa 6 on havainnollistettu kyseistä kytkentää.



Kuva 6. Tutkittava piiri.

Kytkenässä Z_0 on lähdeimpedanssi, jX ja jB ovat sovituskomponentit, jotka voivat siis olla, joko kela tai kondensaattori. Z_L on kuormaimpedanssi, jota voidaan merkitä $Z_L = R_L + jX_L$. Jotta lähde- ja kuormaimpedanssit ovat sovitettu, täytyy lähdeimpedanssin olla yhtä suuri kuin sovituskomponenttien ja kuorman muodostaman piirin impedanssi eli [9]

$$Z_0 = jX + \frac{1}{jB + 1/(R_L + jX_L)}. \quad (1)$$

Tästä voidaan ratkaista B ja X

$$B = \frac{X_L \pm \sqrt{\frac{R_L}{Z_0} \sqrt{R_L^2 + X_L^2} - Z_0 R_L}}{R_L^2 + X_L^2} \quad (2)$$

$$X = \frac{1}{B} + \frac{X_L Z_0}{R_L} - \frac{Z_0}{B R_L} \quad (3)$$

B :lle ja X :lle on kaksi mahdollista ratkaisua. Tämä johtuu siitä, että ne voivat olla kondensaattoreita tai keloja. Mikäli halutaan sarjakomponentiksi kondensaattori, valitaan

X :n negatiivinen arvo ja mikäli halutaan sarjakomponentiksi kela, valitaan positiivinen arvo. Toisaalta taas, mikäli halutaan rinnankomponentiksi kondensaattori, valitaan B :n arvoksi positiivinen arvo ja mikäli halutaan rinnankomponentiksi kela, valitaan negatiivinen arvo. [9]

Määrittystekniikoita vertailemalla huomataan, että Smithin kartan avulla määrittäminen on nopeaa, mutta koska tapa on graafinen, on siinä epätarkkuutta riippuen, kuinka tarkasti impedanssisiirtymät voidaan kartalta lukea. Mikäli halutaan, että arvot ovat mahdollisimman tarkkoja, on syytä käyttää laskennallista menetelmää.

4. PCC110:N IMPEDANSSISOVITUS

4.1 Powercast-piirit

Powercast PCC110 on tasasuuntauspiiri, jolla voidaan tasasuunnata 0,10–6 GHz taajuuksista radioaaltoa. Piirin hyötysuhteen luvataan olevan jopa 75 % ja se toimii -17–20 dBm syöttötehoilla. Piirin käyttökohteita ovat erilaiset RFID-sovellukset, vähän tehoa kuluttavat akuttomat anturit ja akullinen elektroniikka. [11]

PCC110 -piirin sovittamiseksi mitataan piirin S-parametri S_{11} . S_{11} -parametri on tasasuuntauspiiriin menevän ja sieltä heijastuvan jänniteaallon suhde, jota nimitetään heijastuskertoimeksi. S-parametrit on määritetty piirianalysointilaitteilla. Heijastuskertoimesta voidaan edelleen määrittää piirin impedanssi, jonka avulla sovituspäätteen komponenttiarvot voidaan määrittää Smithin kartan avulla.

Komponentin impedanssin Z määrittäminen heijastuskertoimen Γ ja referenssi-impedanssin Z_0 avulla voidaan laskea kaavalla [12]

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}, \quad (4)$$

josta ratkaisemalla Z saadaan

$$Z = Z_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}. \quad (5)$$

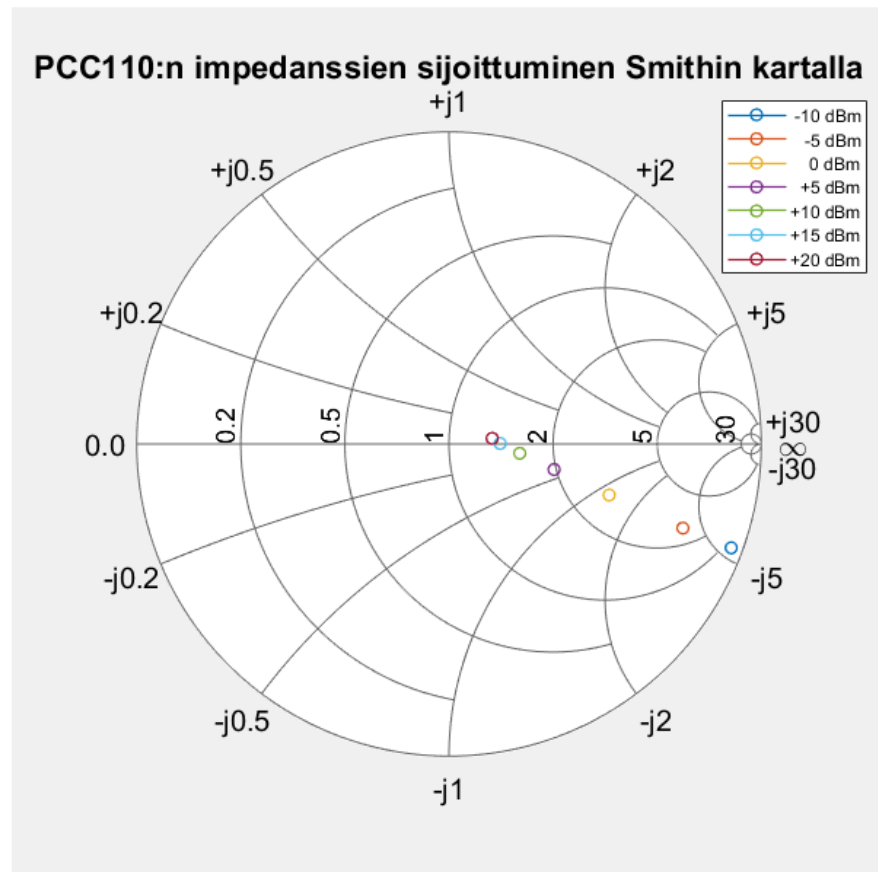
Tässä työssä PCC110 sovitetaan toimimaan 868 MHz:n taajuudella ja tällä taajuudella heijastuskertoimeksi on määritetty piirianalysointilaitteilla taulukon 1 mukaiset arvot eri sisäänmenotehoilla ja näistä on edelleen laskettu piirin impedanssit.

Taulukko 1 Heijastuskertoimet ja impedanssit eri sisäänmenotehoilla ja 868 MHz:n taajuudella.

Syöttöteho (dBm)	Heijastuskertoimen/S ₁₁	Impedanssi (Ω)
-10	0,9629 ∠ -20,21°	30,31 -j277,3
-5	0,7959 ∠ -19,78°	135,1 -j198,7
0	0,5382 ∠ -17,67°	134,5 -j61,89
5	0,3463 ∠ -13,64°	98,49 -j18,28
10	0,2285 ∠ -7,484°	79,11 -j4,970
15	0,1639 ∠ 0,5278°	69,60 j0,2160
20	0,1395 ∠ 7,463°	66,00 j2,439

Heijastuskertoimien mittauksessa käytetty kytkentä koostui SMA-liittimestä, PCC110-piiristä, 287Ω kuormavastuksesta ja 100 pF kondensaattorista ulostulossa.

PCC110:n 50:en ohmiin normalisoidut impedanssit sijoittuvat Smithin kartalla kuvan 7 osoittamalle alueelle.



Kuva 7. PCC110:n impedanssit 868 MHz taajuudella Smithin kartalla.

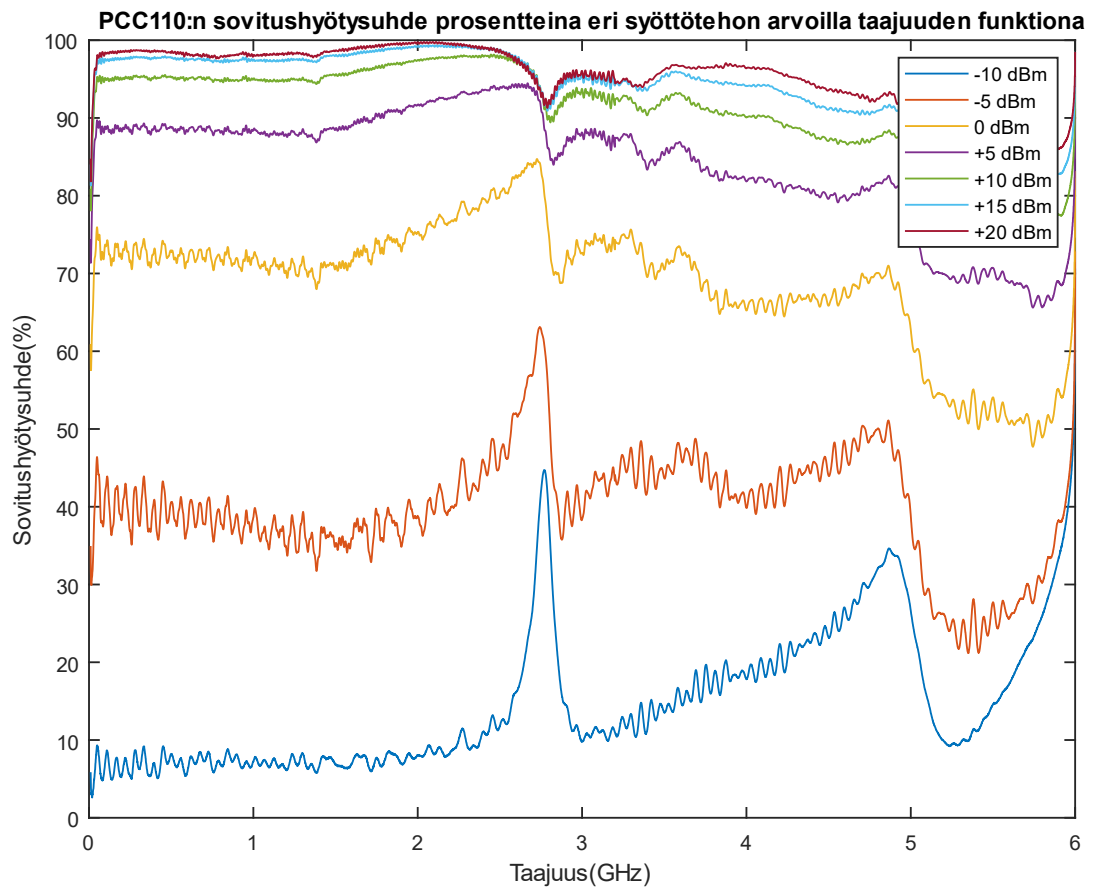
Kun tarkastelemme kohdassa 3.3 esitettyä kuvaa erilaisista topologioista. Huomaamme, että lukuun ottamatta syöttötehon arvolla -10 dBm mitattua impedanssia, impedanssien sovitukseen on kaksi mahdollista eri topologiaa ja -10 dBm sovitukseen on neljä eri mahdollista topologiaa.

4.2 PCC110:n sovitushyötysuhteet ilman sovituspiiriä

Piirianalysoimalla mitatuista heijastuskertoimista voidaan laskea piirin sovitushyötysuhde prosentteina eli kuinka suuri osa lähetetystä tehosta siirtyi piiriin. Tämän laskeminen mitatuista heijastuskertoimesta tapahtuu kaavalla

$$\text{sovitushyötysuhde} = 1 - |S_{11}|^2.$$

Piirin sovitushyötysuhde taajuuden funktiona eri syöttötehojen arvoilla on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. PCC110 piirin sovitushyötysuhde ilman sovituspiiriä.

Kuvaajasta voidaan huomata, että sovitushyötysuhde on hyvä suurimmilla syöttötehojen arvoilla, mutta laskee nopeasti, kun syöttöteho laskee alle 0 dBm. -10 dBm teholla sovitushyötysuhde on jo alle 10 %. Pienten tehojen sovitushyötysuhteet on tärkeä huomioida, sillä luultavasti piiriä tullaan käyttämään sellaisessa sovelluksessa, jossa ilman yli siirtyvät tehot ovat pieniä. Sovituspiiriä valittaessa kiinnitetään erityistä huomiota tähän.

4.3 Kytkenä

Kuten aikaisemmin todettiin, työssä käytettäväksi sovituspiiriksi valikoitui L-sovituspiiri. Seuraavaksi käsitellään piirin komponenttiarvojen määrittämistä. Kappaleessa 3.3 esitettiin kaksi tapaa määrittää komponenttiarvot: määrittäminen Smithin kartan avulla sekä määrittäminen

laskemalla. Kuitenkin ylivoimaisesti helpoin ja myös tarkka tapa on määrittää komponentit valmiilla ohjelmistolla. Tässä työssä käytetty Advanced Design System (ADS) ohjelmisto sisältää *Smith Chart Utility* -nimisen työkalun, jolla komponenttiarvojen määrittäminen onnistuu helposti. Työkaluun syötetään lähde- ja kuormaimpedanssit ja tämän jälkeen voidaan käyttää *Auto 2-Element Match* -toimintoa, joka näyttää mahdolliset topologiat ja niitä vastaavat komponenttiarvot.

Työssä määritettiin laskennallisesti sekä työkalua apuna käyttämällä 7 eri sovituspiiriä, joista jokainen on sovitettu tietylle syöttöteholle (-10, -5, 0, 5, 10, 15, 20 dBm). Sovituskomponenttien määrittämisessä on käytetty kutakin tehoa vastaavaa PCC110:n impedanssia. Taulukossa 2 on esitetty laskennallisesti sekä ADS-ohjelmiston avulla määritetyt komponenttiarvot. Taulukosta huomataan, että lukuarvot vastaavat hyvin toisiaan ja ainoat erot luultavasti johtuvatkin pyöristyksistä johtuvista virheistä.

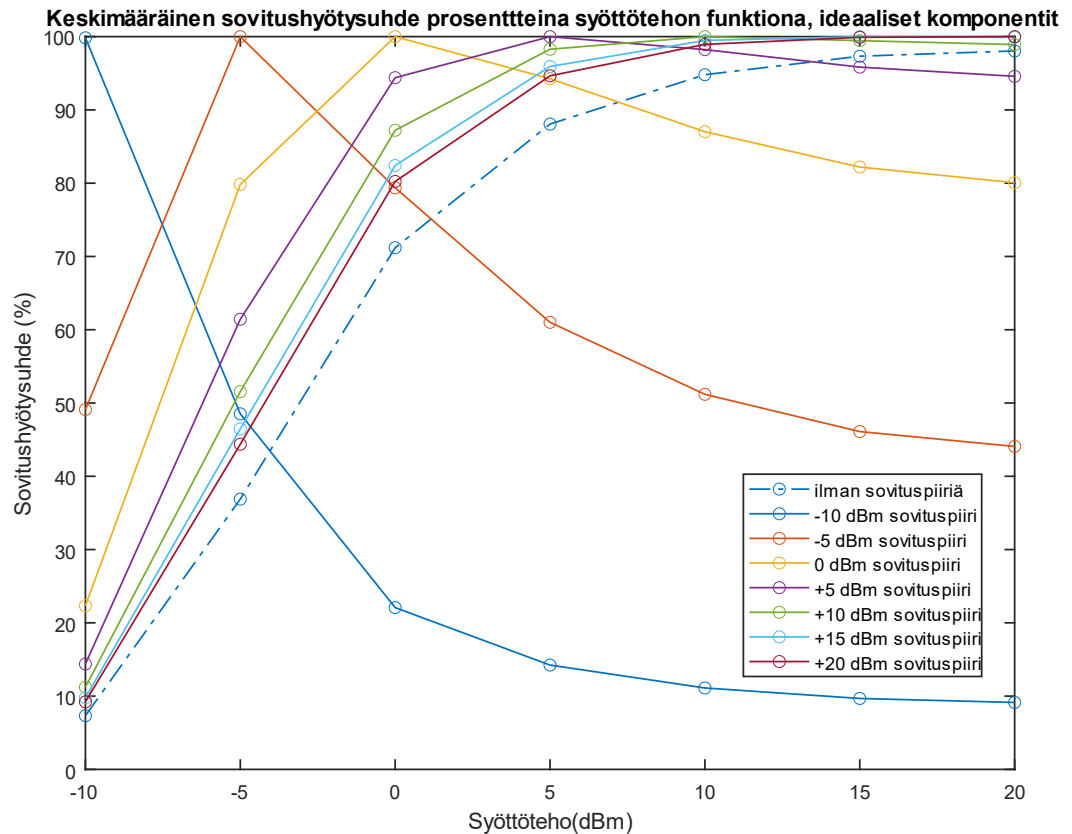
Taulukko 2 Sovituspiirin komponenttiarvot

Syöttöteho (dBm)	Kela (nH)		Kondensaattori (pF)	
	Laskennallinen	ADS	Laskennallinen	ADS
-10	29,0	29,0	0,517	0,517
-5	25,2	25,2	0,548	0,548
0	13,8	13,8	1,17	1,17
+5	9,34	9,34	1,50	1,50
+10	7,03	7,03	1,63	1,62
+15	5,74	5,74	1,66	1,66
+20	5,20	5,20	1,68	1,67

4.4 Kytkennän simulointi

Työssä simuloinnin tarkoituksena oli selvittää, kuinka hyvin eri sovituspiirit toimivat lupaavalla 863–873 MHz taajuusalueella, ja mikä piireistä olisi paras valinta rakennettavaksi piirilevyille. Yllä määritettyjä sovituspiirejä simuloitiin eri syöttötehoilla, minkä avulla nähtiin, kuinka hyvä sovitus piireillä on koko syöttötehoalueella -10–20 dBm.

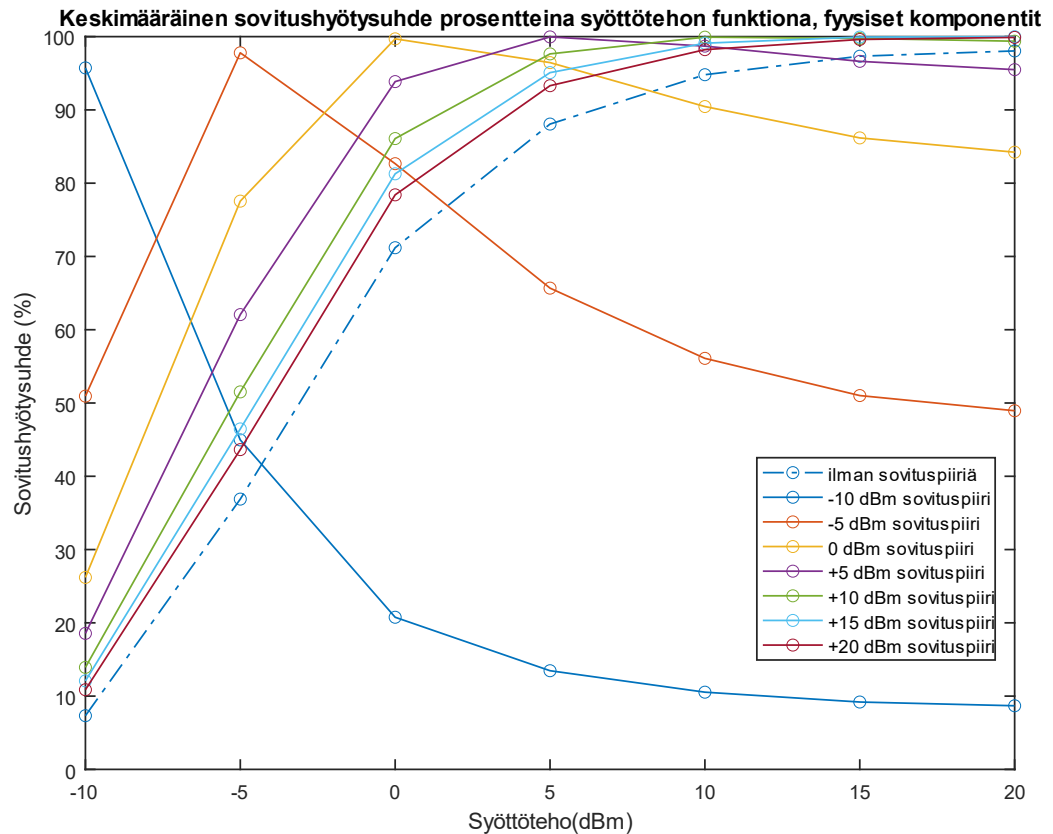
Sovituspiirit simuloitiin käyttämällä ADS-ohjelmiston S-parametrisimulointia. Simulointiasetuksiksi määritettiin taajuusalueeksi 10 MHz – 2 GHz ja askeleeksi 1 MHz. Simuloinneista saatu S-parametridata otettiin talteen ja tätä dataa käytettiin Matlabissa kuvaajien piirtoon. Piirin valintaa helpottamaan piirrettiin kuvaaja, josta voidaan tarkastella eri sovituspiirien sovitushyötysuhdetta syöttötehon funktiona. Kuvaaja on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Ideaalisilla komponenteilla toteutettujen piirien keskimääräinen sovitushyötysuhde taajuusalueella 863 MHz – 873 MHz syöttötehon funktiona.

Kuvaajasta voidaan havaita, että suuremmille tehoille sovitetettujen piirien sovitushyötysuhde on hyvä myös muilla tehoilla, kuin mille piiri on sovitettu. Pienillä tehoilla sovitushyötysuhde taas laskee nopeasti, kun teho kasvaa. Kuvaajassa on myös esitettyä sovitushyötysuhde ilman sovituspiiriä, ja siitä voidaan huomata, että joissain tapauksissa sovituspiiri heikentää hyötysuhdetta.

Ideaalisilla komponenteilla toteutettujen piirien jälkeen komponentit vaihdettiin fyysisiin simulointimalleihin. Komponenteiksi valikoituivat Murata GJM15, 0402-koon kondensaattorit ja LQW15AN_00, 0402-koon kelat, jotka soveltuvat hyvin RF-käyttöön [13] [14]. Komponenttien valinta tapahtui ottamalla ideaalista komponenttia lähinnä oleva Muratan komponenttimalli. Mallit ADS:ään sai ladattua Muratan nettisivuilta. Simulaatiot ajettiin Muratan komponenteilla ja piirrettiin Matlabilla kuvaaja, joka on esitettyä kuvassa 10.



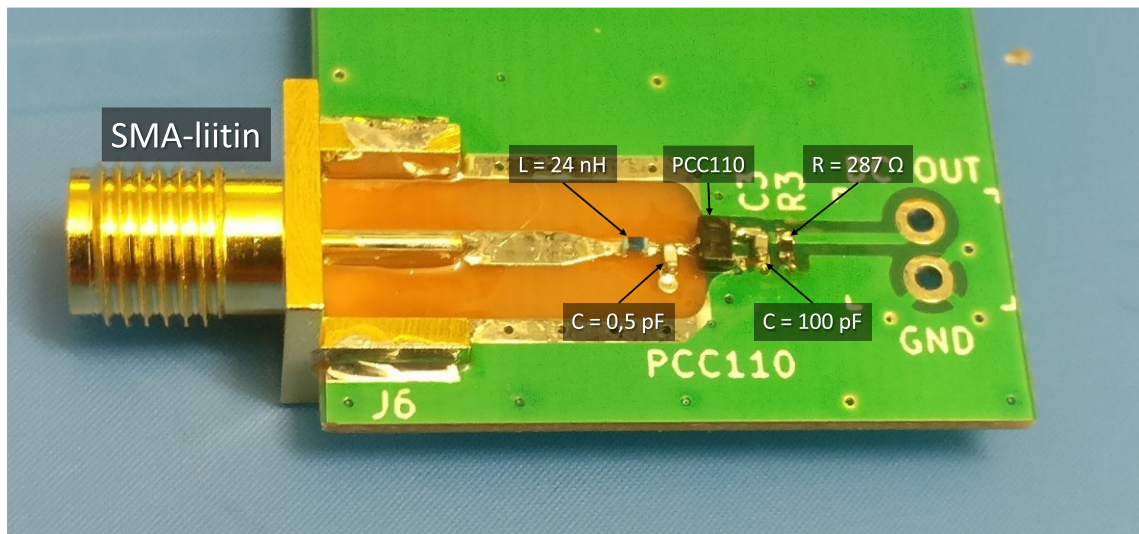
Kuva 10. Fyysisillä komponenttimalleilla toteutettujen piirien keskimääräinen sovitushyötysuhde taajuusalueella 863 MHz – 873 MHz syöttötehon funktiona.

Kuvaajaa tarkastelemalla huomataan, että käyrät vastaavat pitkälti ideaalisilla komponenteilla tehtyjä simulaatioita. Huomattavimpana erona on se, että -10 ja -5 dBm tehoille sovitetut piirit eivät ole enää täydellisesti sovitettuja vastaavilla tehoilla. Tämä johtuu siitä, että komponenttien arvojen ollessa hieman eri kuin mitä ideaalisesti, muuttuu sovitus niin, että sovitustaso 868 MHz:llä huononee. Tämä voitiin huomata simuloinneissa kuvaajasta, jossa sovitushyötysuhde on taajuuden funktiona. Parhaan sovitushyötysuhteen alue on siirtynyt korkeammalle taajuudelle.

Kappaleen 4.2 lopussa todettiin, että tasasuuntauspiiriä tullaan luultavasti käyttämään sovelluksissa, joissa ilman yli siirtyvät RF-tehot eivät ole kovin suuria. Tästä syystä piiriksi on hyvä valita pienille tehoille sovitettu piiri, vaikkakin sovitushyötysuhde näillä piireillä laskee reilusti syöttötehon kasvaessa. Näin ollen rakennettavaksi piiriksi valikoitui -5 dBm teholle sovitettu piiri. Se on hyvä kompromissi, sillä pienillä tehoilla saavutetaan hyvä sovitus eikä sovitus kuitenkaan heikkene yhtä paljon tehon kasvaessa kuin -10 dBm piirillä.

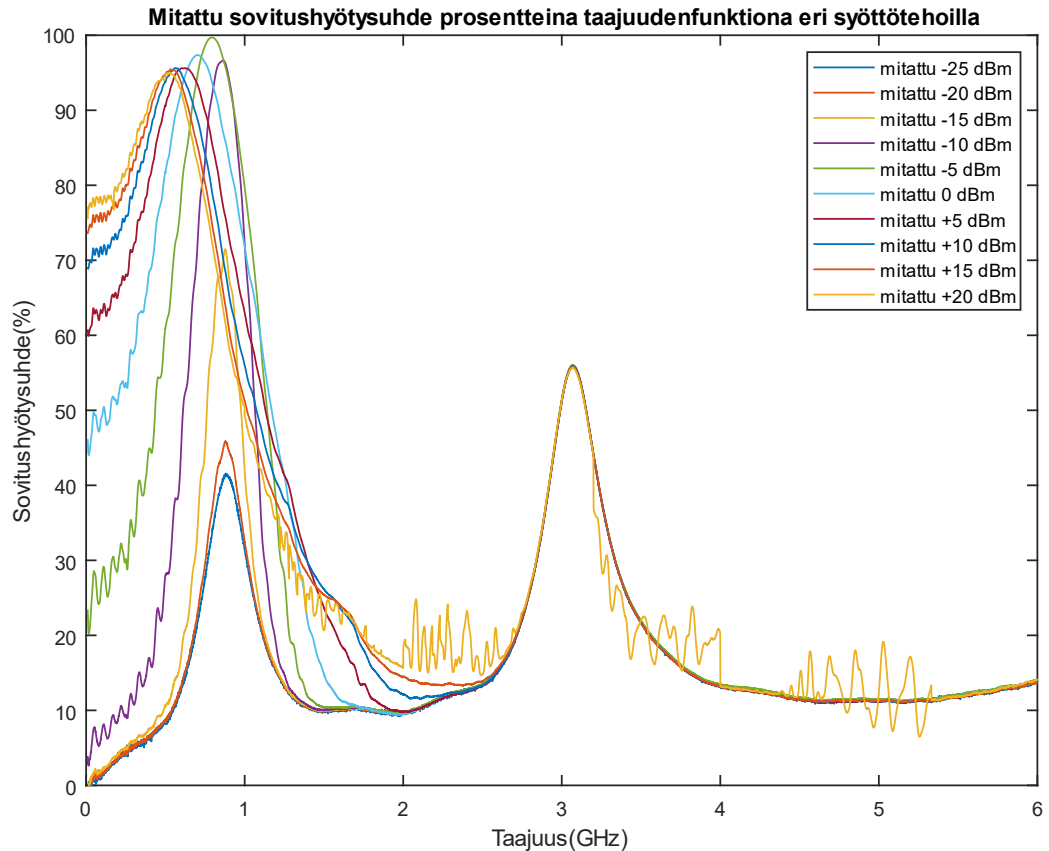
4.5 Kytännän mittaaminen

Sovituspiirien simulointien ja piirin valinnan jälkeen hankittiin tarvittavat komponentit ja piirilevy piirin rakentamiseksi. Sovituspiirin komponenteiksi valikoituivat Muratan 0402-koon pintaliitoskomponentit. Kelaksi valikoitui 24 nH:n kela ja kondensaattoriksi valikoitui 0,5 pF:n kondensaattori. Lisäksi piiriin tarvittiin 50 Ω :n SMA-liitin sisääntuloksi, 287 Ω :n kuormavastus, 100 pF:n kondensaattori ulostuloon ja itse PCC110-piiri. Mittauskytkentä on esitettyä kuvassa 11.



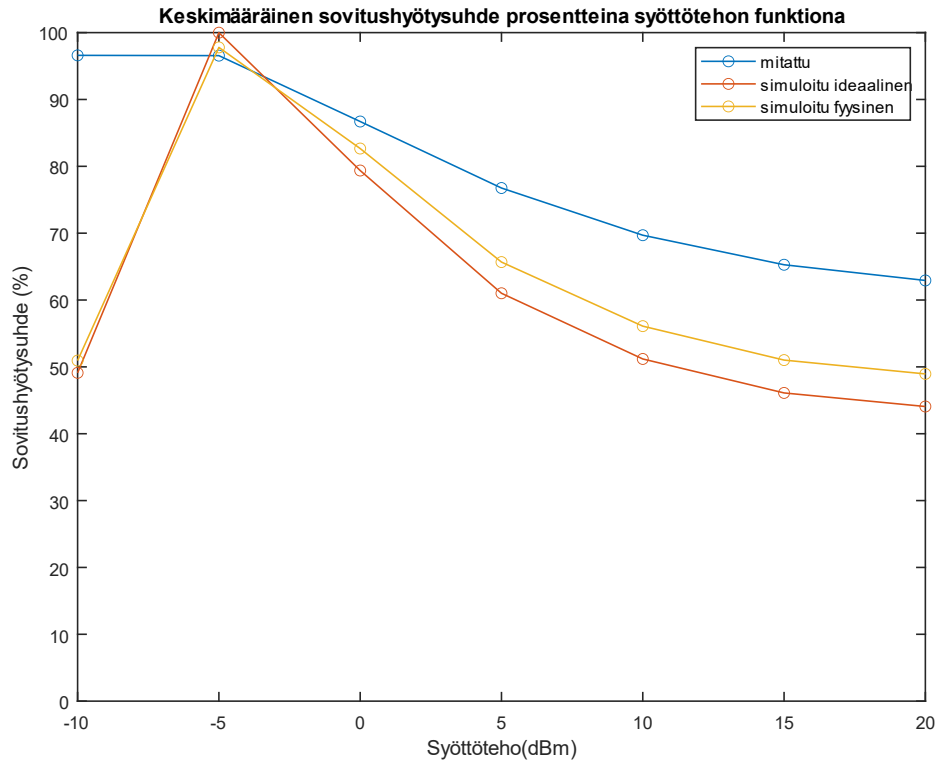
Kuva 11 Mittauskytkentä piirilevyllä.

Piirin juottamisen jälkeen siirryttiin mittauksiin. Ennen piirin kytkemistä piirianalysointiin, analysointin mittakaapelin vaikutus kalibroitiin, jotta siitä ei aiheudu mittavirhettä. Tämän jälkeen piiri kytkettiin analysointiin ja mitattiin heijastuskertoimen 10 MHz – 6 GHz taajuudella useilla eri syöttötehoilla. Ensimmäisen piirin tuloksista huomattiin, että ne eivät vastaa simulointeja, jonka vuoksi piiri juotettiin uudestaan käyttäen uusia komponentteja ja piirilevyä. Toisen piirin mittatulokset vaikuttivat paremmin vastaavan simuloituja. Luultavasti ensimmäisen piirin kohdalla juottaessa, PCC110-piiri vaurioitui staattisesta sähköstä tai lämmöstä. Heijastuskertoindata otettiin talteen piirianalysointilaitteelta ja tätä käytettiin myöhemmin Matlabissa, jossa laskettiin heijastuskertoimen avulla kytkennän sovitushyötysuhde. Nämä tulokset on esitetty kuvassa 12.

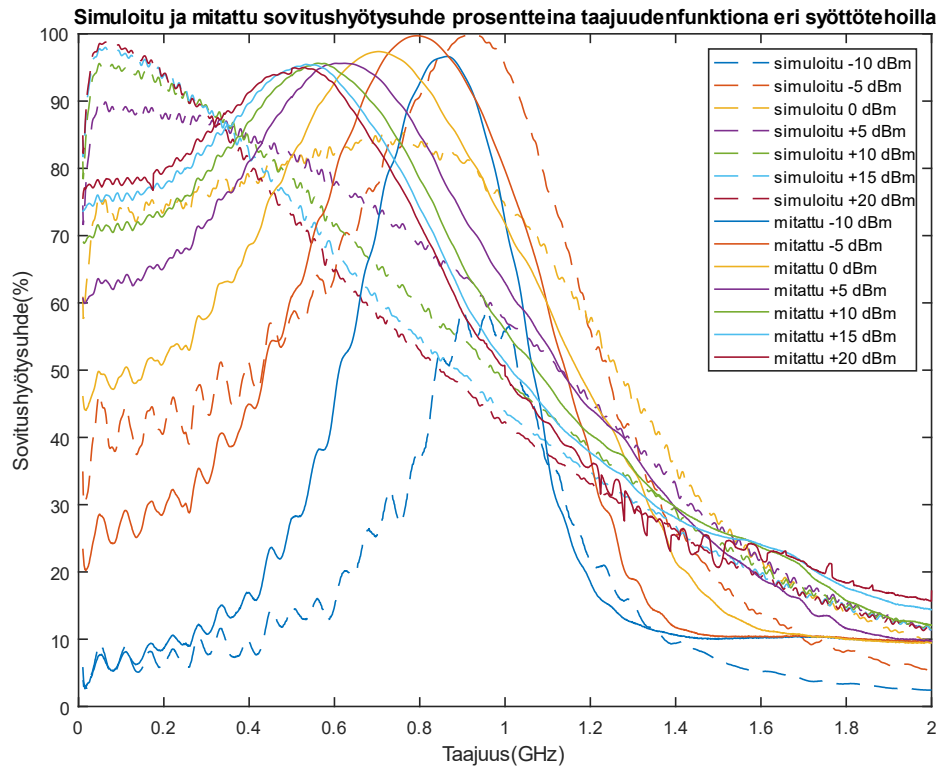


Kuva 12. Piirianalysoijalla sovituspiiristä mitattu sovitushyötysuhde taajuuden funktiona syöttötehoilla -25 - +20 dBm.

Piirretystä kuvaajasta voidaan huomata, että sovitushyötysuhteet ovat melko korkeita koko tehoalueella. Huiput ovat yli 90 % sovitushyötysuhteella lukuun ottamatta pienimpiä tehoja -15 dBm, -20 dBm ja -25 dBm. Huiput ovat kuitenkin levittyneet melko laajalle taajuusakselilla, mikä ei ole suotavaa. Tästä johtuen parasta sovitusta ei saavuteta halutulla 863–873 MHz kaistalla. Tällä kaistalla saatuja sovitusarvoja voidaan tarkastella laskemalla keskimääräinen sovitushyötysuhde kyseisellä alueella samaan tapaan kuin simulaatioiden kohdalla kappaleessa 4.4. Kuvassa 13 on esitetty mitattu, ideaalisilla komponenteilla simuloitu ja fyysisillä komponenteilla simuloitu keskimääräinen sovitushyötysuhde. Lisäksi kuvassa 14 on vertailtu mitattua ja fyysisillä komponenteilla simuloitua sovitushyötysuhdetta taajuuden funktiona 0,10–2 GHz taajuusalueella.



Kuva 13. Keskimääräinen sovitushyötysuhde 863–873 MHz:n taajuusalueella, mitatut sekä simuloitut tulokset.



Kuva 14. Mitattu ja simuloitu sovitushyötysuhde taajuuden funktiona 0,10–2 GHz taajuusalueella.

Kuvasta 13 voidaan huomata, että mitatun piirin sovitushyötysuhde on tasaisempi kuin simuloitujen piirien koko syöttötehoalueella. Sovitushyötysuhde on parantunut kaikilla muilla syöttötehon arvoilla kuin -5 dBm, jolla sovitushyötysuhde olikin simulaatioissa lähellä 100 %:a. Varsinkin -10 dBm teholla korkea yli 40 %-yksikön sovitushyötysuhteen nousu viittaa siihen, että varsinaisesti tasasuuntauspiirille ei ole näin suurta osaa tehosta siirtynyt, vaan osa tehosta on komponenttien ja kytkennän epäideaalisuuksien vuoksi muuttunut hukkatehoksi sovituspiirissä. Lisäksi eroa simuloituihin ja mitattuihin tuloksiin tuo se, että samalla syöttöteholla mittauksessa ja simulaatiossa tasasuuntauspiirin impedanssi on eri suuri. Tämä johtuu siitä, että mittauksessa sovituspiiri kasvattaa tasasuuntauspiirille menevää tehoa ja näin ollen piirin impedanssi muuttuu. Simuloinneissa taas tasasuuntauspiirin impedanssi pysyy vakiona riippumatta, onko sovituspiiri välissä vai ei.

Kuvasta 14 nähdään, miten sovitushyötysuhteiden piikit ovat siirtyneet mitatuissa tuloksissa verrattuna simuloituihin. Kuitenkin mitatut tulokset ovat melko hyviä ja vastaavat jotakuinkin simuloituja tuloksia. Kytkentää voisi parantaa muuttamalla sovituskomponenttiarvoja, jolloin saataisiin huiput paremmin osumaan 868 MHz:n taajuudelle. Mitatut heijastuskertoimet voitaisiin merkitä Smithin kartalle ja heijastuskertoimien sijainnista voitaisiin karkeasti määrittää mihin suuntaan sovituskomponenttiarvoja tulisi muuttaa, jotta sovitus olisi parempi.

5. YHTEENVETO

Tässä työssä käsiteltiin radiotaajuista energiansiirtoa ja impedanssisovitusta. Työssä käsiteltiin aluksi langatonta energiansiirtoa yleisesti sekä tarkemmin radiotaajuista langatonta energiansiirtoa. Tämän jälkeen käsiteltiin impedanssisovitusta tarkoituksena myöhemmin rakentaa sovituspiiri PCC110-tasasuuntauspiirille. Impedanssisovitus on kuorman ja lähteen sovittamista siten, että mahdollisimman suuri osa lähteen syöttämästä tehosta siirtyy kuormaan. Impedanssisovitukselle on useita eri tapoja ja piirityyppejä, joilla on erilaiset ominaisuudet. Tässä työssä syvennyttiin L-sovituspiiriin ja todettiin sen olevan sopiva vaihtoehto työn tutkimusosaan. L-sovituspiiri sopii tilanteisiin, joissa halutaan tehdä sovitus, joka toimii optimaalisesti vain tietyllä taajuudella.

L-sovituspiirin suunnittelussa pitää tietää lähde- ja kuormaimpedanssit. Näiden avulla voidaan ensin valita sopiva sovitustopologia eli mitä piirikomponentteja käytetään ja miten ne asetetaan. Tämän jälkeen voidaan piirikomponenttien arvot määrittää. Työssä tarkasteltiin arvojen määrittämistä kolmella tavalla: Smithin kartan avulla, laskemalla sekä ADS-ohjelmistosta löytyvällä työkalulla.

Tutkimusosassa PCC110 sovitettiin toimimaan 868 MHz:n taajuudella. Piirin heijastuskerroin mitattiin ja tästä voitiin edelleen määrittää piirin impedanssi. Impedanssi vaihteli syöttötehon funktiona ja tästä syystä sovitus voitiin tehdä optimaaliseksi vain tietylle syöttöteholle. Simulaatioita varten tehtiin sovituspiirit 7:lle eri syöttöteholle (-10, -5, 0, +5, +10, +15 ja +20 dBm). Näitä piirejä simuloitiin eri syöttötehoilla ja pyrittiin valitsemaan sopivin piiri rakennettavaksi mittauksia varten. Piiriä valittaessa huomioitiin erityisesti piirin toiminta pienillä syöttötehoilla, mutta kuitenkin niin, että se toimisi myös kohtalaisesti isoilla tehoilla. Kompromissiksi valikoitui +5 dBm:n teholla sovitettu piiri.

Kytkeä rakennettiin piirilevylle ja sille suoritettiin mittaukset piirianalysointilaitteella. Piirin heijastuskerroin mitattiin samaan tapaan kuin aiemmin ilman sovituspiiriä. Saadut tulokset piirrettiin kuvaajiin ja näitä voitiin vertailla simuloituihin tuloksiin. Huomattiin, että simuloitujen ja mitattujen tulosten välillä oli hieman eroa siinä missä sovitushyötysuhteiden huiput olivat ja kuinka korkeita huiput olivat. Tähän syyksi epäiltiin sitä, että mittauksissa tasasuuntauspiirin impedanssi ei vastannut enää simulaatiota, koska sovituspiirin vuoksi piirille siirtyi suurempi teho. Lisäksi osa tehosta kului piirin epäideaalisuuksissa. Lopuksi todettiin, että rakennettu piiri toimi kuitenkin melko hyvin ja paremman sovituksen saavuttamiseksi olisi mahdollista hienosäätää komponenttiarvoja.

LÄHTEET

- [1] Shinohara, Naoki. Wireless Power Transmission via Radiowaves. Englanti ;; ISTE Ltd, 2014. Viitattu 15.3.2020. Saatavissa: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=1599324>
- [2] Hubregt J. Visser. A brief history of radiative wireless power transfer. Viitattu 15.3.2020. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/7928700>
- [3] www.wipo-wirelesspower.com. Resonant Capacitive Coupling. Viitattu 15.3.2020 Saatavissa: <https://www.wipo-wirelesspower.com/technology/resonant-capacitive-coupling>
- [4] Gopinath, Ashwin. All About Transferring Power Wirelessly. Julkaisussa: Electronics for You. s. 52–56. Viitattu 15.3.2020 Saatavissa: https://search.proquest.com/docview/1519070843?rfr_id=info%3Axri%2Fsid%3Aprimo
- [5] Brown, William C. The History of Wireless Power Transmission. Julkaisussa: Solar Energy (1996): s. 3–21. Viitattu 15.3.2020 Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X9500080B>
- [6] M. T. Bevacqua, G. G. Bellizzi, M. Merenda. Field Focusing for Energy Harvesting Applications in Smart RFID Tag. Viitattu 13.5.2021. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8892014>
- [7] Lu, Yan; Ki, Wing-Hung (2017). CMOS Integrated Circuit Design for Wireless Power Transfer. Springer. pp. 2–3. ISBN 978-9811026157. Viitattu 15.3.2020. Saatavissa: <https://books.google.fi/books?id=7fwwDwAAQBAJ&printsec=front-cover&hl=fi#v=onepage&q&f=false>
- [8] H. Lakhal, M. Dhieb, H. Ghariani and M. Lahiani. Wireless power transmission technologies and applications, 14th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control & Computer Engineering - STA'2013, Sousse, 2013, pp. 168-173. Viitattu 15.3.2020. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6783125>
- [9] David M. Pozar. Microwave engineering, Fourth edition. Viitattu 22.4.2021.
- [10] Dr. A. Govind. Antenna Impedance Matching – Simplified. Viitattu 22.4.2021 Saatavissa: <https://abracon.com/uploads/resources/Abracon-White-Paper-Antenna-Impedance-Matching.pdf>
- [11] PCC110/PCC210 infolehti. Viitattu 22.4.2021. Saatavissa: <https://www.powercastco.com/wp-content/uploads/2018/06/PCC110-PCC210-Overview-V1.6-ONE-PAGE.pdf>
- [12] Bogatin, Eric. Signal Integrity - Simplified. Viitattu 22.4.2021. Saatavissa: <https://learning.oreilly.com/library/view/signal-integrity-/0130669466/>

- [13] Murata GJM -sarjan kondensaattorit. Viitattu 22.4.2021. Saatavissa: <https://www.murata.com/en-global/products/capacitor/ceramiccapacitor/smd/gjm>
- [14] Murata LQW -sarjan kelat. Viitattu 22.4.2021. Saatavissa: <https://article.murata.com/en-sg/article/lqw-series-of-wire-wound-type-radio-frequency-inductors>