

Timo Niskala

Langattoman tehonsiirron lisäys kannettavaan tietokoneeseen

Sähkötekniikan laitos

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkistettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Espoossa 7.6.2011

Työn valvoja:

Prof. Seppo Ovaska

Työn ohjaaja:

DI Sami Anttila

Tekijä: Timo Niskala		
Työn nimi: Langattoman tehonsiirron toteuttaminen kannettavaan tietokoneeseen		
Päivämäärä: 6.6.2011	Kieli: Suomi	Sivumäärä 8+59
Sähkötekniikan laitos		
Professori: Tehoelektroniikka		Koodi: S-81
Valvoja: Prof. Seppo Ovaska		
Ohjaaja: DI Sami Anttila		
<p>Tässä diplomityössä kuvataan langattoman tehonsiirtojärjestelmän rakentamista kannettavaan tietokoneeseen.</p> <p>Työn tarkoituksena oli saada aikaan lähetin-vastaanotin-pari, jonka avulla voitaisiin perehtyä täydellisen langattomuuden vaikutuksiin kannettavan tietokoneen käyttöön.</p> <p>Langaton tehonsiirtojärjestelmä perustuu resonanssi-induktioon, johon liittyvä teoria työssä myös esitellään. Koska tekniikka hyödyntää voimakkaita magneettikenttiä, myös niiden turvallisuuteen ja sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen on työssä paneuduttu.</p> <p>Työssä on esitelty langattoman laiteparin rakentamiseen tarvittavien komponenttien valintaan ja suunnitteluun tarvittavia tietoja.</p> <p>Työssä esitellään myös rakennettujen prototyyppien teknisiä ratkaisuja sekä toimintalogiikkaa.</p>		
Avainsanat: Langaton, tehonsiirto, kannettava, tietokone, lataus, resonanssi-induktio		

Author: Timo Niskala

Title: Implementation of a wireless powering system for a notebook computer

Date: 6.6.2011

Language: Finnish

Number of Pages:8+59

Department of Electrical Engineering

Professorship: Power Electronics

Code: S-81

Supervisor: Prof. Seppo Ovaska

Instructor: DI Sami Anttila

This master's thesis describes the design procedure of a wireless charging device for a notebook computer.

The aim of the work was to build a transmitter-receiver-pair to examine the usability enhancement provided by total wirelessness in notebook computers.

The wireless power transfer of the system is based on a resonance inductance, theory of which is also covered in this thesis. The technology involves usage of a strong magnetic field, therefore the safety aspects of magnetic fields is covered in this thesis. Also related electromagnetic compability issues are studied.

This thesis covers the selection criteria of the components of the wireless power transfer system. It also presents the technical details and functional logic of the built prototype.

Keywords: wireless, power transfer, laptop, notebook, powering, resonance inductance

Esipuhe

Diplomityö tehtiin Powerkiss Oy:ssä jatkona Tulevaisuuden oppimisympäristöt -projektille, jota varten kannettavan tietokoneen langaton latausjärjestelmä alunperin rakennettiin.

Valmistumiseni diplomi-insinööriksi ei ollut itsestään selvyys koulutieni alkupäässä. Useat opettajani kannustivat minua opintojeni varrella, mikä johti lopulta akateemiseen kunnostautumiseen. Muutamat heistä ansaitsevat tulla mainituksi jätettyään unohtumattoman jälkensä nuoren miehen psyykeeseen. Kiitän erityisesti Rauno Hakolaa, joka herätti kiinnostukseni elektroniikkaan, Marketta Lindströmiä, joka ensimmäisenä laittoi minut tekemään töitä opintojeni eteen sekä Teuvo Jännäriä, joka opetti minulle paljon elektroniikasta.

Tähän diplomityöhön liittyen haluan kiittää Maija Itkosta, joka on mahdollistanut työn tekemisen, Sami Anttilaa, joka on jakanut tietämystään langattomasta latauksesta, Mikko Koskista, joka on auttanut monissa ongelmatilanteissa ja tietenkin Seppo Ovaskaa, joka on johdattanut minua työssäni.

Kiitän myös muita Powerkiss Oy:n työntekijöitä sekä Aalto Design Factoryn väkeä. On ollut opettavaista työskennellä kanssanne.

Espoossa 3.6.2011

Timo Niskala

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	1
1.1	Langattoman latausjärjestelmän kohde.....	1
1.1.1	Tulevaisuuden oppimisympäristöt.....	1
1.1.2	Kannettavat tietokoneet opetuskäytössä.....	1
1.1.3	Langattoman latausjärjestelmän edut opetuskäytössä.....	2
1.1.4	Vastaavat markkinoilla olevat ratkaisut.....	2
1.1.5	Johdossa kova kilpailija.....	2
1.1.6	Prototyypiltä halutut ominaisuudet.....	3
2	Resonanssi-induktanssiin perustuva tehonsiirto	4
2.1	Historia.....	4
2.1.1	Resonanssi-induktanssin hyväksikäyttö.....	4
2.1.2	Muut langattomat tehonsiirtotavat.....	4
2.1.3	Miksi juuri nyt?.....	4
2.2	Teoria.....	5
2.2.1	Antenni induktiivisessä lähikentässä.....	5
2.2.2	Kenttäyhtälöt.....	5
2.2.3	Kytkeytyminen.....	6
2.2.4	LC-resonaattori.....	7
2.2.5	Resonanssipiirin magneetti- ja sähkökentän energia.....	8
2.2.6	Impedanssin heijastuminen.....	8
2.3	Vahvistintopologiat.....	10
2.3.1	Puolisiltakatkoja.....	10
2.3.2	Kokosiltakatkoja.....	11
2.3.3	D-luokka.....	11
2.3.4	Lineaarinen vahvistin	11
2.4	Komponentit ja hyötysuhde.....	13
2.4.1	Antennikela.....	13
2.4.2	Resonaattorikondensaattori.....	15
2.4.3	Kytkinkomponentit.....	17
2.4.4	Diodit	18
2.4.5	Vaimenninpiiri.....	19
2.5	Sähkömagneettinen yhteensopivuus	19
2.5.1	Häiriökenttien muodostumismekanismit.....	20
2.5.2	Resonanssit piirilevyllä.....	21
2.5.3	Yhteismuotoisen virran kuristin.....	23
2.5.4	Piirilevysuunnittelu.....	24
2.5.5	Kotelointi.....	25
2.6	Magneettikentän turvallisuus.....	27
2.6.1	Lähettimen muodostamat kentät.....	27
2.6.2	Ionisoimatonta säteilyä.....	27
2.6.3	Ominaisabsorptionopeus.....	28
2.6.4	Altistumisrajat.....	29
2.6.5	Solutason vaikutukset.....	31
2.6.6	Lisääntymisterveys.....	32
3	Langattoman latausjärjestelmän suunnittelu.....	33
3.1	Latausjärjestelmän toimintalohkot.....	33
3.2	Latausjärjestelmälle asetetut vaatimukset.....	34
3.3	Kannettava tietokone.....	34

3.3.1	Kannettavien tietokoneiden valinta projektiin.....	34
3.3.2	HP:n Smart AC-tekniikka.....	35
3.3.3	Kannettava tietokone kuormana.....	35
3.4	Latausjärjestelmän toimintalogiikan suunnittelu.....	35
3.5	Tehon vastaanottimen suunnittelu.....	36
3.5.1	Vastaanottimen elektroninen suunnittelu.....	36
3.5.2	Vastaanottimen komponenttien valinta.....	36
3.5.3	Ohjelmiston toimintalogiikka.....	37
3.5.4	Vastaanottimen mekaaninen suunnittelu.....	38
3.5.5	Tehon vastaanottimien asennus kannettavaan tietokoneeseen.....	39
3.6	Tehon lähettimen suunnittelu.....	39
3.6.1	Vahvistintopologian ja käyttöjännitteen valinta	39
3.6.2	Lähettimen elektroninen suunnittelu ja komponenttien valinta.....	40
3.6.3	Lähettimen mekaaninen suunnittelu.....	40
3.6.4	Lähettimen ohjelmiston toimintalogiikka.....	41
3.6.5	Lähetystaajuuden valinta.....	43
3.7	Tehonsiirtojärjestelmän mittauksia.....	44
3.7.1	Lähetystaajuuden vaikutus haku- ja lataustehoon	44
3.8	Käyttäjäkokemuksia Educa 2010-messuilta	45
4	Johtopäätökset.....	46
4.1	Täyttyneet odotukset.....	46
4.2	Järjestelmään jääneet puutteet.....	46
4.3	Järjestelmän jatkokehityspotentiaali	46
5	Lähteet.....	47
6	Liitteet.....	48
6.1	Tehon vastaanottimen kytkentäkaavio.....	48
6.2	Tehon vastaanottimen osasijoittelukuva.....	50
6.3	Tehon vastaanottimen osaluettelo.....	51
6.4	Tehon lähettimen kytkentäkaavio	52
6.5	Tehon lähettimen osasijoittelukuva.....	54
6.6	Tehon lähettimen osaluettelo.....	55
6.7	Lähetystaajuuden valintamittaukset	56
6.7.1	Mittaustulokset.....	56
6.7.2	Lähetystehon kuvaajat.....	57
6.7.3	Hyötysuhteen kuvaajat.....	58
6.7.4	Lähetystehon muutoksen kuvaajat.....	59

Lyhenteet

Hz	hertsi, taajuuden yksikkö
A	ampeeri, virran yksikkö
m	metri, etäisyyden yksikkö
V	voltti, jännitteen yksikkö
T	tesla, magneettivuon tiheyden yksikkö
F	faradi, kapasitanssin yksikkö
H	henry, induktanssin yksikkö
W	watti, tehon yksikkö
Ω	ohmi, impedanssin yksikkö
ADC	Analog-to-Digital Converter, analogia-digitaali-muunnin
PWM	Pulse Width Modulation, pulssinleveysmodulaatio
LSK	Load Shift Keying, kuormamodulaatio
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory. Muistityyppi, joka ei tyhjene prosessorin virran katkaisun yhteydessä.
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver-Transmitter. Monipuolinen sarjaliikenneväylä.
EMC	Electromagnetic compability, Sähkömagneettinen yhteensopivuus.

Luonnonvakiot

μ_0	tyhjiön permeabiliteetti, $4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$
h	Planckin vakio, $6,626 \cdot 10^{-34} \text{Js}$

Symbolit

f	taajuus [Hz]
r	etäisyys [m], säde pallokoordinaatistossa
μ	permeabiliteetti [H/m]
P	teho [W]
λ	aallonpituus [m]
H	magneettikentän voimakkuus [A/m]
B	magneettivuon tiheys [T]
t	aika [s]
Φ	magneettivuo [Wb]
I	virta [A]
L	induktanssi [H], kela
R	resistanssi [Ω]
Z	impedanssi [Ω]
C	kapasitanssi [F]
k	kytkentäkerroin
M	keskinäisinduktanssi [H]
ω	kulmataajuus [rad/s]
φ	atsimuuttikulma pallokoordinaatistossa
θ	elevaatiokulma pallokoordinaatistossa
Q	hyvyysluku
δ	tunkeutumissyvyys [m]
σ	johtavuus [$1/\Omega\text{m}$]
ρ	tiheys [kg/m^3]

Operaattorit

$$\frac{\partial}{\partial x} y = \frac{dy}{dx} \quad y:n \text{ osittaisderivaatta } x:n \text{ suhteen}$$

\times ristitulo

$\nabla \times$ roottori

1 Johdanto

1.1 Langattoman latausjärjestelmän kohde

1.1.1 Tulevaisuuden oppimisympäristöt

Powerkiss Oy otti osaa Kaarinan koulun Tulevaisuuden oppimisympäristöt -projektiin. Koulun rehtori Marko Kuuskorpi yhdisti projektissa ennakkoluulottomasti uusia tekniikoita luodakseen luokkatilan, joka näyttäisi suuntaa tulevaisuuden kouluille. Projektin oppimisympäristössä yhdistettiin kaupallinen tietoverkon yli toimiva oppimisportaali, jonka hyödyntämiseen oppilaat käyttivät kannettavia tietokoneita. Lisäksi projektiin varattu suuri luokkatila jaettiin osiin, jotka akustoinnin, sisustuksen, audiovisuaalisin ratkaisuin ja arkkitehtuurisin keinoin yritettiin saada toimimaan erillisinä tiloina pienemmille opetusryhmille.

Projektin osa-alueiden, verkkoportaalin ja kakofonisen luokkatilan, erillistä vaikutusta oppimistuloksiin ei ole todistettu tieteellisesti kestävin vertailukokein. Kattavaa vertailua perinteiseen oppimisympäristöön ei tehty nytkään työn vaatimien resurssien puutteen vuoksi. Oppimisympäristöjen vaikutusta oppimistuloksiin on vaikea kvantisoida. Se vaatisi hyvin suuret vertailuryhmät, vuosien seurannan ja raskaan tilastollisen analyysin erottaakseen oppimisympäristön absoluuttisen vaikutuksen muista oppimistuloksiin vaikuttavista tekijöistä. Muun muassa oppilasmateriaan heterogeenisyys, opettajien kyvyt ja yksittäisten luokkien aikaisemmin saama opetus vaikuttavat huomattavasti saataviin oppimistuloksiin. Lisäksi olisi kyettävä poistamaan monimutkaisten järjestelmien sisäistämisestä aiheutuva väliaikainen häiriö.

Kannettavien tietokoneiden käytännöllisyyden lisäämiseksi projektissa haluttiin selvittää mahdollisuutta ladata tietokoneita langattomasti. Powerkiss Oy suunnitteli ja valmisti latausjärjestelmän prototyypin mittatilaustyönä Tulevaisuuden oppimisympäristöt -projektia varten. Tähän diplomityöhön on koottu prototyypin luomiseen tarvittavaa tietoa sekä kuvaus prototyypin valmistamisesta.

1.1.2 Kannettavat tietokoneet opetuskäytössä

Kannettavien tietokoneiden opetuskäyttöä häiritsee joukko epäkäytännöllisyyksiä. Koneita säilytetään tarkoitukseen rakennetuissa latausvaunuissa. Vaunut kuluttavat akkujen latautuessa niin paljon virtaa, ettei niitä voi kytkeä normaaleihin 16 ampeerin pistorasioihin. Latausvaunuille on rakennettava tarkoitukseen varattuja 3-vaiheisia pistorasioita, joihin ääreen vaunut on tuotava lataukseen. Koska kaikkia luokkatiloja ei voida varustaa 3-vaihepistorasioilla, on latausvaunut koneineen palautettava aina varastoon oppituntien jälkeen.

Kannettavien tietokoneiden akut kuluvat käytössä ja on vain ajan kysymys, koska koneen akku ei enää kykene pitämään varausta kokonaisen oppituntin ajan, kaksoistunneista puhumattakaan. Yhden ainoan tietokoneen akun loppuminen riittää keskeyttämään koko opetustilanteen, joten ongelma tulee varmasti esiin konekannalla, joka muuten olisi täysin kelvollista opetuskäyttöön. Lisäksi toimiessaan akkujen varassa koneet siirtyvät virransäästötilaan, mikä hidastaa niiden toimintaa.

Yksi ongelman ratkaiseva mahdollisuus on siirtää virtalähteet latausvaunusta tuntien ajaksi työpisteille. Kaikki virtalähteiden siirtelyyn ja kytkemiseen käytetty aika on kuitenkin pois

opetuksesta. 45 minuutin oppitunnista saattaa kuluu jopa kolmannes laitteiden kytkemiseen ja ohjelmistojen käynnistymiseen.

Koneiden palauttaminen latausvaunuun ei myöskään ole ongelmattonta. Varmistuaikseen tietokoneiden latautumisesta opettajan on varmistettava, jokaisen vaunun sisältämän tietokoneen johdon olevan paikallaan. Tämä on aikaa vievää toimintaa, sillä virtalähteet tulee olla kytkettyjä koneisiin sekä virtalähteen verkkojohdon tulee olla oikein kytkettynä molemmista päistä.

1.1.3 Langattoman latausjärjestelmän edut opetuskäytössä

Langattoman latausjärjestelmän rakentaminen latausvaunujen tueksi eliminoisi suurimman osan yllä mainituista ongelmista. Koska työpisteissä olevat lähettimet pitäisivät akkujen varausta yllä, ei latausvaunu aiheuttaisi sulakkeita rikkovaa virtapiikkiä. Oppilaiden ei tarvitsisi kytkeä johdollisia virtalähteitä työskennelläkseen, eivätkä koneet hidastuisi virransäästöominaisuuksien seurauksena. Lisäksi latausvaunun langaton lataus poistaisi tilanteet, joissa koneiden akut ovat tyhjentyneet virtalähteen kiinnittämisen unohduttua. Osa Tulevaisuuden oppimisympäristöt -projektia oli langattoman latauksen toteuttaminen projektissa käytettäviin HP Probook 4310s -kannettaviin tietokoneisiin. Latausjärjestelmää esiteltiin opetustilanteessa Educa 2010-messuilla.

1.1.4 Vastaavat markkinoilla olevat ratkaisut

Dell toi markkinoille langattoman latausjärjestelmäoption Latitude Z -yrityskannettavaansa vuoden 2009 syksyllä [1]. Siinä tehon lähtö on integroitu nuottitelinmäiseen telakka-asemaan ja vastaanotin on huomaamattomissa tietokoneen pohjassa. Dellin langattoman latausjärjestelmän magneettiipiiri on suljettu, jolloin tietokoneen lataus toimii vain koneen ollessa tarkalleen oikeassa paikassa. Langattoman latausteknologian laitteeseen on suunnitellut Fulton Innovation, jonka hallussa on noin 600 langattomaan tehonsiirtoon liittyvää patenttia [2]. Koska langattoman tehonsiirron peruserätykset on tunnettu laajalti vuosikymmenien ajan, ovat yrityksen patentit lähinnä yksittäisten käyttösovellusten suojauskeinoja.

1.1.5 Johdossa kova kilpailija

Perinteisellä johdollisella lataustekniikalla on monia etuja langattomaan järjestelmään verrattuna. Johto on yksinkertainen ja halpa valmistaa. Johdon ympäristöön säteilemä sähkömagneettinen häiriö on minimaalinen ja sen hyötysuhde on lähes ideaalinen. Johdon varassa ladattavaa laitetta voi siirtää mielensä mukaan, kunhan vain pysyy johdon pituuden säteellä lähimmästä pistorasialta.

Johdon haittapuolia ovat lähinnä galvaanisten liittimien vaurioherkkyys ja kuluminen. Täysin hermeettisesti suljettuun laitteeseen on hyvin vaikea rakentaa galvaanista kontaktia.

Näiden ominaisuuksien perusteella langatonta tehonsiirtoa olisi syytä soveltaa kohteisiin, joissa galvaanisen kontaktin käyttö ei ole mahdollista.

1.1.6 Prototyypiltä halutut ominaisuudet

Prototyypin avulla on tarkoitus selvittää, miten kannettavien tietokoneiden käytettävyys muuttuu johdottomaan lataukseen siirryttäessä. Langattoman latausjärjestelmän käytettävyysaasteet liittyvät erityisesti tietokoneen sijoittamiseen latausalueelle. Siksi on tärkeää selvittää, miten hankalaksi käyttäjät kokevat tietokoneen tarkan asemoinnin käytön aikana.

Magneettisten johteiden valmistuksen aloituskustannusten suuruuden vuoksi prototyypin magneettivuo kulkee koko reittinsä ilmassa. Lähettimen muodostama magneettikenttä tulee siten olemaan liian voimakas todelliseen myytävään tuotteeseen. Koska kyseessä on enemmänkin teknologiademonstratio ja tutkimusväline, ei se luo periaatteellista estettä projektin läpiviennille.

Lopullisesti tuotteistettavassa latausjärjestelmässä magneettivuo tultaisiin siirtämään ferriittisydämissä, jolloin vuon reitille jäisi vain pieni ilmaväli laiteparin rajalle. Ferriittimateriaalin permeanssi on huomattavasti ilmaa suurempi, minkä seurauksena vain pieni osa vuosta kulkee ferriitin ulkopuolella. Ferriittisydämen tuoman magneettisen eristyksen ansiosta käyttäjä ja laitetta ympäröivä elektroniikka säästyisivät voimakkaalle magneettikentälle altistumiselta.

2 Resonanssi-induktanssiin perustuva tehonsiirto

2.1 Historia

2.1.1 Resonanssi-induktanssin hyväksikäyttö

Ensimmäinen resonanssi-induktanssin avulla latautuva sydämentahdistin istutettiin potilaaseen 1958 [3]. Varhaisimpien sovellusten, kuulolaitteiden latauksen ja keinosydämien tehon syöttön jälkeen resonanssi-induktanssia on sovellettu moniin kehon sisäisiin tehonsyöttösovelluksiin. Nykyisin tekniikka on vakiintunut erityisesti sydämentahdistimien ja sähköhammasharjojen latauksessa [4].

2.1.2 Muut langattomat tehonsiirtotavat

Langaton tehonsiirto on mahdollista myös sähkökentän tai suunnatun radioaallon avulla. Ensimmäisen tapauksen käytännön sovelluksia rajoittaa sähköjohtimien yleisyys ja niiden luoma oikosulun vaara. Jälkimmäisen kohdalla konstruktiot ovat monimutkaisia, suuria ja kalliita.

Nikola Testa kunnostautui laajalti sähkötekniikassa ja yksi hänen intohimoistaan oli langattoman tehonsiirron toteuttaminen. Tesla rakensi ensimmäisen langattomasti syötetyn hehkulampun vuonna 1895, jonka jälkeen hän omistautui langattoman tehonsiirron kehittelyyn vuosiksi. Teslan työn päämäärä, langaton mailmanlaajuinen tehonsiirtoverkko ei ymmärrettävästi koskaan onnistunut, mutta päämääräänsä tavoitellessaan hän ratkaisi monia aiheeseen liittyviä yksityiskohtia. Teslan esoteerinen luonne ja takaiskut keksintöjensä kaupallistamisessa johtivat hänet eristäytymään ja pidättäytymään julkaisemasta tutkimuksiaan. Lisäksi monet hänen keksinnöistään olivat vuosikymmeniä aikaansa edellä, mikä oli omiaan luomaan miehelle todellisuudesta vieraantuneen hullun tiededemiehen maineen.

Tehonsiirtoa kohdennetuilla radioaalloilla tutkittiin Yhdysvalloissa 50-luvulta alkaen [5]. Vaikka tekniikan häviöt siirtotiellä ovatkin pienet, on millimetrialueen signaalin muodostaminen, suuntaus, vastaanotto ja tasasuuntaus suuria teknisiä haasteita. Magnetronilla muodostetun lähetteen avulla kyettiin siirtämään 100 wattia 13 prosentin hyötysuhteella Raytheonin laboratoriossa vuonna 1963 [5]. 70-luvun puoliväliin mennessä tehonsiirron hyötysuhdetta on saatu nostettua yli 50 %:n. Pian tämän saavutuksen jälkeen kyseinen tutkimusprojekti lopetettiin.

2.1.3 Miksi juuri nyt?

Langattoman tehonsiirron teoria on tunnettu laajalti vuosikymmeniä. Maxwellin yhtälöt, joista resonanssi-induktanssin olennaisin toimintaperiaate on johdettavissa, tunnettiin jo 1800-luvulla. Katkojaan soveltuvia puolijohteita oli saatavilla jo 1960-luvulla, eikä analogisen signaaligeneraattorin rakentaminen 100 kHz:n taajuusalueelle ollut tuolloinkaan suuri tekninen haaste. Olennaisimmat osat langattoman tehonsiirron laitteistosta olisi ollut rakennettavissa jo puolen vuosisadan ajan, joten motivaatio järjestelmien kehittämiseen juuri nyt on selkeästi tullut ei-teknisestä näkökulmasta.

1990-luvun alun jälkeen suuri yleisö on päässyt nauttimaan kehittyvien langattomien tiedonsiirtotekniikoiden suomista eduista. Matkapuhelinten käyttöönotto lisäsi ihmisten liikkumavapautta ja tuottavuutta huomattavasti. 2000-luvulla yleistyneet langattomat lähiverkot ja bluetooth-lisälaitteet ovat nekin mahdollistaneet uusia toimintatapoja sekä helpottaneet monien arkea. 2010-luvulle tultaessa langaton laajakaista on mahdollistanut internetsovellusten tuomisen matkapuhelimeen tuoden käyttäjälle aitoa hyötyä.

Onkin ymmärrettävää, että asiantunteva markkinoija pyrkii käyttämään langattomuuteen yhdistettyä hyviä mielleyhtymiä myydäkseen yhä uusia tuotteita.

Alati kehittyvien ominaisuuksien myötä uusien laitetyyppien, tablet-tietokoneiden ja multimediamatkapuhelimien, toiminta-aika on viime vuosina asetunut yhteen vuorokauteen. Tällöin yhden yön lataamattomuus estää laitteen käytön. Toimivalle ja käytännölliselle latausratkaisulle olisi siten olemassa valmiit markkinat paikoissa, joissa kuluttajat eivät pääse yöksi laturin ääreen.

Mobiililaitteiden lataukselle olisi kysyntää erityisesti liikenteen solmukohdissa ja itse liikennöintivälineissä. Nykyisin olemassa olevien langattomien latausratkaisujen ongelmana on laitekantojen yhteensopimattomuus ja latauspisteiden harvinaisuus. Kyseessä on perinteinen "muna-kana-ongelma", jossa käyttäjät eivät ole halukkaita hankkimaan huonosti tuettua laitetta, eivätkä palveluntarjoajat ole halukkaita investoimaan latausinfrastruktuuriin puuttuvien asiakkaiden takia.

2.2 Teoria

2.2.1 Antenni induktiivisessä lähikentässä

Teho siirtyy lähettimen ja vastaanottimen välillä induktiivisen kytkeytyminen avulla. Lähettimen luoma reaktiivinen lähikenttä vaimenee joko etäisyyden neliöön tai kuutioon verrannollisesti geometriasta riippuen. Reaktiivisen lähikentän energia on yhtä suuri säteilevän lähikentän energian kanssa etäisyydellä $r = \lambda/2\pi$ [6]. 100 kHz:llä Fresnelin lähikenttä alkaa dominoida vasta 477,5 metrin etäisyydellä, joten resonanssi-induktanssiin perustuvat laitteet ovat selkeästi reaktiivisen lähikentän sovelluksia.

2.2.2 Kenttäyhtälöt

Magneetikentän tiheyden H [A/m] ja magneettivuon tiheyden B [Vs/m², T] suhdetta väliaineessa kuvaa materiaalin permeabiliteetti μ . Väliaineen permeabiliteetti ilmoitetaan usein kertoimena suhteessa tyhjiön permeabiliteettiin μ_0 ($\mu = \mu_r \mu_0$), joka on luonnonvakio. Magneetikentän tiheyden ja magneettivuon tiheyden välillä vallitsee lineaarinen yhteys ($B = \mu H$).

Sähköenergia muutetaan lähettimessä magneetikentäksi, jonka energia muutetaan vastaanottimessa takaisin jännitteeksi. Johtimessa kulkeva virta muodostaa johdinta kiertävän magneetikentän. Vastavuoroisesti johdinta kiertävä magneetikenttä indusoi johtimeen virran. Alla esitetään tätä luonnonilmiötä kuvaavat Maxwellin yhtälöt [7].

Virta johtimessa aiheuttaa johtimen kiertävän magneetikentän. Biot-Savartin laki (1) kuvaa differentiaalisen virta-alkion aiheuttamaa differentiaalista magneetikenttäalkiota. Magneettivuontiheys pisteessä voidaan ratkaista integroimalla eri geometrioille (2).

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I d\vec{l} \times \vec{r}}{4\pi r^2} \quad (1)$$

$$B = \oint \frac{\mu_0 I d\vec{l} \times \vec{r}}{4\pi r^2} \quad (2)$$

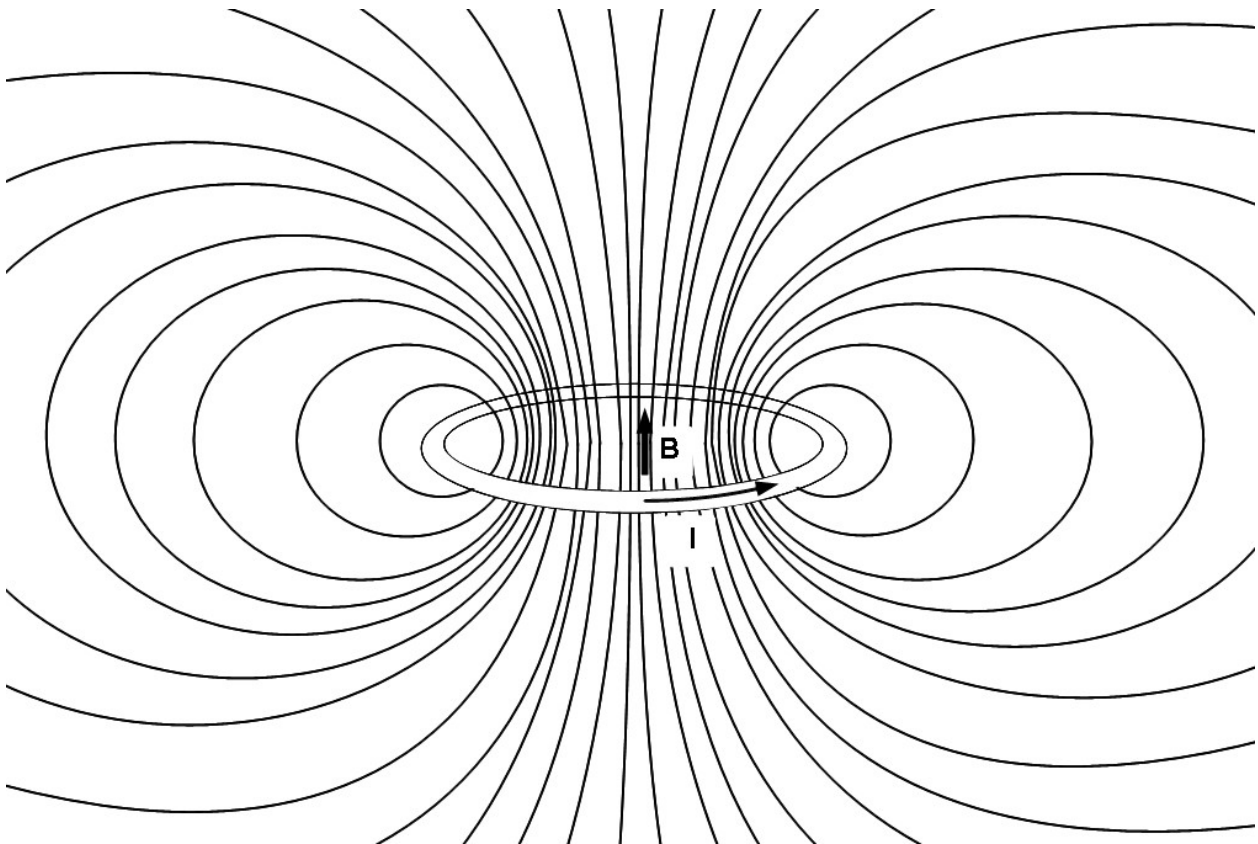
Kaavojen (1) ja (2) avulla voidaan ratkaista magneettivuon tiheys, kun kenttää muodostavan lähteen geometria ja virta tunnetaan. Faradayn lain (3) ja Stokesin integraalilauseen (4) avulla saadaan johdettua yhteys kelan sähkömotoriselle voimalle ja sen läpi kulkevalle magneettivuon

muutosnopeudelle.

$$\nabla \times E(r, t) = -\frac{\partial}{\partial t} B(r, t) \quad (3)$$

$$\oint E \cdot dl = -\int \frac{\partial}{\partial t} B \cdot dS \quad (4)$$

Kaavojen (1) - (4) yleiset muodot vektorioperaattoreineen ovat tottumattomalle vaikeasti hahmotettavissa, mutta niiden tärkein anti on hahmotettavissa kuvassa 1, jossa esitetään magneettivuon muodostuminen johdinsilmukassa. Johdinlenkin ympärille muodostuu toroidimainen magneettivuoviivasto.

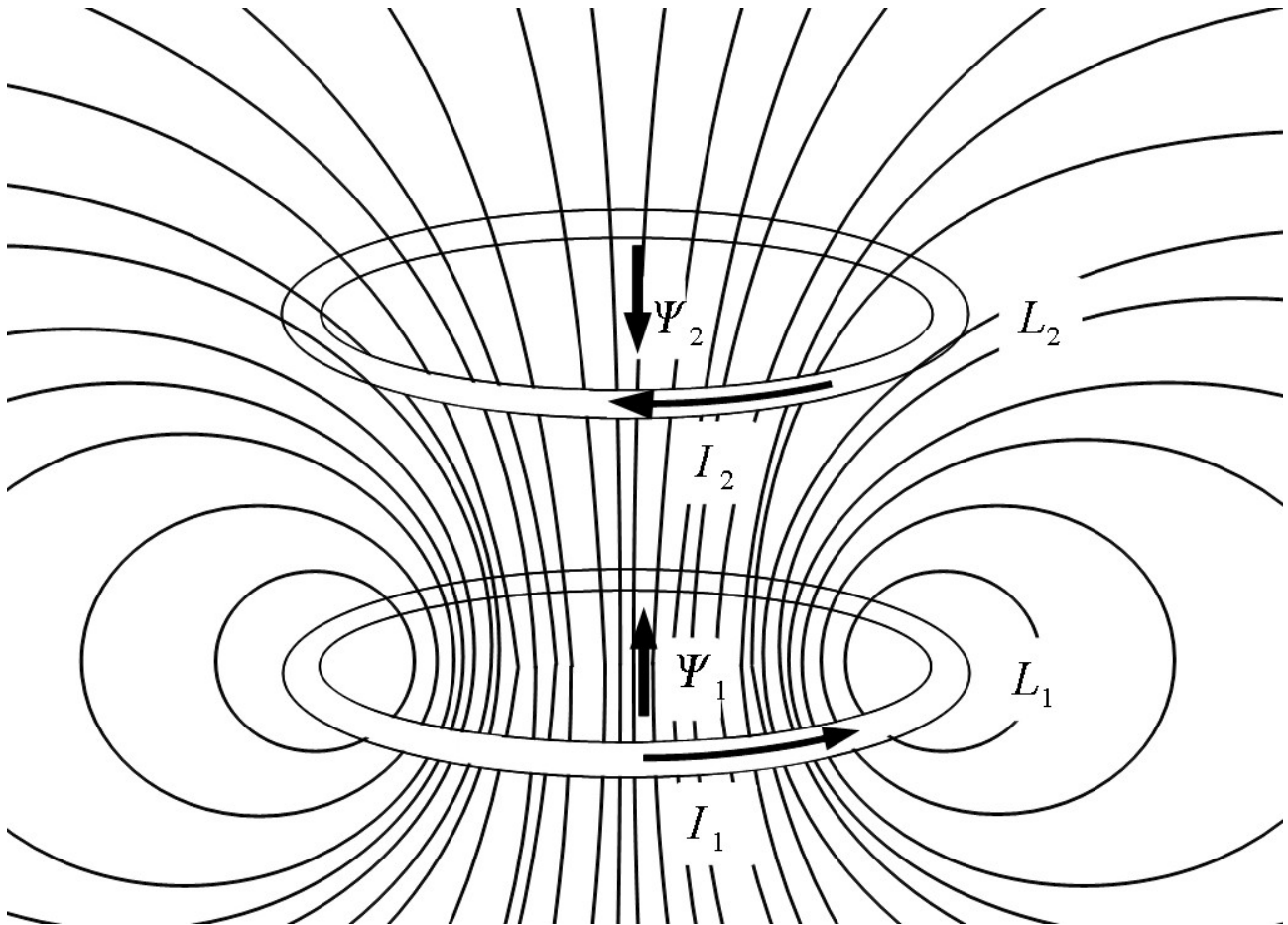


Kuva 1: Johdinlenkin ympärille muodostuva magneettikenttä

$$\Phi = \int \int B \cdot dA \quad (5)$$

Solenoidin magneettivuo Φ voidaan ratkaista magneettivuon tiheyden pintaintegraalilla (5).

2.2.3 Kytkeytyminen



Kuva 2: Kelan L_1 ja L_2 välinen magneettinen kytkeytyminen

Toisen kelan tuominen magneettikenttään siirtää siihen magnetomotorista voimaa. Magnetomotorisen voiman siirtyminen on suoraan verrannollinen vuokomponenttien osamäärään. Kuvassa 2 on esitettyä kahden kelan muodostama magneettinen kytkentä, jossa kelan L_1 läpi kulkevan virran muodostama magneettikenttä indusoituu kelaan L_2 . Kuvasta on selkeyden vuoksi jätetty pois L_2 :n muodostaman vuon Φ_2 kenttäviivat.

2.2.4 LC-resonaattori

Nimensä mukaisesti LC-resonaattori koostuu kelasta ja kondensaattorista. Resonaattorin ominaisresonanssitaajuudella kondensaattorin kapasitanssi kumoaa kelan induktanssin ja resonaattorin impedanssi koostuu pelkästä resistanssista. LC-sarjaresonaattorin impedanssi lasketaan kaavalla (6).

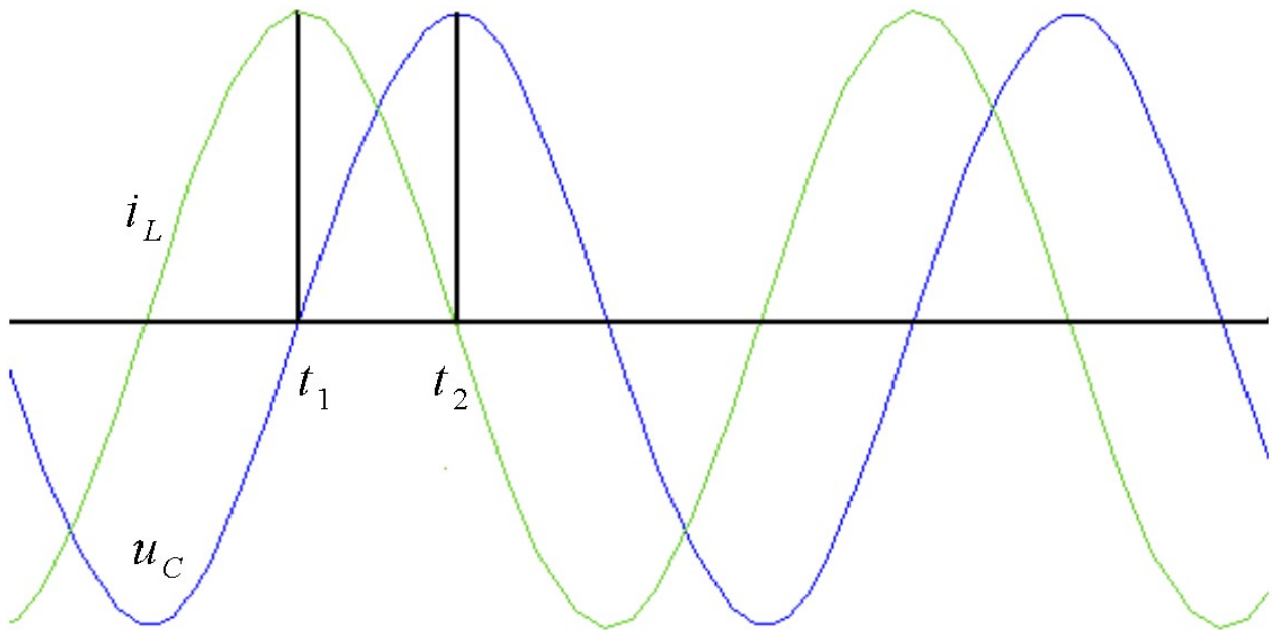
$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (6)$$

Resonaattorin ominaistaajuudella impedanssin reaktiivinen komponentti on nolla. Tästä saadaan ratkaistua resonaattorin ominaistaajuus (7).

$$f_N = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7)$$

2.2.5 Resonanssipiirin magneetti- ja sähkökentän energia

Kelasta ja kondensaattorista muodostetussa resonanssiapiirissä sähkömagneettinen energia sykkii kelan ja kondensaattorin välillä. Kuvassa 3 on resonanssiapiirin kondensaattorin jännite ja virta ajan funktiona. Kuvasta näkee kondensaattorin jännitteen olevan 90 astetta kelan virtaa jäljessä. Hetkellä t_1 kelan virta on suurimmillaan ja kondensaattorin jännite on nollassa. Kelan huippuvirran jälkeen kondensaattori alkaa jälleen varautua, kunnes resonanssiapiirin energia on siirtynyt kokonaan kondensaattoriin. Hetkellä t_2 kondensaattorin jännitteen huippuarvo on saavutettu ja kelan virran arvo on nollassa. Todelliset elektroniikkakomponentit ovat häviöllisiä, minkä takia resonanssiapiirin energia vaimenee eksponentiaalisesti ajan funktiona, jollei piiriin syötetä lisää tehoa.



Kuva 3: Resonanssiapiirin kelan virran ja kondensaattorin jännitteen kuvaajat ajan funktiona

Kelan magneettikentän sisältämä energia voidaan laskea kaavalla (8).

$$E_L = \frac{1}{2} L i^2 \quad (8)$$

Kapasitanssin sähkökentän sisältämä energia voidaan laskea kaavalla (9). Resonanssiapiirin sisältämä energia on usein helpointa selvittää mittaamalla kapasitanssin huippujännite.

$$E_C = \frac{1}{2} C u^2 \quad (9)$$

2.2.6 Impedanssin heijastuminen

Kun ensiökelan magneettikenttään tuodaan toinen kela, siihen indusoituu jännite.

Kytöntäkerroin k kuvaa sitä, kuinka suuri osa ensiökelan magneettikentästä läpäisee toisiokelan, eli kuinka hyvin kelat ovat kytkeytyneet toisiinsa. Kytöntäkerroin lasketaan kaavalla (10).

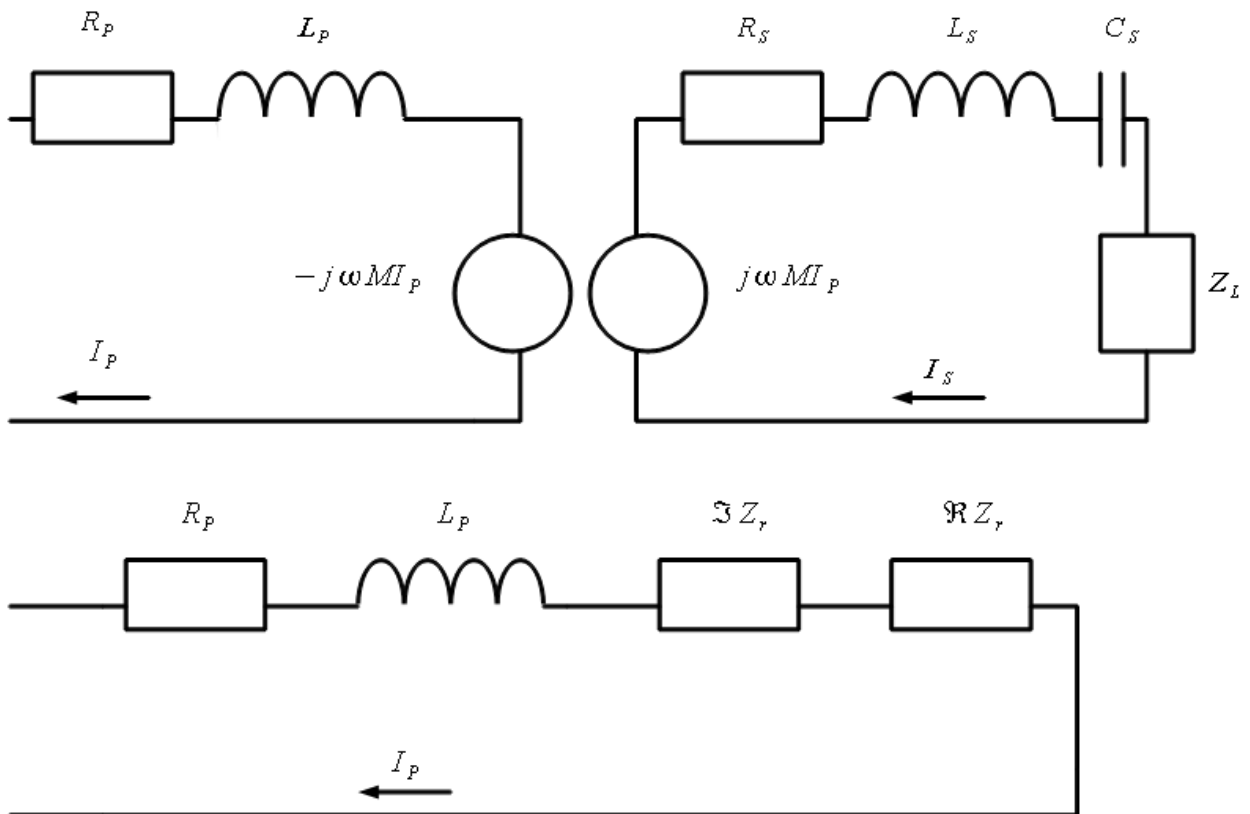
Induktanssit L_{11} ja L_{22} ovat kelojen itseinduktansseja ja M kelojen keskinäisinduktanssi.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_{11}L_{22}}} \quad (10)$$

Vastaanottimen resonaattori voidaan rakentaa rinnakkais- tai sarjamuotoon. Hyötysuhteen optimoimiseksi korkea kuormaimpedanssi kannattaa kytkeä rinnakkaisresonaattoriin ja matalaimpedanssin kuorma sarjasarjaresonaattoriin. Rajataajuus rinnakkais- tai sarjaresonaattorin valinnan välille on laskettavissa kaavalla (11) [8].

$$f_B = \frac{R_L}{2\pi L_S} \quad (11)$$

Kannettavan tietokoneen kuormaimpedanssi, käytettävä lähetystaajuus ja antennikelojen käytännöllinen koko määräävät käytettäväksi kytkennäksi sarjaresonaattorin. Sijoittamalla em. luvut kaavaan 11 selviää, että rinnakkaisresonaattori olisi hyötysuhteeltaan parempi vasta yli 570 kHz:n katkontataajuudella.



Kuva 4: Toision impedanssin sijaiskytkentä

$$Z_S = j\omega L_S + \frac{1}{j\omega C_S} + R_L \quad (12)$$

Ensiöön heijastunut toision impedanssi lasketaan kaavalla (13).

$$Z_r = \frac{\omega^2 M^2}{Z_S} \quad (13)$$

Sijoittamalla vastaanottimen impedanssi Z_S kaavaan (13) ja ryhmittelemällä yhtälö reaali- ja

imaginääriosiin saadaan kaavat (14) ja (15).

$$\Re Z_r = \frac{\omega^4 C_s^2 M^2 R_L}{(\omega^2 C_s L_s - 1)^2 + \omega^2 C_s^2 R_L^2} \quad (14)$$

$$\Im Z_r = \frac{-\omega^3 C_s M^2 (\omega^2 C_s L_s - 1)}{(\omega^2 C_s L_s - 1)^2 + \omega^2 C_s^2 R_L^2} \quad (15)$$

Resonaattorin ominaistajuudella yhtälöt yksinkertaistuvat kaavoiksi (16) ja (17).

$$\Re Z_r = \frac{\omega^2 M^2}{R_L} \quad (16)$$

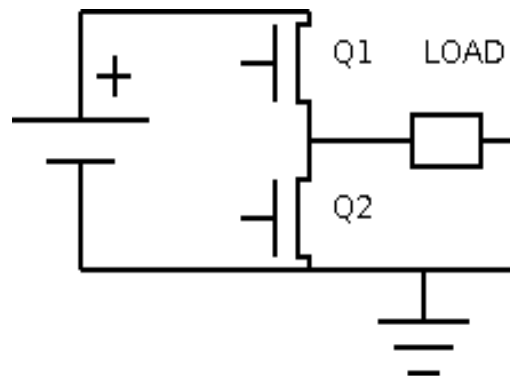
$$\Im Z_r = 0 \quad (17)$$

2.3 Vahvistintopologiat

Signaaligeneraattorilla muodostettu lähete on vahvistettava ennen syöttämistä antennipiiriin. Koska resonaattori toimii itsessään tehokkaana kaistanpäästösuoittimena, ei syötettävän signaalin tarvitse olla sinimuotoista. Sarjaresonaattorin kela vaimentaa resonaattorin ominaistajuutta korkeampia taajuuskomponentteja ja kondensaattori ominaistajuutta matalampia taajuuskomponentteja. Vahvistin on mahdollista rakentaa usealla eri tavalla, joista osa soveltuu langattoman tehonsiirron tarpeisiin toisia paremmin.

2.3.1 Puolisiltakatkoja

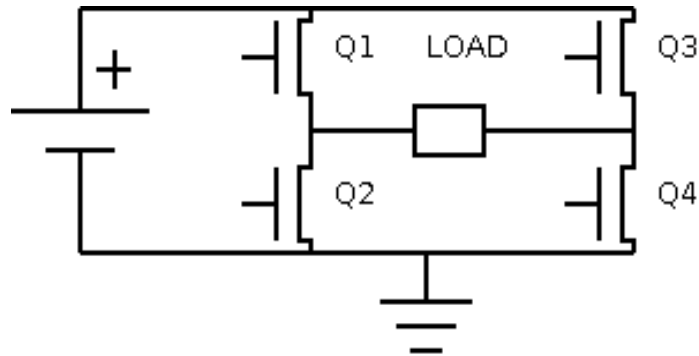
H-puolisilta on yksinkertaisin tapa muodostaa lähettimen tarvitsema 100 kHz:n vaihtojännite. Kuormana olevaa resonanssipiiriä voi hyvin ohjata tasajännitepulsseilla sen suodatusominaisuuksien vuoksi. Kuvassa 5 esitetään puolisiltakytkeä. Siinä kaksi kytkintä katkoo kuorman vuorotellen käyttöjännitettä ja maata. Muuttamalla pulssisuhdetta ja kytkentätaajuutta saadaan säädettyä lähetystehoä. Kytkentä on halpa ja yksinkertainen vähien komponenttien ansiosta. Puolisillan ohjaus on helppoa tarkoitukseen tehdyillä ohjainpiireillä. Ohjainpiirien kaksi tärkeintä tehtävää ovat kuorman ja käyttöjännitteen välisen kytkimen hilalle tarvittavan korkean jännitteen muodostaminen sekä kytkimien yhdenaikaisen johtamisen estäminen. Kytkennän hyötysuhde on korkea, koska transistorit ohjataan avattaessa suoraan saturaatiotilaan. Katkojakäyttöön suunnitelluilla MOSFET:eilla varustetun katkojakytken hyötysuhteeksi voidaan saada yli 95 % [9].



Kuva 5: H-puolisiltakatkoja

2.3.2 Kokosiltakatkoja

H-kokosilta on tasajännitekatkoja, jossa kuorman molempia päitä voidaan yhdistää käyttäjännitteeseen tai maahan (kuva 6). Tällöin kuormaan voidaan ohjata kaksinkertainen jännite H-puolisilta verrattuna, mikä nelinkertaistaa tehon. Kokosiltakatkosten neljää kytkintä ohjaamaan tarvitaan ohjainpiiri, joka muodostaa yläkytkimen hilalle tarvittavan jännitteen sekä estää samojen päiden kytkimien yhdenaikaisen johtotilan. Kokosiltaa on mahdollista käyttää myös puolisoltillassa, jolloin toinen puolisoltilta kytketään jatkuvasti maahan.



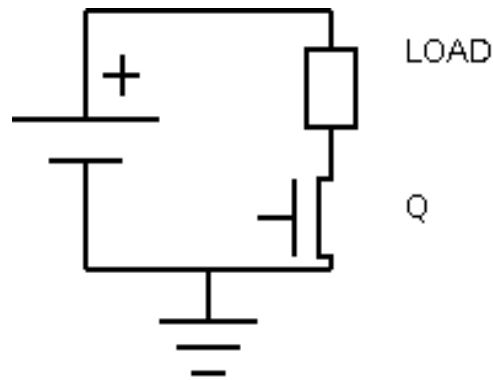
Kuva 6: H-kokosiltakatkoja

2.3.3 D-luokka

Viimeisen vuosikymmenen aikana audiolaitteissa on yleistynyt D-luokan vahvistinkytkentä. Sen tehoaste on periaatteessa toinen yllä esitettyissä siltakytkennöissä, mutta kytkimiä avataan ja suljetaan useita kertoja yhden signaalin jakson aikana. Hyötysignaalia monin verroin korkeampi katkontataajuus parantaa laitteen taajuussisältöä säästämällä energiaa verrattuna perinteisiin AB-luokkaisiin vahvistimiin. Audiosovelluksissa kytkentätaajuus valitaan tyypillisesti vähintään 8-kertaiseksi hyötysignaalin suurimpaan taajuuskomponenttiin verrattuna [10]. 100 kHz:n lähetettä muodostettaessa D-luokkaisen vahvistimen katkontataajuuden tulisi taten olla yhden megaherzin suuruusluokkaa. Niin korkealla taajuudella fettien kytkentähäviöt muodostuvat hyvin ongelmallisiksi. Siksi tätä vahvistintyyppiä ei kannata käyttää lähettimen tehon muodostamiseen. Todettakoon vielä, että langattoman tehonsiirron sovelluksien särövaatimukset eivät ole yhtä korkeat kuin audiosovelluksissa, jolloin matalampikin katkontataajuus saattaisi riittää.

2.3.4 Lineaarinen vahvistin

Lineaarista vahvistinta voi periaatteessa käyttää muodostamaan resonaattorille syötettävä lähete. A-luokan vahvistimen (kuva 7) suurin teoreettinen hyötysuhde on 25 %, eikä se näin ollen sovellu energiatehokkaaseen signaalin muodostukseen [11].



Kuva 7: Lineaarinen vahvistin

B-luokkaisen vahvistimen kytkentä on identtinen H-puolisiltakatkojan kanssa, tai ns. sillattuna H-kokosiltakatkojan kanssa. Luokittelun kannalta ratkaisevan eron aiheuttaa vahvistimien ohjaus. B-luokkaista vahvistinta käytetään muodostamaan sinimuotoista jännitettä, jolloin osa tasajännitteestä kuluu kytkimissä resistiivisiksi häviöiksi. B-luokkaisen vahvistimen suurin teoreettinen hyötysuhde vastuskuormaan on 70,7 % [11]. Lineaarikytkentöjen hyötysuhde jää parhaimmillaankin katkojia matalammaksi, eikä kytkentöjen hyvistä säröominaisuuksista ole langattoman tehonsiirron sovelluksissa merkittävää hyötyä.

2.4 Komponentit ja hyötysuhde

Langattomassa tehonsiirtojärjestelmässä on pitkä ketju toimintoja, jotka muokkaavat siirrettävää tehoa. Jokainen tehon muokkaus on häviöllinen ja järjestelmän kokonaishyötysuhde on kaikkien askelien hyötysuhteiden tulo. Tehonmuokkausketjun osien valinnalla on suuri vaikutus niissä hukkuvaan tehoon. Työn suurimpia haasteita on löytää balanssi erilaisten komponenttien välillä ja tunnistaa kohteet, joissa lisäoptimointi toisi hyötyä.

Tehoasteen käyttämä tasajännite muodostetaan verkkojännitteestä ulkoisella hakkuriteholähteellä, jonka hyötysuhteeksi ilmoitetaan 90 %. Tasajännitteen muodostus verkkojännitteestä on rajattu tämän diplomityön ulkopuolelle.

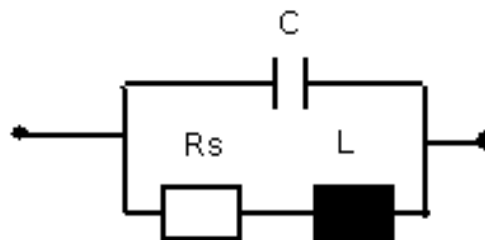
Magneettikentän muodostuksessa häviöitä muodostuu erityisesti tasajännitekondensaattoreissa, kytkinkomponenteissa, resonaattorikondensaattorissa, lähetinkelassa ja kytkimien vaimentimissa.

Kentän vastaanotossa häviöitä muodostuu resonaattorikelassa ja -kondensaattoreissa, tasasuuntaajassa, jännitteen vakavoinnissa sekä kuormamodulaatiossa. Lisäksi vastaanottimen piirilevyyn muodostuu kuparipintoja kuumentavia pyörrevirtahäviöitä.

2.4.1 Antennikela

Lähettimen ja vastaanottimen antennikeloilta vaadittavat ominaisuudet eroavat toisistaan. Lähettinantennin suuri virta pakottaa minimoimaan sen resistanssin. Vastaanottinantennin koko ja paino on taas pidettävä pieninä, jottei kannettavaa laitetta turhaan kasvatettaisi.

Magneettikentän muodostus tapahtuu resonaattorin antennikelassa. Antennikela ei ole ideaalinen reaktanssi, vaan sen impedanssi koostuu myös johtimen resistiivisestä komponentista sekä johtimien välisestä kapasitanssista. Kelan sijaiskytkentää on havainnollistettuna kuvassa 8. Kelan impedanssi voidaan ratkaista taajuuden funktiona kaavalla (18). Kuvassa 9 esitetään kelan impedanssin itseisarvo taajuuden funktiona.

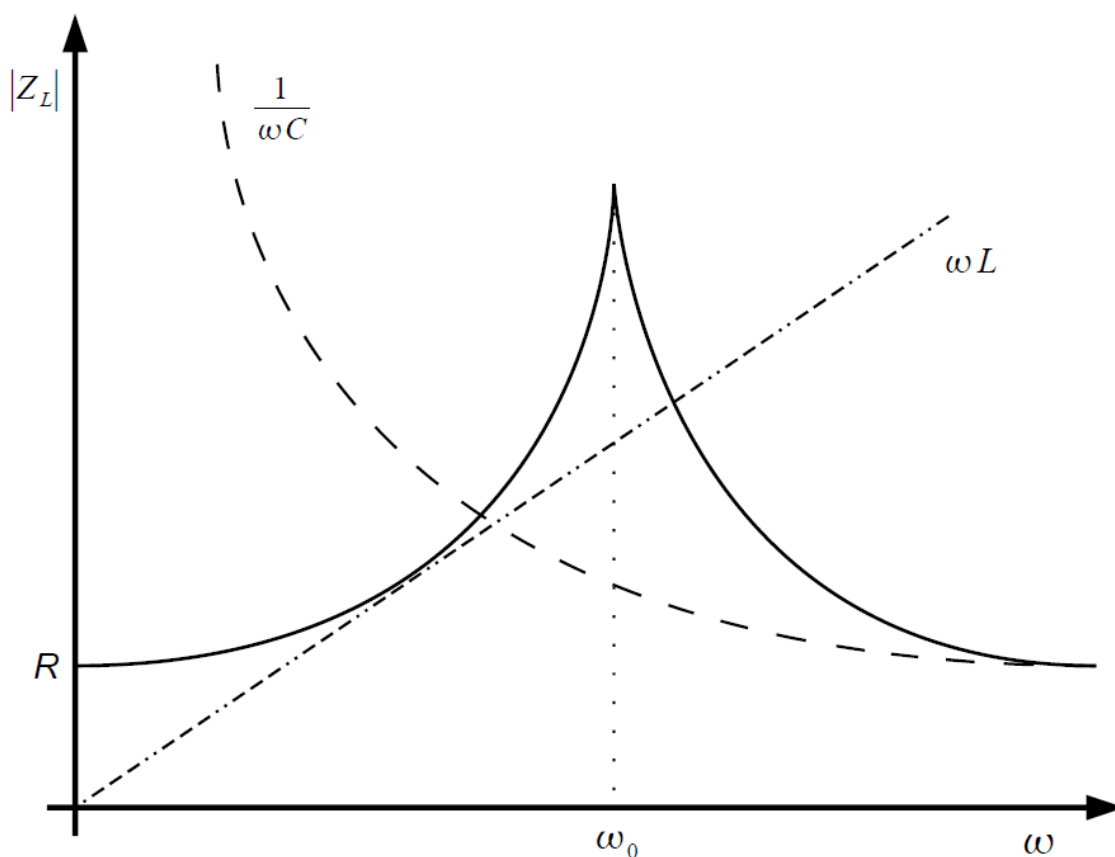


Kuva 8: Kelan sijaiskytkentä

$$Z_L = (j\omega L_S + R_L) \parallel \frac{1}{j\omega C_S} = \frac{2\omega RL + j(\omega^2 L^2 - R^2)}{\omega^3 L^2 C + \omega R^2 LC} \quad (18)$$

Kelan induktanssin ja resistanssin suhdetta kuvaa hyvyysluku Q , joka lasketaan kelan induktanssin ja resistanssin avulla (19).

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega L}{R} \quad (19)$$



Kuva 9: Kelan impedanssin itseisarvo kulmataajuuden funktiona

Virranahtoilmiön seurauksena kelan resistanssi kasvaa taajuuden noustessa. 100 kHz taajuisen aallon tunkeutumissyvyys kuparissa on n. 210 μm , minkä seurauksena yli 450 μm johtimien käyttö ei ole järkevää. Siirrettäessä useita watteja tehoa, lähetinkelassa on syytä käyttää useista rinnakkaisista säikeistä koostuvaa Litz-lankaa.

Kuvassa 10 on kannettavaan tietokoneeseen tehoa siirtävä antennikela, joka on valmistettu 90X0,1 mm litz-langasta. Viereinen 9 V:n paristo kokoreferenssinä.



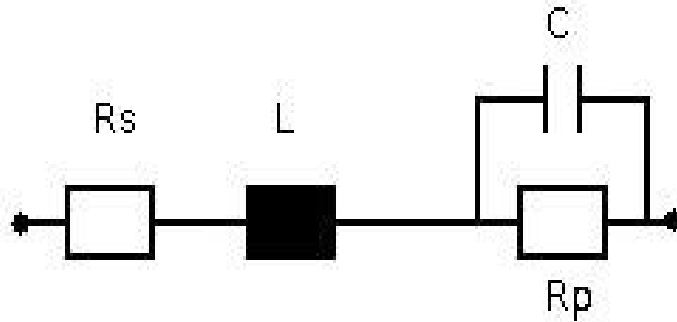
Kuva 10: 90X0,1mm Litz-langasta valmistettu antennikela

2.4.2 Resonaattorikondensaattori

Resonaattorikondensaattorilta vaaditaan suurta jännitteenkestoa, molempien polariteettien kestoja, pieniä häviöitä ja ominaisuuksien vakautta lämpötilan muuttuessa.

Tyypillisesti kondensaattorin kapasitanssi lämpenemisen myötä pienenee, mikä nostaa resonanssipiirin ominaistajuutta. Mikäli lähetin toimisi ominaistajuuden yläpuolella, kondensaattorin lämpenemä saattaisi aiheuttaa epävakautta resonaattorin ominaistajuuden virittyessä lähetystajuudelle. Tästä syystä lähettimessä on syytä käyttää resonaattoripiirin ominaistajuuden alapuolista lähetystajuutta. Ominaisajuuden alapuolinen lähetystajuus toimii negatiivisena takaisinkytkentänä laskemalla lähetystehoja kondensaattorin lämmetessä, mikä taas laskee kondensaattorin lämpötilaa.

Yksi kondensaattorin ominaisuus on niiden eristemateriaalin lämpöriippuvuuskerroin. Kaikkein lämpöimmuuneimmat komponentit ovat NP0-luokkaa, joiden kapasitanssi muuttuu merkityksettömän vähän lämpötilan vaikutuksesta. Käytännössä muun tyyppiset kondensaattorit eivät sovi resonaattorikondensaattoriksi, jollei lähetystajuutta säädetä.



Kuva 11: Kondensaattorin sijaiskytkentä

Kondensaattoreissa on niiden rakenteesta johtuvia epäideaalisuuksia, joiden seurauksena niitä ei voi pitää puhtaina kapasitansseina. Kuvassa 11 on kondensaattorin sijaiskytkentä, joka havainnollistaa kondensaattorin parasiittisia ominaisuuksia. R_s ja L kuvaavat sisäisten metallilevyjen sekä niiden välisten johdotuksien resistanssia ja induktanssia. R_p kuvaa kondensaattorin eristetason vuotoresistanssia ja C on kondensaattorin varsinainen kapasitanssi.

$$Z_C = R_s + j\omega L + \frac{R_p}{1 + j\omega R_p C} \quad (20)$$

Kuten yhtälöstä (20) huomaa, koostuu kondensaattorin impedanssi tasajännitteellä vain vuotoresistanssista R_p ($R_s \ll R_p$). R_p :n arvo on megaohmeja, joten vuotoresistanssin vaikutus kondensaattorin tehonhäviöihin on häviävän pieni.

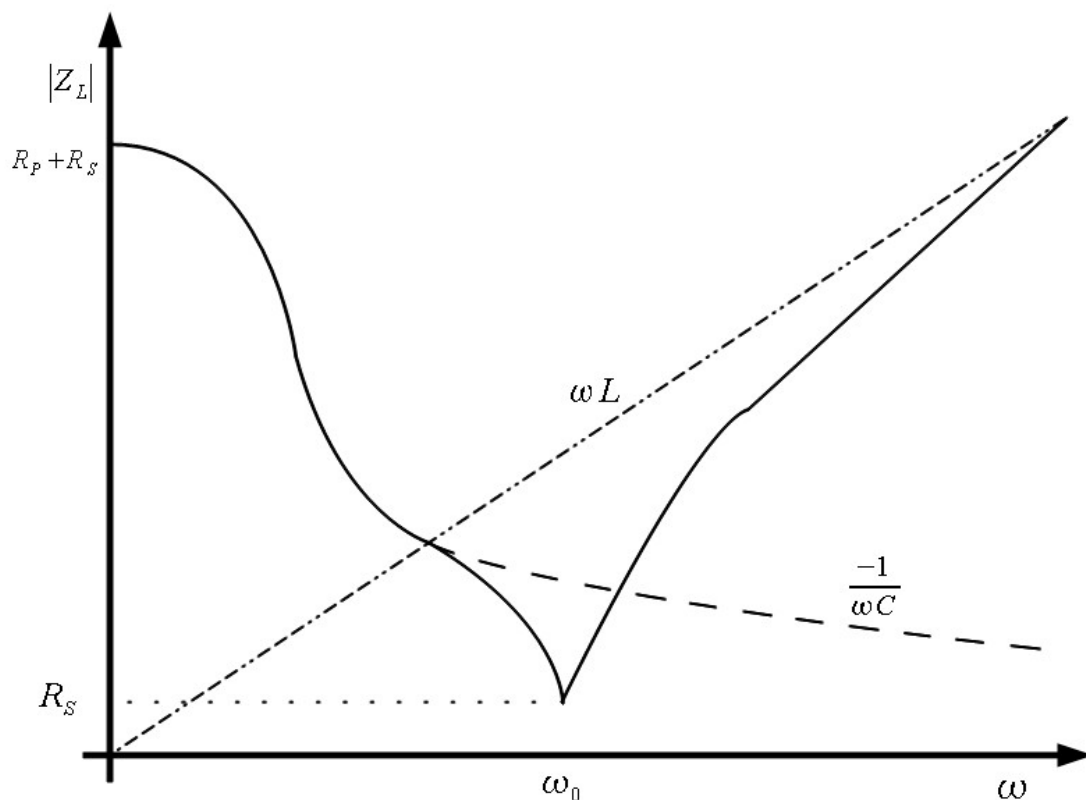
Kapasitanssin ominaisresonanssitaajuus lasketaan kaavalla (21). Kondensaattorin impedanssin minimi on ominaisresonanssitaajuudella, mikä on otettava komponenttivalinnoissa huomioon.

$$f_N = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (21)$$

Kondensaattorin hyvyysluvun määrittämiseksi on käytettävä apuna ESR-lukua, joka kuvaa kondensaattorin vastaavaa sarjaresistanssia (22).

$$Q = \frac{X_C}{R_{ESR}} = \frac{1}{\omega C R_{ESR}} \quad (22)$$

Kondensaattori toimii kapasitanssina vain ominaisresonanssitaajuutta alemmilla taajuuksilla. Kuvassa 12 on kondensaattorin impedanssi kulmataajuuden funktiona. Kuten kuvasta näkee, ominaisresonanssitaajuuden yläpuolisilla taajuuksilla kondensaattori toimii induktanssina. Ilmiö on haitallinen erityisesti nopeissa transienteissa. Sen seurauksena energiavarastona toimivaan tasajännitepankkiin on kytkettävä nimellisesti suurikapasiteettisten elektrolyyttikondensaattorien sijaan pienempiä ja nopeampia kondensaattoreita.



Kuva 12: Kondensaattorin impedanssin itseisarvo kulmataajuuden funktiona

2.4.3 Kytkinkomponentit

Kytkimet katkovat tasajännitettä resonaattoriipiiriin. Laitteiston katkontataajuus, katkottavan tasajännitteen suuruus ja kuorman matala impedanssi suosivat MOSFET-kytkimien käyttöä. Seuraavaksi paras kytkinvaihtoehto olisi BJT, mutta senkin häviöt ovat tässä kohteessa selkeästi MOSFET:ia suuremmat. BJT:n yli jäävä kollektori-emitterijännite on saturaatioissa yhden voltin suuruusluokkaa, joka on aivan liikaa katkottaessa alle kahdenkymmenen voltin tasajännitettä.

Katkojaan sopivan MOSFET:in valinta kannattaa aloittaa valitsemalla komponentin kotelotyyppi. Pintaliitoskomponentit, esimerkiksi S0-8-kotelossa ovat ylivoimaisia sarjatuotannossa, jossa piirilevyjen valmistus on automatisoitu ja niille kohdistuva lämpökuorma varmennettu. Pintaliitoskomponentille käytännöllisesti toteutettavan jäähdytystehon rajat tulevat kuitenkin helposti vastaan, eikä jäähdytysiilien lisääminen jälkikäteen ole aina mahdollista. Prototyyppiin valitsinkin perinteisen TO-220 komponentin, jolle on mahdollista vaihtaa jäähdytysratkaisua jälkeen päin.

Kytkimien päälläoloresistanssi R_{ON} kuvaa resistanssia, joka vastaa komponentin impedanssia saturaatiotilassa. Tämän parametrin avulla on mahdollista poissulkea monta komponenttivalitsemista.

Katkojakäytössä transistorit ovat lineaarisella alueella vain auetessaan tai sulkeutuessaan. Komponenttien nopeus vaikuttaa niissä esiintyvään häviötehoon muuttamalla aikaa, joka lineaarisella alueella toimitaan. Nykeiset katkokajakäyttöön tarkoitetut MOSFET:it ovat usein niin nopeita, että rajoittamattomana nousunopeus aiheuttaisi ympäristöönsä suuritaajuisia

kytkentähäiriötä. Nousunopeutta voidaan laskea rajoittamalla hilavirran suuruutta, eli kytkemällä ohjainpiirin ja kytkimen kannan välille vastus. Tällöin vastus ja hilakapasitanssin muodostama RC-aikavakio määrää hilajännitteen muutosnopeuden.

MOSFET:issä on rakenteesta aiheutuva estosuuntainen diodi, jonka läpi kulkeva virta aiheuttaa noin 0,7 voltin jännitehäviön. Tämä jännitehäviö muuttuu kokonaisuudessaan lämmöksi ja on otettavan huomioon jäähdytystä mitoitettaessa. Komponentin lämpökuormaa on mahdollista vähentää kytkemällä sisäisen diodin rinnalle matalamman kynnyksjännitteen schottky-diodi.

MOSFET:issa muodostuva tehohäviö voidaan jakaa osiin muodostumismekanismin mukaan. Kaavalla (23) ratkaistaan yläkytkimen johtoaikainen tehohäviö. Kytkin mallinnetaan vastuksena r_F , jonka läpi kulkee pulssimainen virta i_F . Johtoaika on kaavassa merkitty laskemisen helpottamiseksi alkamaan hetkestä $-d/2$ ja jatkuvan hetkeen $d/2$.

$$E_{HON} = \int_{-d/2}^{d/2} r_F \hat{i}_F^2 \cos(\omega t)^2 dt = \frac{r_F \hat{i}_F^2}{\omega 4} [d + \sin(d)] \quad (23)$$

Yläkytkimen katkaisuhäviöt on laskettava virran hetkellisen arvon mukaan. Kaavan (24) laskentatavassa oletetaan kytkimen avauksen ja sulkeutumisen tapahtuvan symmetrisesti virtapulssin huippuarvon ajankohtaan nähden. Kytkimen yli jäävä jännite on vakio ja virta mallinnetaan "kolmiona", jonka huippuarvo on katkonnan pulssisuhteen määräämä hetkellisarvo.

$$E_S = \frac{1}{2} \hat{i} V_G \cos\left(\frac{D}{2}\right) (t_{tr1} + t_{tr2}) \quad (24)$$

Alakytkimen häviöt koostuvat kolmesta komponentista. Sitä lämmittää kytkentä ja johtohäviön lisäksi myös estosuuntaisen diodin läpi kulkeva virta. Kaavassa (25) on käytetty hyväksi yksinkertaistettua diodin mallia, jossa diodin yli oleva jännite ei ole virtariippuvainen. Alakytkimen kytkentähäviöt voidaan laskea kaavalla (24).

$$E_{HOFF} = 2 \int_0^{\pi/2-d/2} V_F \hat{i}_F \sin(\omega t) + r_F \hat{i}_F^2 \sin^2(\omega t) dt \quad (25)$$

$$E_{HOFF} = \frac{2V_F \hat{i}_F}{\omega} (1 - \cos(\pi/2 - d/2)) + \frac{r_F \hat{i}_F^2}{2\omega} [(\pi - d) + \sin(\pi - d)]$$

2.4.4 Diodit

Vastaanottimen tasasuuntausdiodin häviöenergia yhden pulssin aikana voidaan laskea kaavalla 26.

$$E_F = \int_0^{\pi} V_F \hat{i}_F \sin(\omega t) + r_F \hat{i}_F^2 \sin^2(\omega t) dt \quad (26)$$

$$E_F = \frac{2V_F \hat{i}_F}{\omega} + \frac{\pi r_F \hat{i}_F^2}{2\omega}$$

Diodin tasasuunnatessa sinimuotoista jännitettä kommutointi tapahtuu virran ja jännitteen ollessa pienimmillään, eikä siitä tule huomattavia häviöitä. Siksi diodin lämpenemä voidaan laskea kaavalla (27).

$$P_{LD} = f_S E_F \quad (27)$$

2.4.5 Vaimenninpiiri

Vaimenninpiirin vastuksen lämpöhäviö voidaan laskea integroimalla yhden katkojan pulssin aikana muodostunut jännitehäviö komponentissa ja kertomalla se kahdella (28).

$$E = 2 \int_0^T f(t) dt = 2 \int_0^T \frac{u(t)^2}{R} dt = \frac{U_0^2 \tau}{R} [1 - e^{-\frac{2T}{\tau}}] \approx U_0^2 C, \quad (T \gg \tau) \quad (28)$$

Yhtälöstä huomataan, että RC-aikavakiosta vain kapasitanssin suuruus vaikuttaa vaimentimessa kuluvaan tehoon. Saman RC-aikavakion muodostamiseen kannattaa siis valita suurin mahdollinen resistanssi (ja pienin kapasitanssi), jolla korkeataajuiset häiriöt vaimenevat riittämiin.

Yhden pulssin aiheuttama häviöenergia pitää vielä kertoa katkontataajuudella (29), jotta todellinen häviöteho saataisiin laskettua. Lisäksi on otettava huomioon, että tämä laskentatapa ei ota huomioon korkeataajuisien taajuuskomponenttien aiheuttamaa tehon hukkaa.

$$P = f_N E \quad (29)$$

2.5 Sähkömagneettinen yhteensopivuus

Langattoman tehonsiirron sovelluksessa EMC-suunnittelu on välttämätöntä. Kohteena se on verrattavissa normaalisti haastavina pidettyihin hakkuritehonlähteisiin ja taajuusmuuttajiin. 100 kHz:n katkontataajuus ei ole yhtä korkea kuin useissa moderneissa hakkurisovelluksissa, mutta kuormaimpedanssin vaihtelu ja hetkellinen pienuus vaativat erityisiä toimenpiteitä häiriöiden vaimentamiseksi.

Koska laiteparin välistä magneettiä ei ole suljettu ferriitein, laitteiston toimintaperiaatteen seurauksena lähetintä ympäröi voimakas 100 kHz:n magneettikenttä. Magneettivuon tiheys kentässä on satoja mikrotlesloja. Kentän suuruudesta kertoo jo se, että vaikka yleensä magneettikenttään voidaan suhtautua biologisesti inerttinä komponenttina, ovat monet toisistaan riippumattomat henkilöt maininneet tuntevansa lähettimen päällä olon. Tämän, laitteen toiminnan mahdollistavan kentän poistamiseen ei tässä työssä ryhdytty, koska mahdollisesti tuotantoon menevän laitteeseen tulnaisiin rakentamaan ferriittisuojaus.

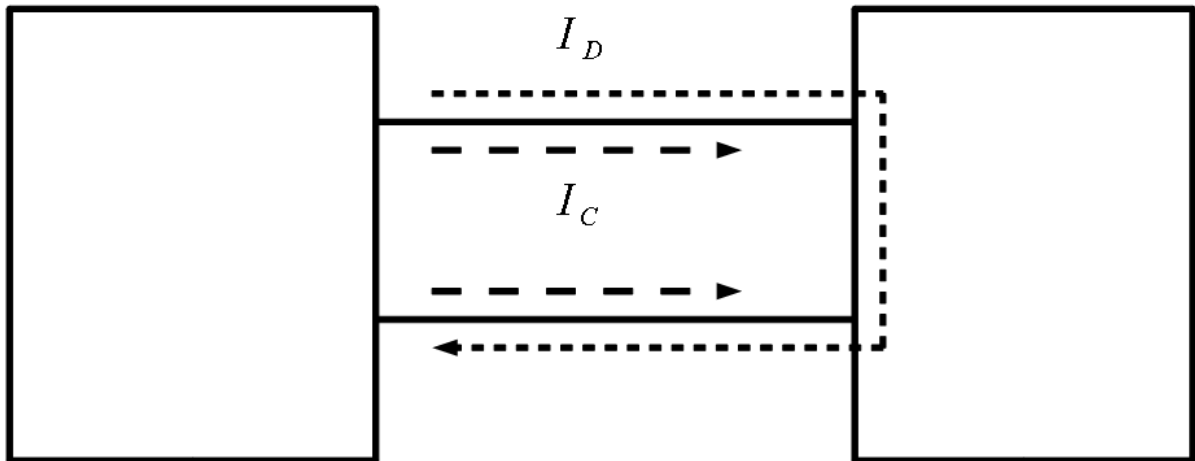
Matalaan kuormaimpedanssiin jännitettä katkottaessa myös ympäristöön säteilevät kentät ovat suuria. Varhaisen prototyypin, jossa ei ollut lainkaan häiriönpoistoa, koekäytön yhteydessä ilmeni, että FM-radioiden vastaanotto häiriintyi kymmenien metrien säteellä lähettimestä. Näin ollen toimintaperiaatteesta aiheutuvien EMC-ongelmien ratkaisussa riittää työnsarkaa.

Voimakas magneettikenttä rasittaa myös tietokoneen elektroniikkaa. Ennen ensimmäisen prototyypin valmistumista ei ollut lainkaan varmaa, käynnistyisikö kannettava tietokone lähettimen kentässä. Nostamalla lähetystehoa askelittain kohti lähettimen maksimitehoa (n. 60 W) kävi ilmi, ettei kyseisen kannettavan tietokoneen toiminta häiriintynyt vielä näillä kentänvoimakkuuksilla.

2.5.1 Häiriökenttien muodostumismekanismit

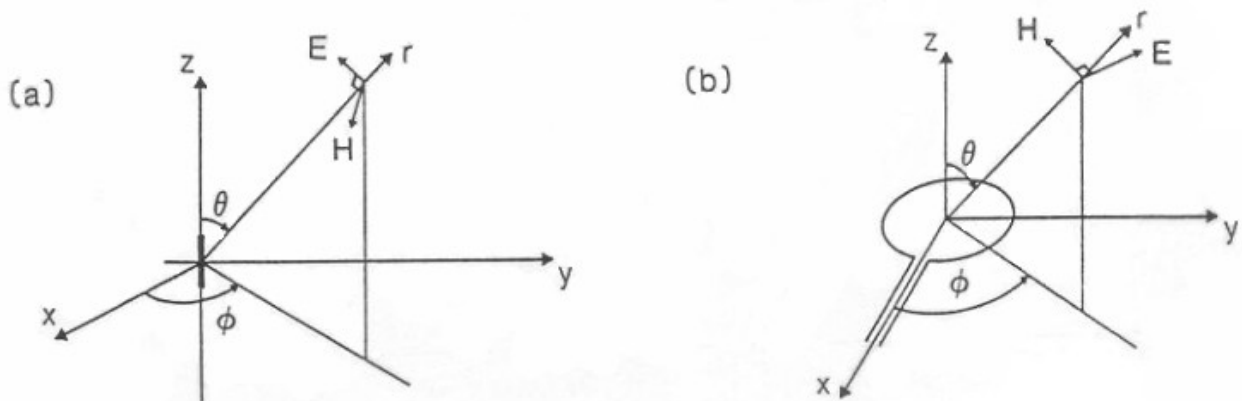
EMC-suunnittelu on laaja aihe käsiteltäväksi tässä työssä tyhjentävästi, mutta esittelen seuraavaksi aiheen perusteet ja tärkeimpiä suunnitteluperiaatteita.

Lähettimen häiriötyypit on jaettavissa kahteen eri tyyppiin. Yhteismuotoiseen (common mode) ja erillismuotoinen (differential mode) virran aiheuttamiin häiriöihin. Kuvassa 13 havainnollistus yhteis- ja erillismuotoisista virroista.



Kuva 13: Yhteismuotoinen virta I_C ja erillismuotoinen virta I_D

Virtatyyppien muodostamat kentät eroavat toisistaan. Yhteismuotoinen virta luo Hertzin dipoleja (lanka-antenneja), jotka toimivat sähkökentän lähteenä (kuva 14 a). Erillismuotoinen virta kulkee lenkeissä toimien magneettikenttälähteenä (kuva 14 b). Kuvissa 14 a ja 14 b symbolit x , y ja z merkitsevät karteesisen koordinaatiston akseleita, θ merkitsee pallokoordinaatiston elevaatiokulmaa, ϕ merkitsee atsimuuttikulmaa, r merkitsee sädettä, E merkitsee sähkökenttävektoria ja H magneettikenttävektoria.



Kuva 14: Lanka- ja lenkkiantennin luomat kentät [12]

Yhteismuotoisten häiriöiden muodostuminen on yleensä täysin parasitiittista ja sitä voidaan välttää kunnollisella maadoituksella, suodattimilla ja koteloinnilla.

Erillismuotoisten häiriöiden synty tapahtuu usein laitteiden normaalin toiminnan oheistuotteena.

Häiriöitä voidaan ehkäistä pienentämällä virtalenkin kokoa ja virran amplitudia. Myös suodattimet ja esimerkiksi kierretyn parin käyttö vähentävät erillismuotoisia häiriöitä.

Dipolisäteilijän sähkö- ja magneettikentät noudattavat yhtälöitä (30) - (32) [12].

$$E_r = \frac{I_0 L e^{-j\beta r} \cos \theta}{j \omega \epsilon_0 2 \pi r} \left(\frac{j\beta}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \quad (30)$$

$$E_\theta = \frac{-I_0 L e^{-j\beta r} \sin \theta}{j \omega \epsilon_0 4 \pi r} \left(\beta^2 - \frac{j\beta}{r} - \frac{1}{r^2} \right) \quad (31)$$

$$H_\phi = \frac{I_0 L e^{-j\beta r} \sin \theta}{4 \pi r} \left(j\beta + \frac{1}{r} \right) \quad (32)$$

Virtalenkin magneetti- ja sähkökentät noudattavat yhtälöitä (33) - (35) [12].

$$H_r = \frac{\pi a^2 I_0 e^{-j\beta r} \cos \theta}{2 \pi r} \left(\frac{j\beta}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \quad (33)$$

$$H_\theta = \frac{-\pi a^2 I_0 e^{-j\beta r} \sin \theta}{4 \pi r} \left(\beta^2 - \frac{j\beta}{r} - \frac{1}{r^2} \right) \quad (34)$$

$$E_\phi = \frac{-j \omega \pi a^2 I_0 e^{-j\beta r} \sin \theta}{4 \pi r} \left(j\beta + \frac{1}{r} \right) \quad (35)$$

Yhtälöryhmien etäisyysriippuvuudet muistuttavat toisiaan. Tämä on olennaista määritettäessä lähi- ja kaukokentän rajaetäisyyttä. Lähellä säteilijöitä vahvimman vaikutuksen aiheuttavat etäisyyden kuutioon verrannollisesti heikkenevät termit ja kaukokentässä vaikuttavat eniten etäisyyteen suoraan verrannollisesti vaimenevat termit.

Yhteismuotoinen häiriönlähde luo läheisyyteensä vahvan sähkökentän, joka on herkkä siirtymään kapasitiivisesti piirin osasta toiseen. Vastaavasti erillismuotoisen häiriölähteen aiheuttama magneettikenttä siirtyy helposti induktiivisesti piirin osien välillä.

2.5.2 Resonanssit piirilevyllä

Jokaisella piirilevyn vedolla on oma resonanssitaajuutensa. Usein yksittäisen vedon induktanssi ja kapasitanssi jäävät niin pieniksi (ja resonanssitaajuus korkeaksi), että niillä ei ole käytännön merkitystä. Suurikapasitanssiset piirit kuten CMOS ovat kuitenkin alttiita resonoinnille. Mikäli kohteessa on korkea häiriötaso, tulisi piirit kytkeä mahdollisimman lyhyillä ja suojatuilla vedoilla. Lähettimessä katkotaan tasajännitettä hyvin matalaan kuormaimpedanssiin, mikä luo piirilevylle runsaasti suuriamplitudisia häiriöherätteitä. Tämän katkontahäiriön taajuuskaista yltää satojen megaherzien suuruusluokkaan asti, joten CMOS:iin kytketyn piirilevyn vedon ei tarvitse edes olla erityisen pitkä resonoidakseen. Mikäli piirilevyvedon resonanssitaajuus on lähellä näiden häiriöherätteiden taajuusisältöä, saattaa vetoon liittyvä toiminnallisuus häiriintyä. Esimerkiksi lähettimen prototyypin ADC:n mittaussjohtimeen muodostuva resonanssi esti luotettavat mittaukset kyseisellä laitteella.

Resonaattorin hyvyysluku Q , kertoo kuinka vahvasti vaimennettu resonaattori on. Se voidaan laskea kaavalla (36). Suuri hyvyysluku ($>0,5$) siirtää resonanssitaajuutta, ja sen vaikutuksen voi laskea kaavalla (37) [13].

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (36)$$

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}} \quad (37)$$

$$Q = \frac{R_1 \parallel R_2}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad (38)$$

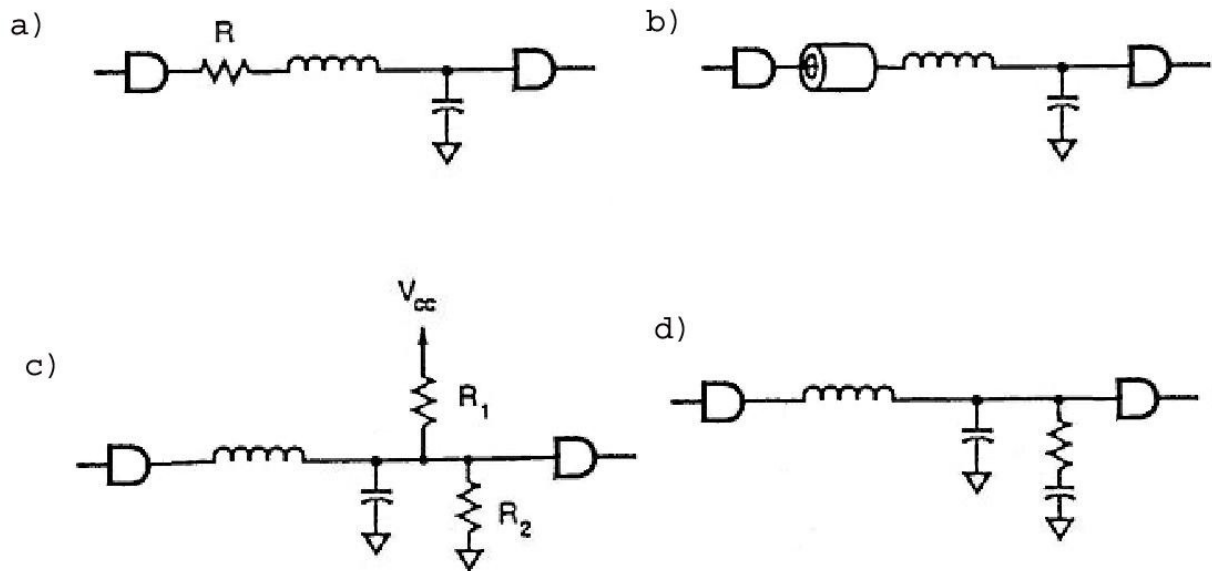
Resonanssin vaimentamiseksi on useita keinoja. Yksinkertaisin tapa on kuvan 15 a tapauksessa on signaalijohtimeen lisätty vastus vaimentamaan värähtelyä. Tämä ratkaisu toimii koko taajuuskaistalla, mutta vaimentaa myös hyötysignaalia matalaimpedanssisessa piirissä.

Kuvassa 15 b johtimeen on asennettu ferriitti, jolla voidaan vaimentaa selektiivisesti haluttua taajuuskaistaa. Ferriitin vaimennus voi olla jopa 20 dB oktaavin kaistanleveydellä ja 0 dB jo oktaavin päässä vaimennusalueen keskitaajuudesta.

Kuvassa 15 c signaali on kytketty shunttivastuksilla jännitelähteisiin. Tällöin hyvyysluku pienenee, ja se voidaan laskea kaavalla (38).

Kuvassa 15 d shunttivastusten tilalle on kytketty kondensaattorista ja vastuksesta koostuva vaimennin (snubber), joka mahdollistaa hyötysignaalia vaimentamattoman suuritaajuisien häiriöiden vaimennuksen.

Yllä mainittujen tietojen perusteella on mahdollista vähentää ja paikallistaa elektroniikan aiheuttamia häiriöitä ja kasvattaa laitteen häiriön sietoa ulkoisille häiriöille. Laitteen toiminta ei saa häiriintyä ulkopuolisten kenttien, eikä varsinkaan laitteen itsensä toiminnan seurauksena.



Kuva 15: Piirilevyvedon resonanssin vaimennusmahdollisuudet [13]

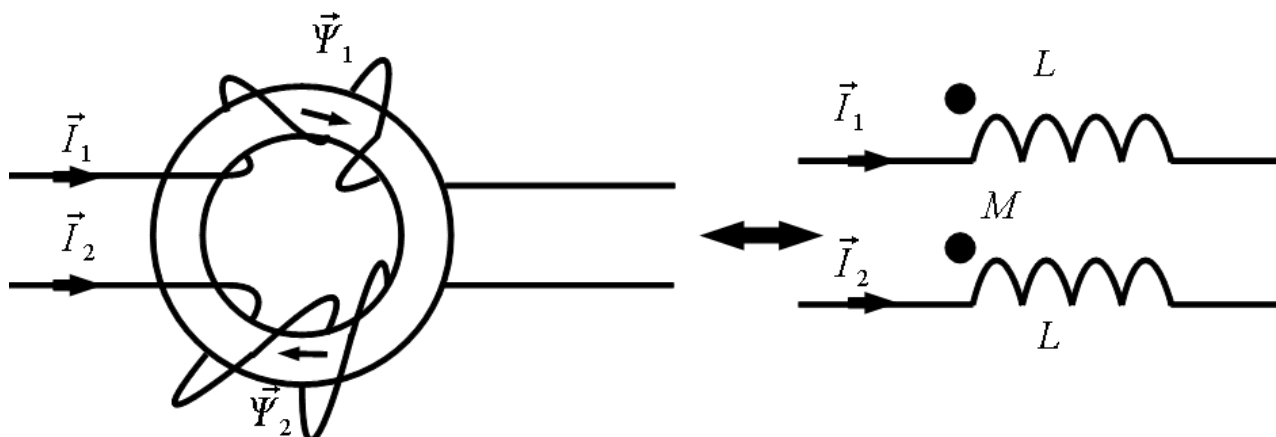
Häiriöiden minimointi laitteessa on usein iteratiivinen prosessi, joka pitää sisällään eri kehitysversioiden mittausta, tuloksien tarkastelua ja laitteen muokkaamista seuraavaa mittauksia varten. Prosessin päämääränä on saada laitteen häiriöiden taso alle standardien määrittämien maksimitasojen, jolloin laite voidaan saattaa markkinoille.

2.5.3 Yhteismuotoisen virran kuristin

Yhteismuotoisten häiriöiden poistamiseksi on olemassa suodatintyyppi, joka ei häiritse lainkaan erillismuotoista virtaa. Suodatin koostuu ferriittirenkaasta, jonka ympäri kierretään meno- ja paluujohdin. Virran näkemä impedanssi lasketaan kaavalla (39), jota tulkitsemalla voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset; Molempien johtimien tulisi kiertyä sydän yhtä monta kertaa ja vastakkaiseen suuntiin. Tällöin johtimien keskinäisinduktanssi kumoaa itseinduktanssin virran erillismuotoisen komponentin osalta ja impedanssi häviää. Yhteismuotoisen virran luomat magneettivuot taas kulkevat samaan suuntaan, mikä aiheuttaa virtaan vaikuttavan induktanssin kaksinkertaistumisen itseinduktanssiin verrattuna.

$$Z_1 = \frac{j\omega(L_1 I_1 + M I_2)}{I_1} \quad (39)$$

Lähetintä rakennettaessa LSK-datan ilmaisua estä ulkoisen jännitelähteen muodostamat yhteismuotoiset häiriöt. Ongelmaan auttoi yhteismuotoisen virran kuristimen lisääminen jännitelähteen ja lähettimen väliseen tasajännitejohtoon.



Kuva 16: Kuristin yhteismuotoisille häiriöille

2.5.4 Piirilevy suunnittelu

Piirilevykortin suunnittelulla on suora vaikutus johtuviin ja säteileviin häiriöihin.

Tähdittäessä piirilevyn häiriöiden minimointiin olisi otettava huomioon seuraavat asiat. Johdinten pituuksien minimointi ja niissä kulkevan virran minimointi vähentävät häiriöitä. Myös signaalien nousuaikojen sopivuutta kannattaa selvittää, sillä tarpeettoman nopeat pulssit aiheuttavat turhaan korkeataajuisia häiriöitä.

Maatason jakaminen signaali-, i/o- ja tehomaaahan on tehokas tapa estää häiriöiden siirtyminen suurimmista häiriölähteistä kaikkein herkimpiin laitteisiin. Maatasot ovat galvaanisesti yhdessä toisiinsa, mutta vain yhdestä pisteestä.

Suuritehoisten lähetympulssien aiheuttamat häiriöt siirtyvät käyttöjännitteen mukana kaikkiin piirin osiin. Tällöin esimerkiksi komparaattorit ja vastaavat pieniä analogiasignaaleita käyttävät piirit ovat alttiina toimintahäiriöille.

Virtalenkkien koot piirilevyllä tulisi minimoida. Varsinkin korkeataajuisien virtojen kulkumatkat tulisi pitää lyhyinä. Kondensaattorien sijoittamisella lähelle korkeataajuisia virtapulsseja aiheuttavia piirejä mahdollistaa virtojen lyhyet kulkumatkat piirilevyllä.

Virtalenkkien pituutta on mahdollista pienentää myös käyttämällä niin kutsuttuja tehotasoja monikerroksisissa piirilevyissä. Tekniikka mahdollistaa minimaaliset tehonsiirtomatkat ja jättää pintakerrokset vapaasti signaaloinnin käyttöön. Kuvassa 17 on esimerkki 4-kerroksisen piirilevyn luomasta mahdollisuudesta käyttää kaksi välikerrosta käyttöjännitteen ja maan jakeluun. Lisähyötynä tekniikalle on tasojen välinen kapasitanssi, joka voidaan laskea kaavalla (40). Esimerkiksi 80 μm paksulla FR4-kerroksella eristettyjen tasojen kapasitanssi on n. 50 pF/cm².



Kuva 17: Maa- ja käyttöjännitetason sijoittaminen 4-kerroksisessa levyssä

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (40)$$

2.5.5 Kotelointi

Koteloinnilla voidaan vaimentaa sekä magneetti-, että sähkökenttiä. Koteloinnin vaimentaa molempiin suuntiin liikkuvaa säteilyä. Laitteesta poistuvan säteilyn lisäksi kotelointi lisää myös laitteen immunitteettia ulkopuolisille häiriöille.

Kotelointi vaimentaa eri tavalla sähkö- ja magneettikenttää. Vaimennuksen tehokkuuteen vaikuttavat seinämäpaksuus, häiriön taajuus, kotelomateriaali ja kotelon geometria.

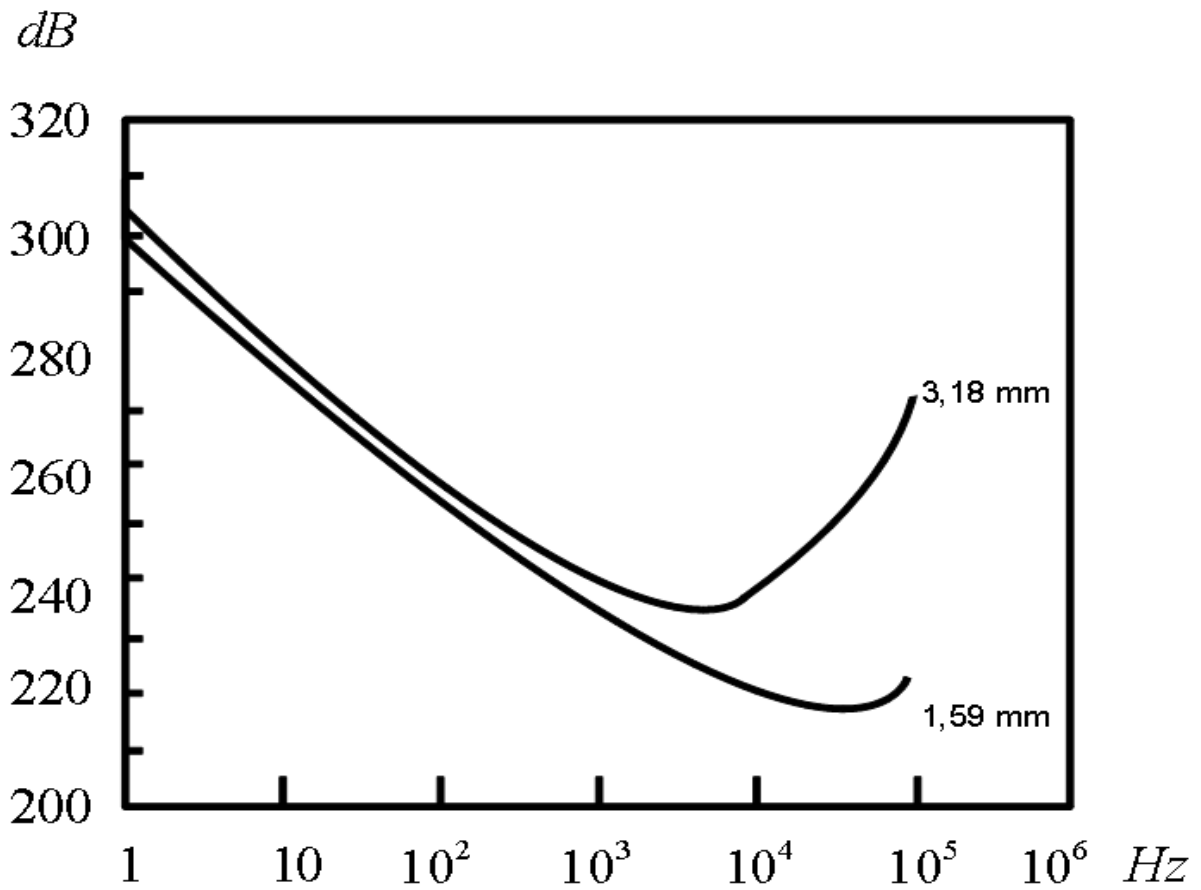
Langattoman tehon lähettimen ongelmana on kymmenien megahertzien taajuudella olevien häiriöiden säteily. Sijoittamalla lähettimen kevytmetallikoteloon voitaisiin vaimentaa säteileviä häiriöitä huomattavasti.

Yhtälöt (41) ja (42) aproksimoivat sähkö- ja magneettikenttien vaimentumista johdinlevyssä. Kaavoissa δ on aallon tunkeutumissyvyys johtimessa, σ on johtimen konduktiivisuus, d materiaalivahvuus, a levyn sivun mitta [12].

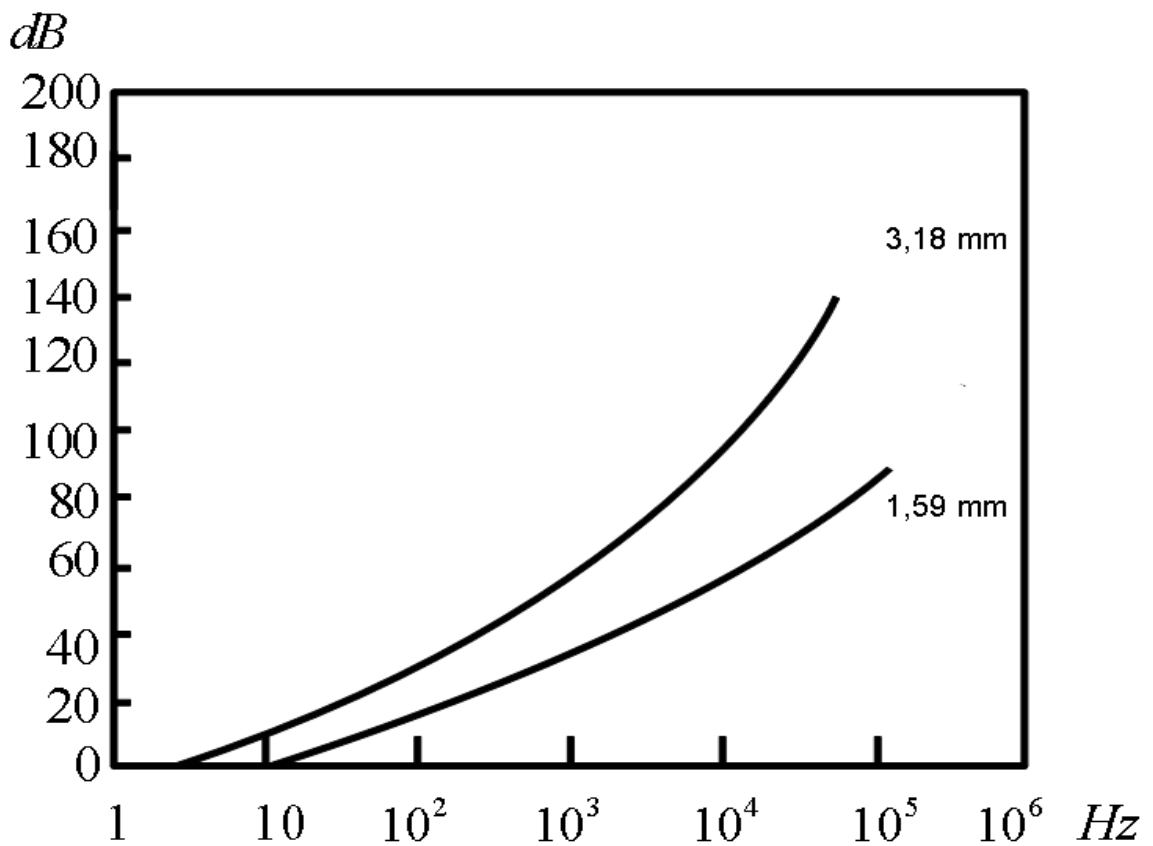
$$E = E_0 \frac{\sigma \delta}{3\sqrt{2}\omega\epsilon_0 a} e^{d/\delta} \quad (41)$$

$$H = H_0 \frac{a}{3\sqrt{2}\omega\mu_0\delta} e^{d/\delta} \quad (42)$$

Alla magneetti- ja sähkökentän vaimentumista arvioivien kaavojen (41) ja (42) perustella lasketut vaimennuskäyrät kahdessa eri tapauksessa. Molemmat kotelot ovat 91,4 cm säteisiä alumiinipalloja, joiden seinämäpaksuudet ovat 1,59 mm ja 3,18 mm. Vaikka kuvaajat ovatkin erikoistapauksista, kertovat ne vaimennuksen taajuusriippuvuuksista. Sähkökentän vaimennusta kuvaavasta käyrästä (kuva 18) näkee, että vaimennus on suurta koko taajuusalueella ja, että se pienenee taajuuden noustessa, kunnes saavutetaan aallon tunkeutumissyvyys. Magneettikentän vaimentumisesta (kuva 19) huomaa, että vaimennus kasvaa taajuuden nousun myötä. Erityisesti 15 kHz:n jälkeen vaimennus kasvaa virranahtoilmiön seurauksena.



Kuva 18: Sähkökentän vaimentuminen taajuuden funktiona esimerkkiteloissa



Kuva 19: Magneettikentän vaimentuminen taajuuden funktiona esimerkkiteloissa

2.6 Magneettikentän turvallisuus

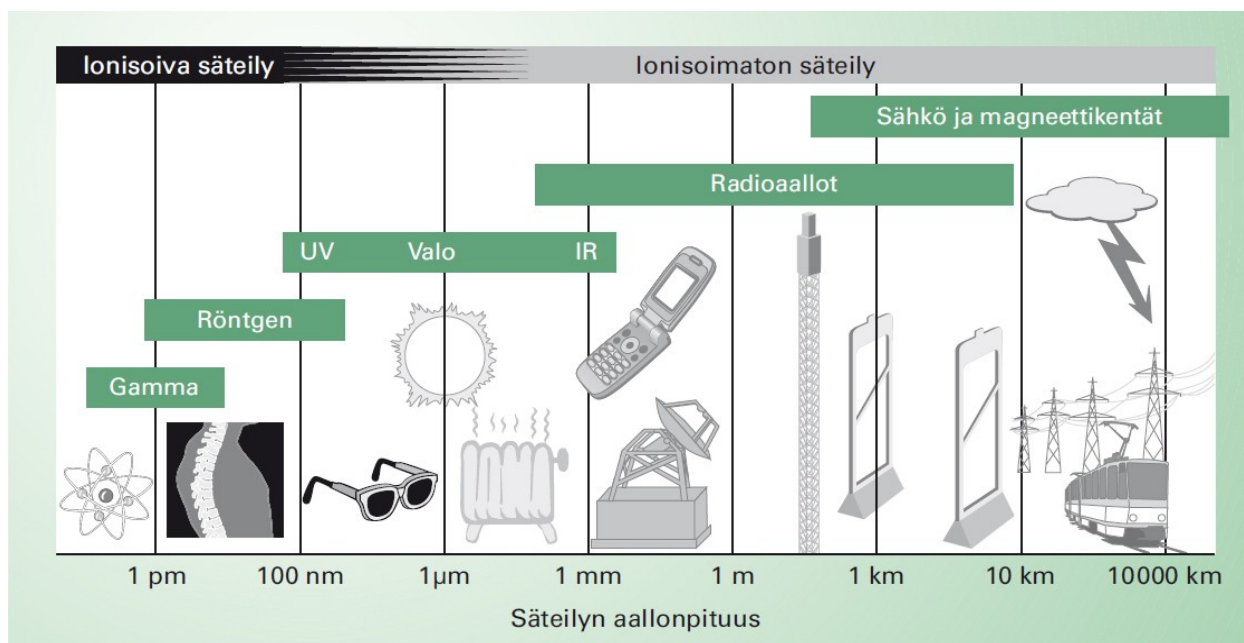
2.6.1 Lähettimen muodostamat kentät

Induktiivisen tehonsiirron tapauksessa energia siirtyy magneettikentän välityksellä. Rakennetuissa prototyypeissä magneettikenttä kulkee ilmassa, eikä mikään estä käyttäjää oleskelemasta magneettikentän vaikutusalueella. Lähettimen antennin keskiosassa magneettikentän on hyvin voimakas. Kentänvoimakkuus on antennin keskipisteessä noin $300 \mu\text{T}$. Kentänvoimakkuus kuitenkin laskee verrannollisesti etäisyyden kuutioon, ja ICNIRP:n torsolle turvalliseksi määrittelemä $6,25 \mu\text{T}$:n magneettikentänvoimakkuus saavutetaan jo noin kolmenkymmenen sentin etäisyydellä lähettimestä. Kentän voimakkuus on siis suuri alueilla, jossa käyttäjän raajat sijaitsevat.

Langattoman tehonsiirron käyttämästä noin 100 kHz:n taajuusalueesta on vähemmän tutkimustietoa kuin verkkojännitteiden taajuisista tai radiotaajuisista sähkömagneettisista kentistä [14]. Tähän on johtanut yksinkertaisesti aikaisempien käytännön sovelluksien puute ja siitä aiheutunut kenttien harvinaisuus.

Usein käytetty tekniikka terveysvaikutusten arviointiin on korkeampien ja matalampien taajuuksien tutkimustulosten ekstrapolointi kattamaan myös kyseistä taajuusaluetta. Tällä tavoin saatujen tuloksien luotettavuus ei ole hyvä, mutta laajamittaisten testausjärjestelyjen suorittaminen kapeille taajuuskaistaleille olisi erittäin kallista ja hidasta. Lisäksi kokeet, joissa testataan vain yhden altisteen vaikutusta kohteeseen, eivät vastaa todellisia tilanteita, joissa ihmiset altistuvat useille keskenään vuorovaikuttaville terveysuhille. Esimerkiksi syövän kehittämisessä on yleistä, että riskitekijät kasaantuvat ja myötävaikuttavat yhdessä.

2.6.2 Ionisoimatonta säteilyä



Kuva 20: sähkömagneettisen säteilyn spektri ja sovellukset, 100kHz vastaa aallonpituutta 3km [14]

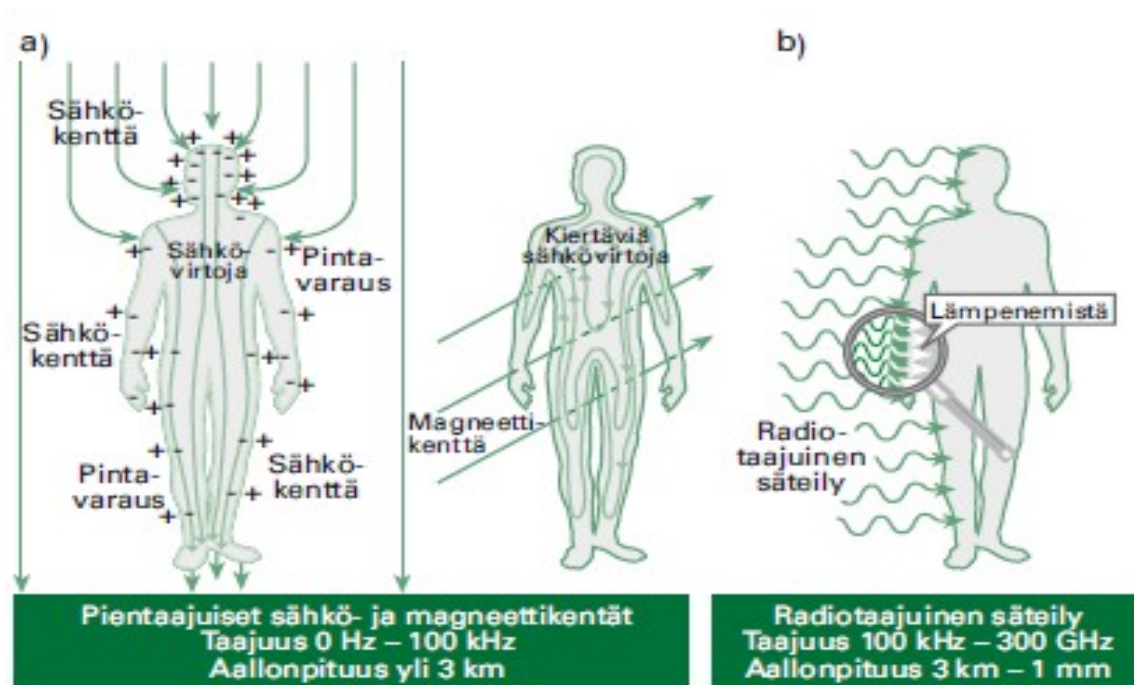
Kuvassa 20 on sähkömagneettinen spektri osa-alueineen sekä joitain kunkin taajuusalueen

sovelluksia. Langattomassa tehonsiirrossa käytettävän 3 km:n aallonpituuden muita häiriölähteitä ovat kauppojen varashälyttimet sekä erilaiset hakkuripiirit.

Hiukkassäteily ja korkeaenerginen sähkömagneettinen säteily kykenevät muodostamaan ioneja väliaineessa. Ionisoivan energia alkaa 12 eV:n suuruudesta, joka vastaa 100 nm:n aallonpituutta (3 Thz) sähkömagneettisessa säteilyssä. Sähkömagneettisen säteilyn energiakvantti lasketaan kaavalla (43).

$$e = hf \tag{43}$$

100 kHz:n magneetikentän energia jää huomattavasti ionisointiin vaadittavaa pienemmäksi (n. 400 neV), joten suurelta kentänvoimakkuudelta eivät voi rikkoa ionisidoksia. Magneetikenttä saa silti kehossa aikaan induktiivisia pyörrevirtoja, jotka saattavat aiheuttaa hermo- ja lihasärsytystä. Kuvassa 21 on havainnollistettu sähkö- ja magneetikenttien vaikutuksia kehossa.



Kuva 21: Sähkämagneettisten kenttien vaikutukset kehossa [14]

100 kHz on myös rajataajuus, jossa sähkömagneettiset kentät alkavat lämmittää kudosta. Lähettimen muodostamat kymmenien megaherzien taajuiset katkaisuhäiriöt aiheuttavat kudoksissa lähinnä lämpenemää, joskin niiden kentänvoimakkuudet ovat selkeästi pienemmät kuin varsinaisella tehonsiirtotaajuudella. Magneetikentillä on fysiologisia vaikutuksia, joiden varaan on kehitetty lääketieteellisiä sovelluksia. Magneetikenttiä käytetään stimuloimaan luustovaurioiden korjaantumista pulssimaisina läheteinä sekä hermokudoksen stimulointiin masennuksen hoidossa.

2.6.3 Ominaisabsorptionopeus

Keskeinen dosimetrinen altistumissuure sähkömagneettisille kentille on ominaisabsorptionopeus SAR (Specific Absorption Rate), joka kuvaa tehon ohmista absorboitumista häviölliseen

massaan. SAR määritellään differentiaalisen tehoalkion absorboitumisena kudoksen differentiaaliseen massa-alkioon. Käytännön mittauksissa SAR on usein helpointa määrittää kohteen lämpenemisnopeutena, kun kohteen lämpökapasiteetti tunnetaan. SAR:ia käytetään erityisesti yli 100 kHz:n taajuuksien altistumisten vertailuun.

$$SAR \left[\frac{W}{kg} \right] = \frac{dP}{dm} = \frac{\sigma E_i^2}{\rho} = c_p \frac{dT}{dt} \quad (44)$$

Magneettikentän terveysvaikutuksien arviointiin SAR soveltuu vain osittain. Se nimittäin ottaa huomioon vain magneettikentän luomien pyörrevirtojen aiheuttaman lämpenemän. Muun muassa magneettikenttien aiheuttama hermoärsytys ei siitä ilmene.

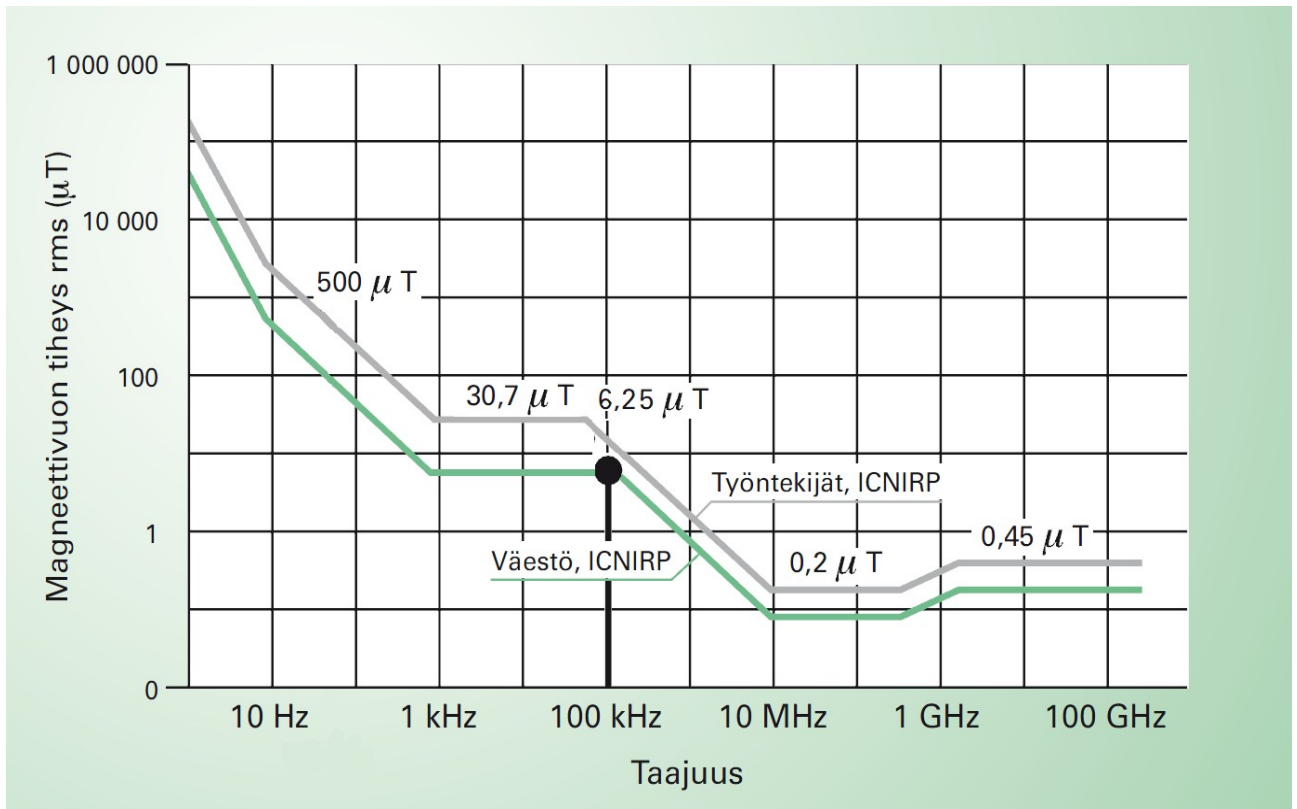
2.6.4 Altistumisrajat

Taajuusalue	Virrantiheys (pää ja vartalo) (mA/m ²)	Keskimääräinen SAR (W/kg)	Paikallinen SAR (pää ja vartalo) (W/kg)	Paikallinen SAR (raaja) (W/kg)
Väestön altistuminen				
- 1 Hz	8	-	-	-
1 Hz - 4 Hz	8/f	-	-	-
4 Hz - 1 kHz	2	-	-	-
1 kHz - 100 kHz	f/500	-	-	-
100 kHz - 10 MHz	f/500	0,08	2	4
10 MHz - 10 GHz	-	0,08	2	4

Kuva 22: Altistumisrajat jaettuina taajuuskaistoittain [14]

ICNIRP on laatinut erilliset altistumisrajat väestölle ja työntekijöille (kuva 22). Erillisiä rajoituksia ylläpidetään, sillä työntekijät altistuvat kentille korkeintaan 8 tuntia vuorokaudessa. Yleisen väestön joukossa on myös teoriassa kentille herkempiä yksilöitä kuten lapset, vanhukset ja sairaat. Työntekijöiltä voidaan myös olettaa suurempaa tietoisuutta käyttämiensä laitteiden ominaisuuksista ja valvettuneisuutta kenttien vaikutuksesta.

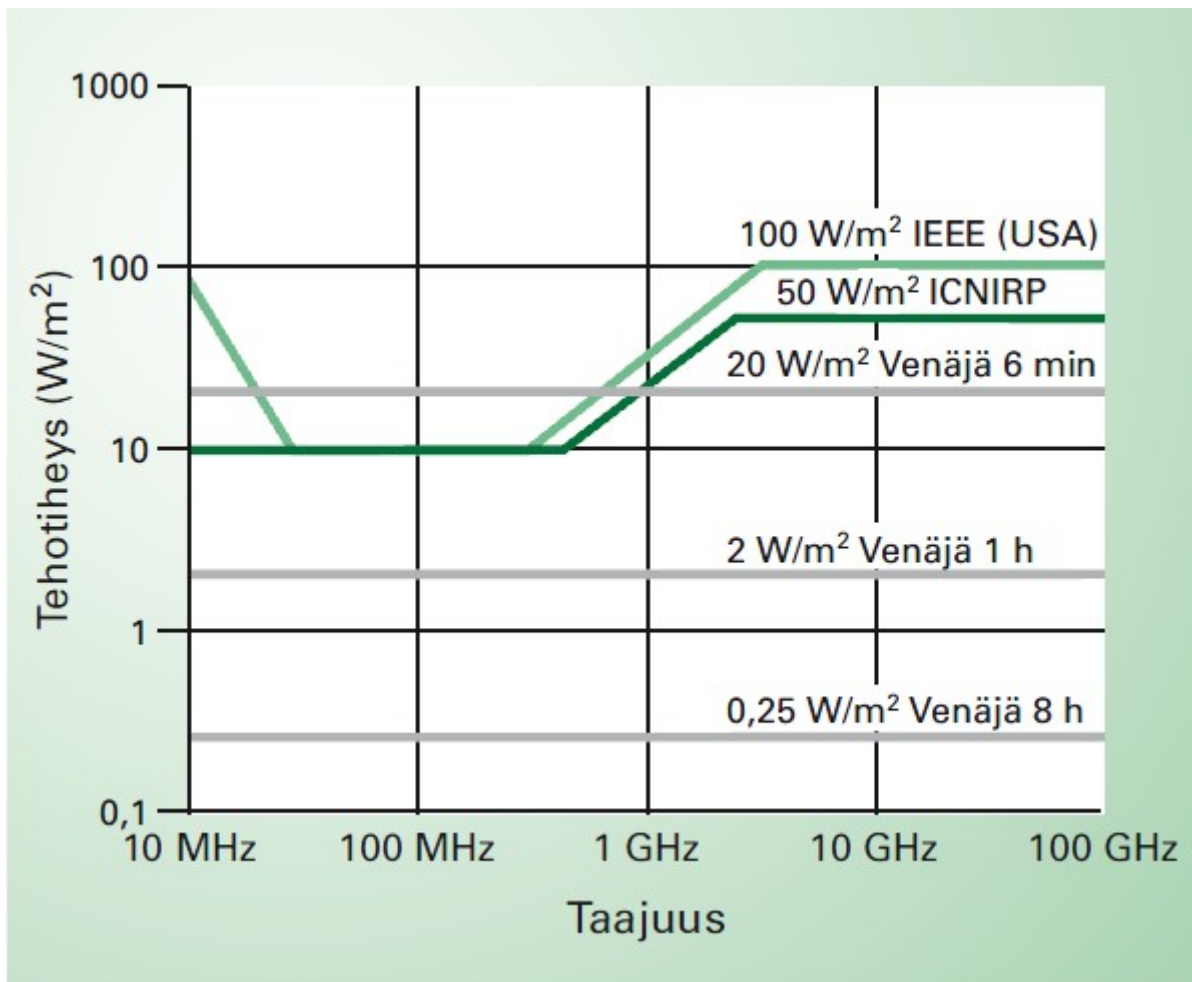
Tämän työn kannalta olennaisin säädös, eli ICNIRP:in magneettikentän voimakkuudelle asettama raja-arvo on esitetty kuvassa 23. 100 kHz:n kohdalle merkatussa kohdassa suurin sallittu magneettivuon tiheys on 6,25 µT. Säädöksen raja-arvo merkitsee suurinta sallittua kentän voimakkuutta torsossa. Mikäli laite emittoi raja-arvoa suuremman magneettivuon tiheyden, voidaan ko. laitteelle silti saada myyntilupa määritellä käyttöetäisyys torsosta sellaiseksi, että kenttä vaimenee raja-arvoa alhaisemmaksi käyttöetäisyyden reunalla.



Kuva 23: ICNIRP:n asettamat raja-arvot magneettikentän voimakkuudelle [14]

Maailmassa on kolme eri alueellista standardointitapaa sähkömagneettisten kenttien voimakkuuksien raja-arvoille. Näiden säädösten raja-arvot esitettynä kuvassa 24. Pohjois-amerikkalainen IEEE, länsi-eurooppalainen ICNIRP ja Itä-Euroopassa ja Kiinassa käytössä olevat entisen Neuvostoliiton säädöksistä johdetut säädökset.

Läntisten standardointijärjestelmien lähestyminen rajoituksiin on samantapainen, vain raja-arvot ovat eri suuruisia. Venäjällä käytössä olevien rajoitusten laadintaperusteet ovat oleellisesti erilaiset kuin länsimaissa. Ne perustuvat yksittäisten ilmiöiden analysointiin sijaan epidemiologisiin menetelmiin ja suurilla väestömäärillä suoritettuihin subjektiivisiin testauksiin. Niissä magneettikenttä tulkitaan yleisenä stressitekijänä, joka laukaisee muun muassa päänsärkyä, muistin heikentymistä, heikotusta ja huimausta. Tämän perusteella on luotu eri altistumisajoille vastaavat suurimmat sähkömagneettisten kenttien tehotiheydet. Länsimaissa vastaavia subjektiivisia tuntemuksiin suhtaudutaan lähinnä sähköyliherkkyytenä.



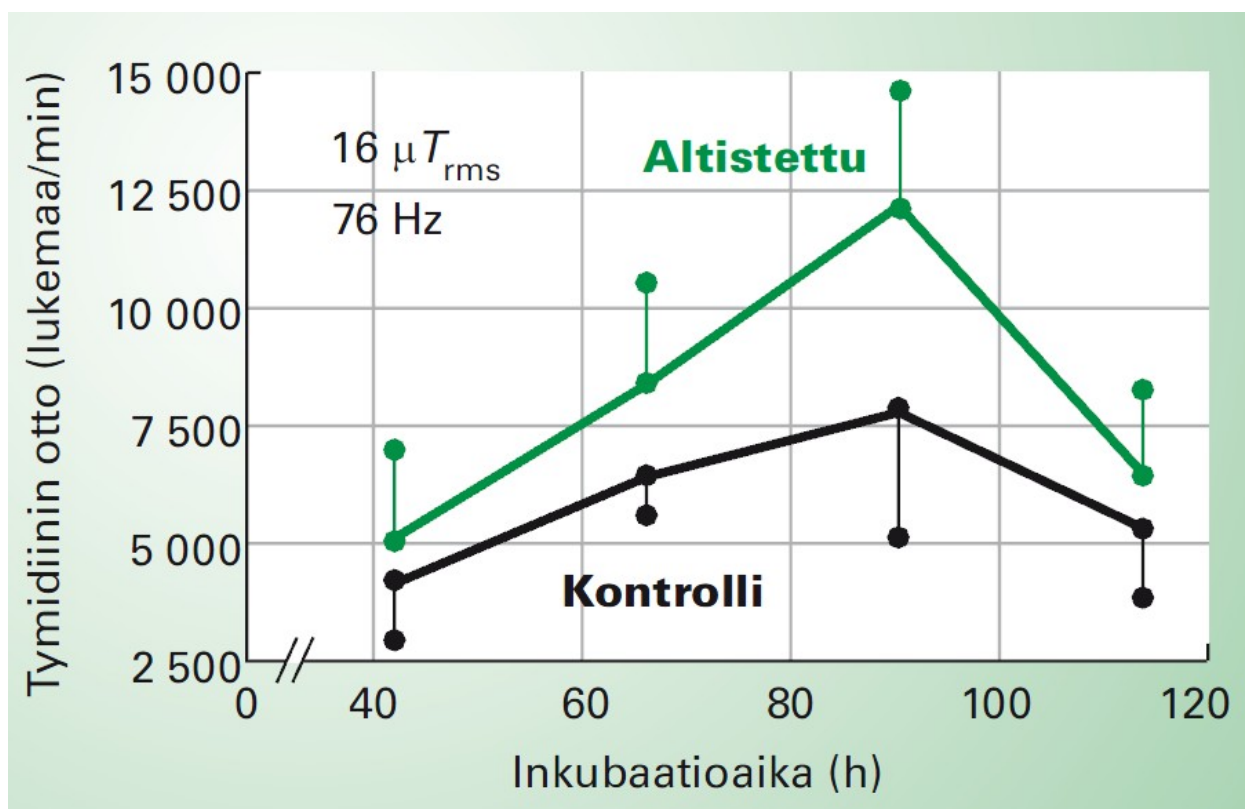
Kuva 24: Magneettikentän tehotiheysrajoitukset alueittain [14]

2.6.5 Solutason vaikutukset

Suoraa magneettista vuorovaikutusta on havaittu ihmisen sidekudoksen perussolujen fibroblastien DNA-synteesissä taajuusvälillä 15 Hz - 4 kHz (kuva 25). Vaikutus havaittiin, kun magneettivuon tiheys ylitti $2 \mu T$, eikä magneettivuon kasvatuksella ollut vaikutusta enää kynnsarvon ylityttyä [14].

Toisessa tutkimuksessa seurattiin kahden entsyymin, $Na^+-K^+-ATPaasin$ ja sytokromioksidaasin aktiivisuutta magneettikentillä stimuloituina. Ensin mainitun aktiivisuus kasvoi jo $0,5 \mu T$:n magneettikentänvoimakkuuden ylityttyä, magneettikentän voimistaminen kynnyksen yli ei enää tuonut muutosta aktiivisuuteen [14].

Yksittäisen langattoman latauslaitteen lähetystaajuus on selkeästi taajuuskaistan ulkopuolella, mutta esimerkiksi kahden lähtetimen vuorovaikutus luo sekoitustuloksena erotustaajuisten taajuuskomponentin, joka on tyypillisesti satojen hertzien tai joidenkin kilohertsien taajuudella.



Kuva 25: Magneettikentän stimuloiva vaikutus DNA-synteesiin [14]

Tutkimuksissa on myös havaittu rotan sidekudossolujen ja luuytimen kantasolujen alustaan kiinnittymisen häiriintyvän magneettikentässä. Kiinnittymiskyvyn menettäneissä soluissa huomattiin myös ohjelmoidulle solukuolemalle tyypillisiä muutoksia. Suurin tutkimuksissa käytetty magneettikentänvoimakkuus oli $180 \mu\text{T}$ [14].

Kokeessa, jossa seurattiin $15,6 \text{ kHz}$ $40 \mu\text{T}$ saha-aallon vaikutusta viljeltyjen solujen DNA:han, todettiin magneettikentän lisäävän metyylinitrosoguanidiinin aiheuttamien DNA-vaurioiden määrää [14].

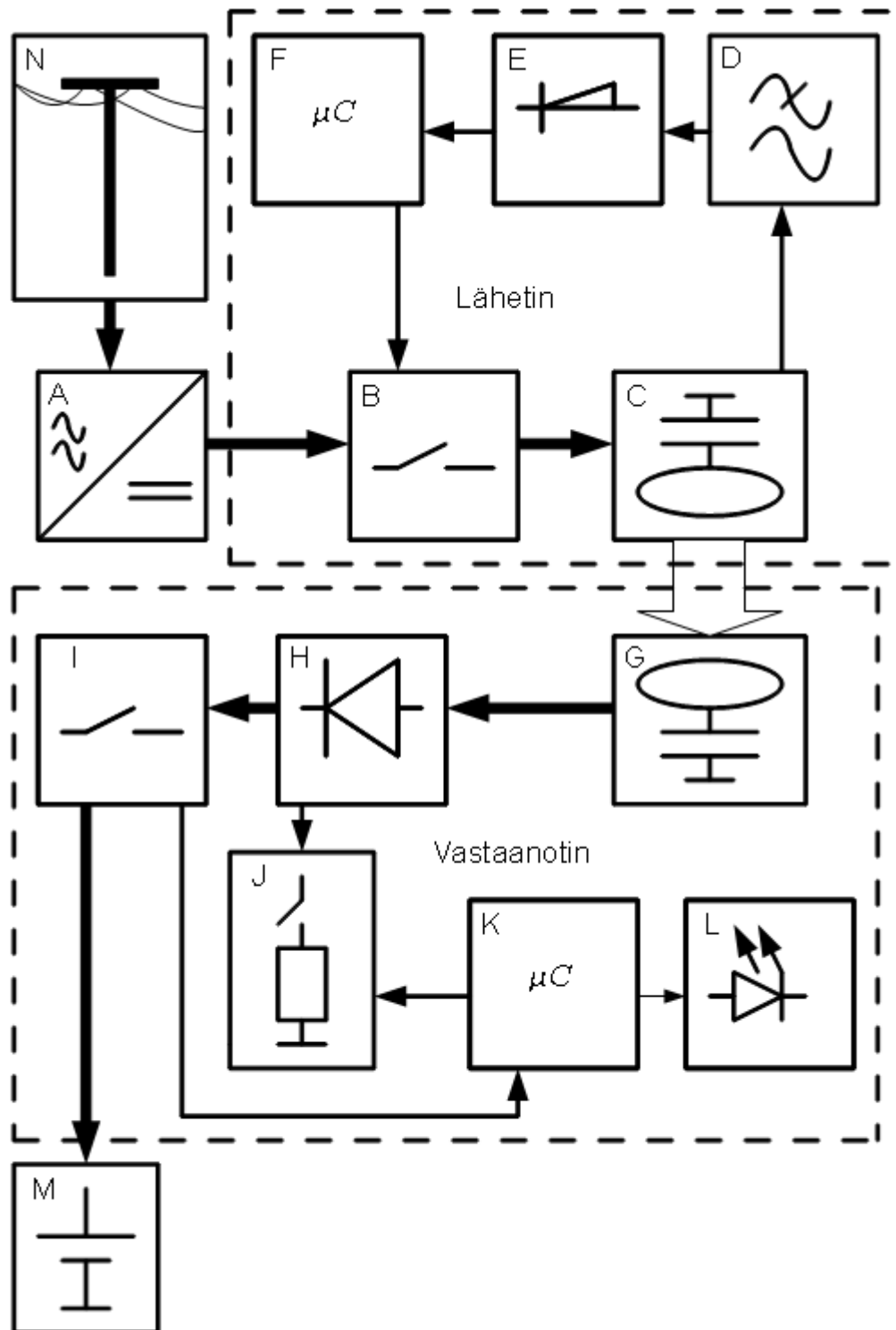
2.6.6 Lisääntymisterveys

Kuopion yliopistossa tehdyissä tutkimuksissa altistettiin kanan alkioita taajuuksilla 1 kHz , 10 kHz ja 100 kHz , ja useilla eri magneettivuon tiheyksillä $130 \mu\text{T}$ asti. Kahden vuorokauden altistamisen jälkeen kaikilla $1 \mu\text{T}$:n ylittävillä ryhmillä todettiin epänormaalien alkioiden määrän lisääntymistä. Koe on kuitenkin puutteellinen pienten ryhmäkokojen takia (20). Linnun alkiolla tehdyistä kokeista ei pitäisi tehdä johtopäätöksiä kenttien vaikutuksista ihmisiin [15].

Ruotsalaisen Frölenin ryhmän tutkimuksissa hiirten varhaiset sikiökuolemat lisääntyivät 20 kHz :n, $15 \mu\text{T}$ saha-aaltoiselle magneettikentälle altistetussa ryhmässä. Suomalainen tutkimusryhmä ei saanut täysin toistettua tulosta. Sikiökuolemat kyllä lisääntyivät, mutteivät tilastollisesti merkittävästi [15].

3 Langattoman latausjärjestelmän suunnittelu

3.1 Latausjärjestelmän toimintalohkot



Kuva 26: Latausjärjestelmän lohkokaavio

Kuvassa 26 on esitettyä langattoman latausjärjestelmän toiminnalliset lohkot sekä niiden väliset yhteydet. Lohko A kuvaa lähettimen tasajännitelähdettä. Lohko B kuvaa jännitekatkojaa, joka muodostaa jännitepulsseja noin 100 kHz:n taajudella. Lohko C kuvaa lähettimen resonanssiipiiriä, joka koostuu lähetinkelasta sekä kondensaattorista. Lohko D kuvaa kuormamodulaattorin alipäästösuodatinta. Lohko E kuvaa kuormamodulaation ilmaisinta. Lohko F kuvaa lähettimen mikrokontrolleria. Lohko G kuvaa vastaanottimen resonanssiipiiriä, joka koostuu antennikelasta ja kondensaattorista. Lohko H kuvaa vastaanotetun tehon tasasuuntaajaa. Lohko I kuvaa lähtöjännitteen vakavoijaa. Lohko J kuvaa kuormamodulaattoria. Lohko K kuvaa vastaanottimen mikrokontrolleria. Lohko L kuvaa vastaanottimen indikaattorivalorivistöä. Lohko M kuvaa vastaanottimeen kytkettyä kuormaa. Lohko N kuvaa verkkojännitettä.

Kuvan 26 paksut mustat nuolet osoittavat siirrettävän sähkönsäätösuunnan. Ohuet mustat nuolet kuvaavat siirtyviä signaaleja ja leveä valkoinen nuoli kuvastaa magneettista kytkentää vastaanottimen ja lähettimen välillä.

3.2 Latausjärjestelmälle asetetut vaatimukset

Latauslaitteiston suunnittekriteerit olivat pitkälti käytännön sanelemia. Langattoman latausjärjestelmän lisäyksestä huolimatta tietokoneita on kyettävä käyttämään myös alkuperäisillä latureilla. Langattomasti siirrettävä teho tulisi olla vähintään koneen virransäästötilassa käyttämä 20 W. Lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys tulisi olla vähintään 30 mm, sillä PC:n asemapaikan alareuna oli 14 mm korkeudella pöytälevystä. Tällöin lähettinantennin jyrksintäsyvyydeksi jäisi maltilliset 16 mm. Pöytälevyn materiaalin keston puitteissa lähettinantenni olisi ollut mahdollista tuoda vielä lähemmäksi pöydän pintaa, mutta suurempi etäisyys kasvattaa koneen latausalueen. Kannettavaa tietokonetta käytettäessä on aivan normaalia, että konetta liikutetaan muutamia senttimetrejä alkuperäisestä työskentelypisteestä – nyt tällainen mikroliikuttelu on mahdollista, ilman latauksen keskeytymistä. Projektissa toteutuneilla geometrioilla konetta saattaisi poikkeuttaa noin 5 cm latausalueen keskipisteestä latauksen keskeyttä.

Multibay-paikkaan mahtuu ulkohalkaisijaltaan 100 mm:n vastaanotinantenni. Kohtuullisen tilausmäärän saavuttamiseksi lähetin- ja vastaanotinantennit tehtiin identtiseksi. Mikäli vastaanottimen painoa haluaisi optimoida, siinä ei tarvitsisi käyttää lähettimen vaatimaa 90X0,1 mm litz-lankaa.

3.3 Kannettava tietokone

3.3.1 Kannettavien tietokoneiden valinta projektiin

Projektin ensimmäinen tehtävä oli valita opetuskäyttöön soveltuva tietokone, jolle olisi mahdollista rakentaa langaton latausjärjestelmä. Tietokoneen tuli olla pieni ja vähän virtaa kuluttava, minkä lisäksi siinä piti olla tilaa vastaanottimen elektroniikalle. Tietokoneen pohjassa ei saa olla metallirunkoa tai muita laajoja metallipintoja, joihin magneettikenttä muodostaisi häviöllisiä pyörrevirtoja.

Monista markkinoilla olevista tietokoneista päädyttiin HP Probook 4310s -kannettavaan. Koneen muovinen kotelo, multibay-asemapaikka, Smart AC-lataustekniikka, pieni tehon kulutus ja pieni koko suosivat laitetta. Multibay-asemapaikka on muodostunut defacto-standardiksi kannettavien tietokoneiden optisten asemien paikkana. Asemalle varattu tila riittää hyvin myös langattoman tehon vastaanottimelle, eikä optista asemaa tarvita opetuskäytössä. Lisäksi useimmiten asemien paikka on sijoitettu lähelle koneen pohjaa, josta muovikuoren läpäisevä magneettikenttä

saavuttaa vastaanottimen.

3.3.2 HP:n Smart AC-tekniikka

Smart AC-tekniikka on HP:n kannettavissa tietokoneissa käytettävä tekniikka, jossa virtalähde kommunikoi tietokoneelle virranantokykynsä. Tietokoneen virtalähteen johdossa on kolmas johdin, jossa oleva tasajännite kertoo tietokoneelle virtalähteen virranantokyvyn. Jännite vaihtelee välillä 0 – 19 V. 5 V:n jännitteellä tietokone alkaa ottaa vastaan tehoa, mutta se ei lataa akkua lainkaan ja toimii virransäästötilassa. Tämän ominaisuuden avulla voidaan rajoittaa PC:n käyttämän tehoa koneen ollessa heikossa kentässä.

3.3.3 Kannettava tietokone kuormana

Kannettavien tietokoneiden virtalähteiden nimellisjännitteet vaihtelevat välillä 15 V - 20V. Virtalähteiden suurin antovirta on tyypillisesti alle 5 A. Tietokoneiden virtalähteet sisältävät hakkuriipiirin, joka muuttaa laitteeseen syötettävän ja akusta otettavan jännitteen tietokoneelle sopivaan muotoon.

Kannettavan tietokoneen verkosta ottama teho vaihtelee huomattavasti. Akun lataus ja virransäästöominaisuudet vaikuttavat tietokoneen hetkelliseen tehonkulutukseen. Kuorman vaihtelu huonontaa latausjärjestelmän hyötysuhdetta, sillä vastaanottimen takaisinkytkentä on hidas verrattuna kuorman muutoksiin.

Kannettavien laitteiden akunkesto on parannettu virransäästöominaisuuksilla. Ne sammuttavat tarpeettomia laitteita, himmentävät näyttöä ja laskevat suorittimen kellotaajuutta. Virransäästöominaisuudet vaihtavat kulutettua tehoa vain muutamia watteja, mutta kuorma saattaa vaihdella jopa useita kertoja sekunnissa.

Kannettavien tietokoneiden akut koostuvat lithium-ion kennoista, joiden nimellisjännite on 3,7 V ja kapasiteetti yli 2000 mAh. Yleisin tietokoneissa käytettävä kennotyyppi on 18650, jossa kenno on suljettu halkaisijaltaan 18 mm ja pituudeltaan 65 mm olevaan terässylinteriin. Kennojen kapasiteetit vaihtelevat hinnan ja valmistusajankohdan mukaan. Vuoden 2010 aikana valmistetusta kannettavan tietokoneen akusta löytyy tyypillisesti 2200 mAh:n tai 2400 mAh:n kennoja. Akkuvalmistajat suosittelivat kennojen latausvirraksi korkeintaan 1,5 C/h. Tyypillisessä 8-kennoisessa akussa tämä tarkoittaisi maksimissaan 90 W:n lataustehoa.

Kannettavien tietokoneen päällä olo kuluttaa n. 20 W, joten akun latauksen aiheuttama muutos laitteen ottamaan tehoon on huomattava. Onneksi latausta ei kytkeä taajaan päälle ja pois, mikä helpottaa järjestelmän säätöä.

3.4 Latausjärjestelmän toimintalogiikan suunnittelu

Induktiivisen lataustekniikan toiminta-alue rajoittaa magneettivuon tiheyden heikkeneminen lähetinantennista etäännyttäessä. Käytäntö on osoittanut, että vastaanotinta voi poikkeuttaa lähetinantennin keskipisteestä antennin säteen verran, jonka jälkeen tehonsiirron hyötysuhde heikkenee dramaattisesti.

Rajoittunut latausalue asettaa vaatimukset tietokoneen paikoitukselle. Käyttäjän pitäisi löytää pöydän lataava alue ja kyettävä pitämään tietokoneen vastaanotin noin viiden senttimetrin säteellä latausalueen keskipisteestä. Prototyypeissa paikannusinformaatio välitetään kahdella eri

tavalla. Karkea paikoitus tapahtuu merkkäamalla latausalue pöytään. Tarkka paikoitus tapahtuu tietokoneen kylkeen multibay-aseman paikalle tulevaan ledirivillä, jossa valaisevien ledien määrä indikoi magneettikentän voimakkuutta. Koneen asettaminen ja pitäminen tarkasti latausalueen sisäpuolella on mahdollista tarkkailemalla ledirivin korkeutta.

3.5 Tehon vastaanottimen suunnittelu

3.5.1 Vastaanottimen elektroninen suunnittelu

Vastaanottimen kytkentäkaavio on liitteenä 6.1. Se on jaettu toimintojen mukaan nimettyihin lohkoihin.

Otto- ja antojännitteet-lohko sisältää liittimet kannettavan tietokoneen tehopiirin kytkemiseen tehon vastaanottimeen.

Smart AC-liitin sisään ja ulos-lohko sisältää liittimet ja johtimet tietokoneen Smart AC-logiikan kytkemiseen tehon vastaanottimeen.

Lähtövirran mittaus-lohkossa on Zetex TTCT1021-virtamittari lähtövirran mittaukseen. Ei käytössä prototyypissä.

LED-rivistö-lohkossa on 7 punaista lediä, joilla tehon vastaanotin ilmaisee toimintaansa käyttäjälle.

Resonaattori + Tasasuuntaus-lohko sisältää vastaanottimen antennikelan, resonaattorikondensaattorin, tasasuuntausdiodit ja syöttöjännitteen kondensaattorin.

Ylijännitesuoja-lohkossa on kytkimet ja kondensaattorit, joilla vastaanottimen ominaisresonanssitaajuutta voitaisiin siirtää pois lähettimen taajuudelta, mikäli vastaanottimeen uhkaksi muodostuu ylijännite. Lohko ei käytössä prototyypissä.

Kuormamodulaattori-lohkossa on kuormodulaatiovastus ja sitä ohjaava kytkin. Atmegan USART-signaali on invertoituva, jottei modulaatiovastuksen läpi kulkisi virta signaalin ollessa oletustilassa.

Ohjelmointiliitin-lohkossa on mikrokontrollerin ohjelmointiin käytettävä liitin.

Mikrokontrolleri-lohkossa on Atmega48 tasajännitesuodatuksineen ja liitäntöineen. Piiri valittiin aikaisempiin kokemusten perusteella. Lähettimeen ja vastaanottimeen käytettiin yksinkertaisuuden vuoksi samoja piirejä.

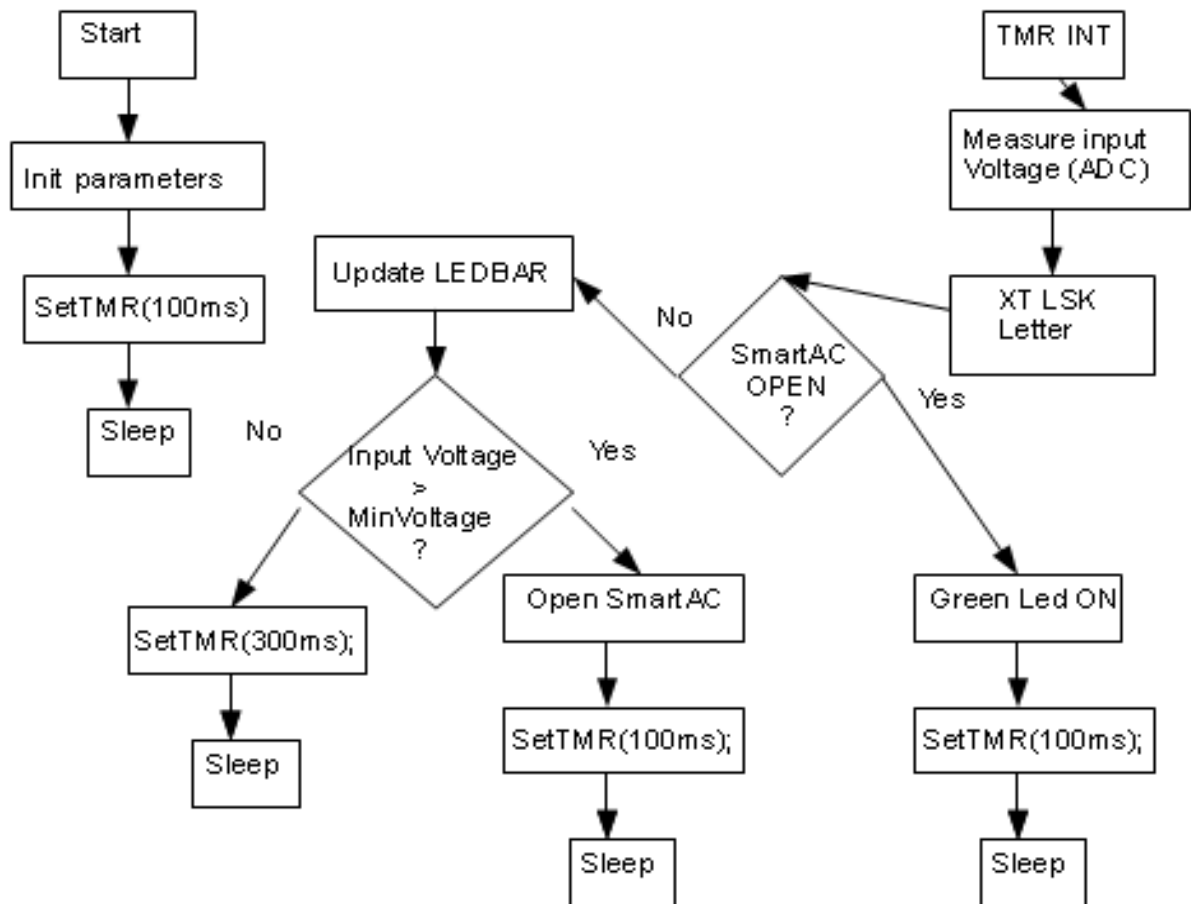
Jännitelähteen (19 V) ja sisäisen käyttöjännitteen (5 V) regulaattori-lohkossa on MAXIM MAX15046-piiriin pohjautuva tasajännitekatkoja. Piiri valittiin suuren syöttöjännitteen keston (42 V), sisäisen 5 V lineaariregulaattorin, käsin juottamiseen soveltuvan QSOP-kotelon ja hyvän saatavuuden takia.

3.5.2 Vastaanottimen komponenttien valinta

Resonaattorikondensaattorin tärkeimmät ominaisuudet ovat jännitekesto ja häviökerroin. Tasasuuntausdiodin tärkeimmät kriteerit ovat myötäsuuntainen häviöjännite ja virrankesto. Lähtöjännitteen reguloivan hakkurin tulee kestää laajaa syöttöjännitteen vaihtelua ja yllettävä korkeaan hyötysuhteeseen kuumenematta liikaa. Vastaanottimen komponenttilistaus on liitteessä 6.3.

3.5.3 Ohjelmiston toimintalogiikka

Vastaanottimen mikrokontrollerin tehtäviin kuuluu tarkkailla vastaanotetun tehon suuruutta tasasuunnatun jännitteen suuruudesta. Se myös ohjaa latauskanavan aukioloa ja Smart AC-pinnan jännitettä. Mikrokontrolleri myös kuormamoduloi vastaanotettua kenttää USART-väylän avulla, joka toimii yksisuuntaisena kommunikaatioväylänä lähettimen suuntaan. Lisäksi ohjelmisto hallinnoi vastaanottimen paikannusledejä, joiden avulla käyttäjä kykenee sijoittamaan tietokoneen tarkasti latausalueelle.



Kuva 27: Kaavio vastaanottimen ohjelmasta

Kuvassa 27 on esitetty kaavio vastaanottimen ohjelmiston toimintalogiikasta. Mikrokontrollerin käynnistyessä hakukentän tehon avulla, se lähettää kuormamodulaation avulla lähettimelle komennon siirtyä paikoitustilaan. Tasasuuntaajan jännitteen suuruuden mukaan kontrolleri vilkuttaa vastaanottimen ledirivin punaisia valoja, kunnes lataukseen riittävä kytketyminen toteutuu. Toisin ilmaistuna, vastaanotin on asetettu riittävän keskelle latausaluetta.

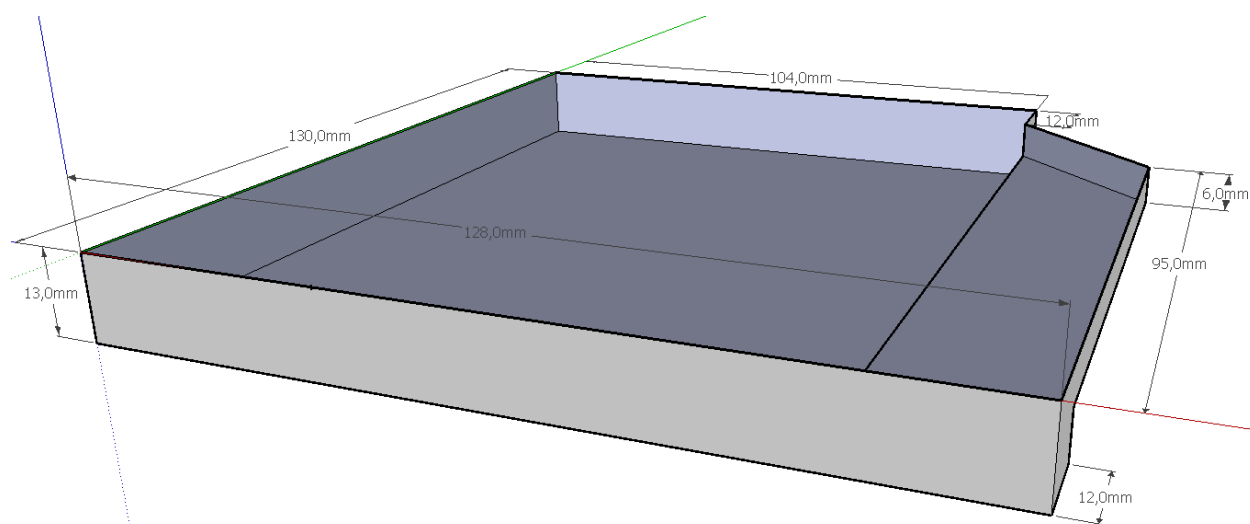
Lataukseen riittävän kytketyksen tapahtuttua vastaanottimen ledirivistö jätetään jatkuvasti päälle. Kun tasasuunnatun jännitteen arvo saavuttaa riittävän arvon, avaa kontrolleri kytkimen, joka nostaa Smart AC-pinnan jännitteen ja näin avaa tehon siirron tietokoneelle.

Mikäli mitattu tasajännite lähestyy hakkurin lähtöjännitettä (19 V), lähettimelle välitetään käsky nostaa tehoa. Vastaavasti, kun tasasuunnatun jännitteen arvo lähenee hakkurin suurinta syöttöjännitettä (42 V), lähetetään käsky laskea lähetystehoa.

Rakennetussa prototyypissä käytettiin resistiivistä modulaatiotekniikka, jota käytettäessä modulaatiovastus kuumenee huomattavasti. Rakentamalla reaktiivinen modulaattori, joka muuttaisi vastaanottimen ominaisresonanssitaajuutta bitin ollessa ylhäällä, olisi mahdollista rakentaa ylijännitesuoja joka laskisi kytkentäkerrointa voimakkaasti ylijännitteen uhatessa. Tätä ylijännitesuojaa ei prototyyppiin aikataulupaineiden takia tehty, mutta sille olisi tarvetta. Tietokoneiden käyttämä virta vaihtelee jopa 3 A:n askelissa, eikä 100 ms:n välein avautuvan 2400 baudia sekunnissa siirtävän sarjaliikenneväylän yli toteutettu etäregulointi kykene vastaamaan näihin muutoksiin.

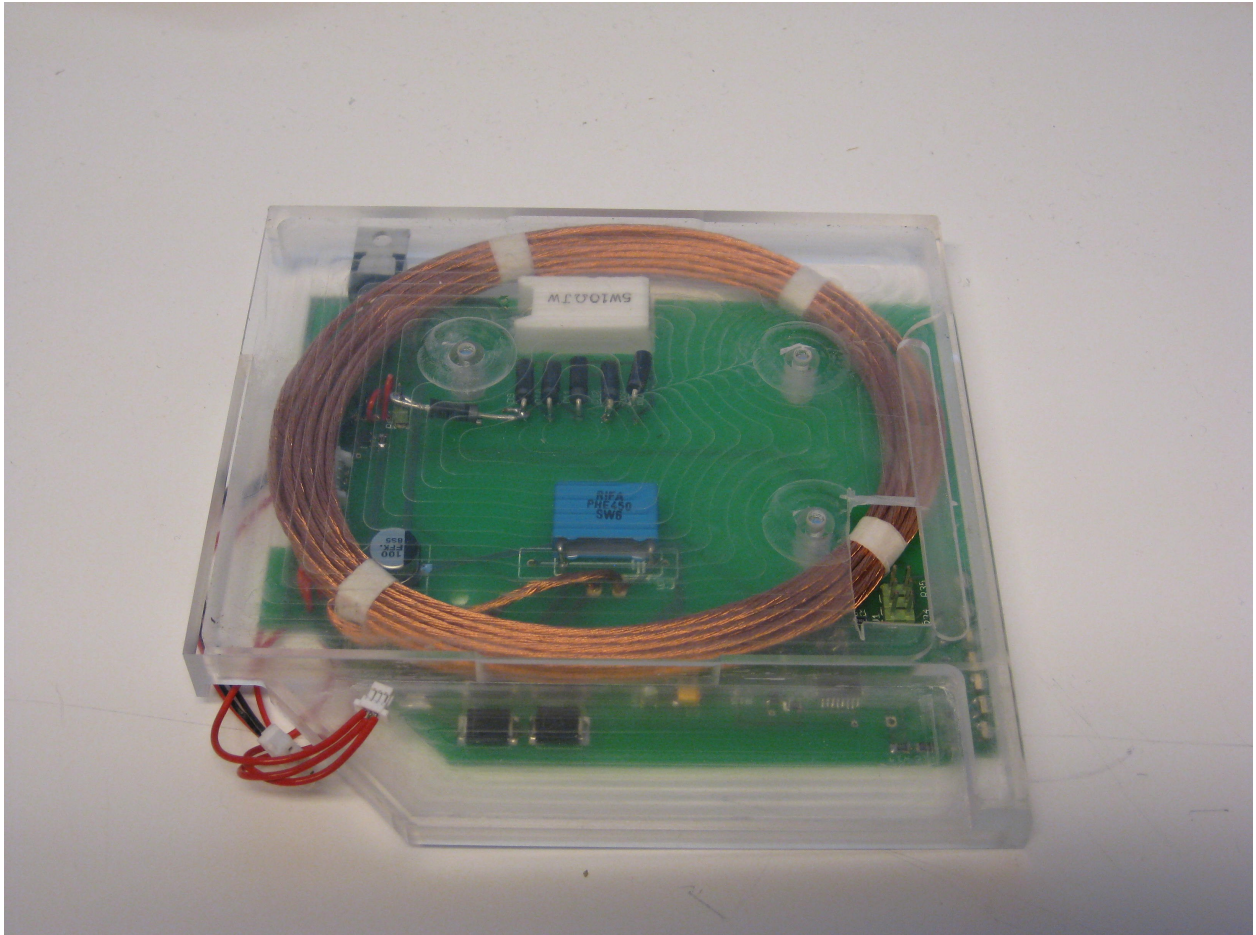
3.5.4 Vastanottimen mekaaninen suunnittelu

Vastanottimen elektroniikan sijoittaminen tietokoneen multibay-paikkaan määrittää kotelon ulkomitat. Kuvassa 28 on multibay-asemapaikan mitat, johon vastaanotin on mahdutettava. Asettamalla kotelon seinämävahvuudeksi 3 mm ja valitsemalla piirilevyn kiinnityspisteet, voidaan piirilevyn liittimien paikat jäädyttää ja niille varattavien aukkojen paikat valita. Vastanottimen kotelo jyrsitään läpinäkyvästä polykarbonaatista ja piirilevy kiinnitetään siihen neljällä M3-uppokantakoneruuvilla. Piirilevy jää konstruktion kanneksi, joka puristuksellaan pitää vastaanottokelan tiukasti paikallaan.



Kuva 28: Multibay-asemapaikka mittoineen

Vastanottimen piirilevyn osasijoittelukuva on liitteessä 6.2. Kuvasta puuttuvat vastaanotinantenni ja modulaatiovastus.



Kuva 29: Tehon vastaanotin koteloituna

Kuvassa 29 on vastaanotin koottuna. Antennikela kiertyy kotelon sisällä. Johtimet liitetään tietokoneen Smart AC- ja virtajohtimien paikoille ja alkuperäiset johtimet liitetään tehon vastaanottimeen. Näin kannettavaa voidaan käyttää myös normaalilla virtalähteellä.

3.5.5 Tehon vastaanottimien asennus kannettavaan tietokoneeseen

Tietokoneiden dvd-asetat oli poistettava tehon vastaanottimen paikalta. Langattoman tehon vastaanotin kytkettiin tietokoneen normaalin tasajännitesyöttöpistokkeen ja sisäisen tehonlähteen väliin siten, että koneiden lataus normaaleilla virtalähteillä oli mahdollista.

3.6 Tehon lähettimen suunnittelu

3.6.1 Vahvistintopologian ja käyttöjännitteen valinta

Lähettimen tehonsyöttö hoidetaan ulkoisella tasajännitelähteellä, jolloin vältetään pienjännitedirektiivin asettamilta rajoituksilta. Vaihtoehtoina olisi ollut oman muuntaja- tai hakkuritehonlähteen suunnittelu, mutta kumpikaan ei tämän projektin puitteissa ollut järkevää, sillä ulkoisia jännitelähteitä on saatavilla edullisesti. Tehonlähteiden hinnat vaihtelevat huomattavasti antojännitteen ja -virran mukaan. Osoittautui, että edullisimpien yli 50-100 W tasajännitelähteiden antojännite on noin 20 V. Jotta tällä käyttöjännitteellä saataisiin riittävä teho kuormaan, on siirryttävä käyttämään monimutkaisempaa H-siltakatkojaa yksinkertaisemman

puolisiltakatkojan sijaan.

3.6.2 Lähettimen elektroninen suunnittelu ja komponenttien valinta

Lähettimen kytkentäkaavio on liitteenä 6.4. Kaavio on jaettu nimettyihin lohkoihin seuraavasti: Ohjelmointiliitin-lohkossa on mikrokontrollerin ohjelmointiin käytettävä liitin.

LED-indikaattorivalo-lohkossa on kolmivärinen indikaattorivalo, jolla lähetin kommunikoi käyttäjälle.

Regulaattori 5 V-lohkossa on mikrokontrollerin ja sen lisälaitteiden käyttöjännitteen regulaattori.

Regulaattori 12 V-lohkossa on H-kokosiltaohjaimen käyttöjännitteen ja sen lisäpiirien käyttöjännitteen regulaattori.

Mikrokontrolleri-lohkossa on Atmega48 tasajännitesuodatuksineen ja liitännöineen. Piiri valittiin aikaisempiin kokemusten takia. Samasta kontrolleriperheestä olisi löytynyt paremmin käyttöön soveltuvia PWM3-malleja, mutta aikataulupaineiden takia niitä ei ryhdytty soveltamaan.

Täyssiltaohjainpiiri-lohkossa on Intersil HIP4082-kokosiltaohjain lisälaitteineen. Piiri valittiin 100 kHz:n taajuusalueelle soveltuvuuden, käsin juotettavuuden ja hyvän saatavuuden takia.

LSK-vastaanotin-lohkossa on LM311 komparaattoriin perustuva kuormamodulaation verhoikäyräilmaisoin alipäästösuodattimisineen.

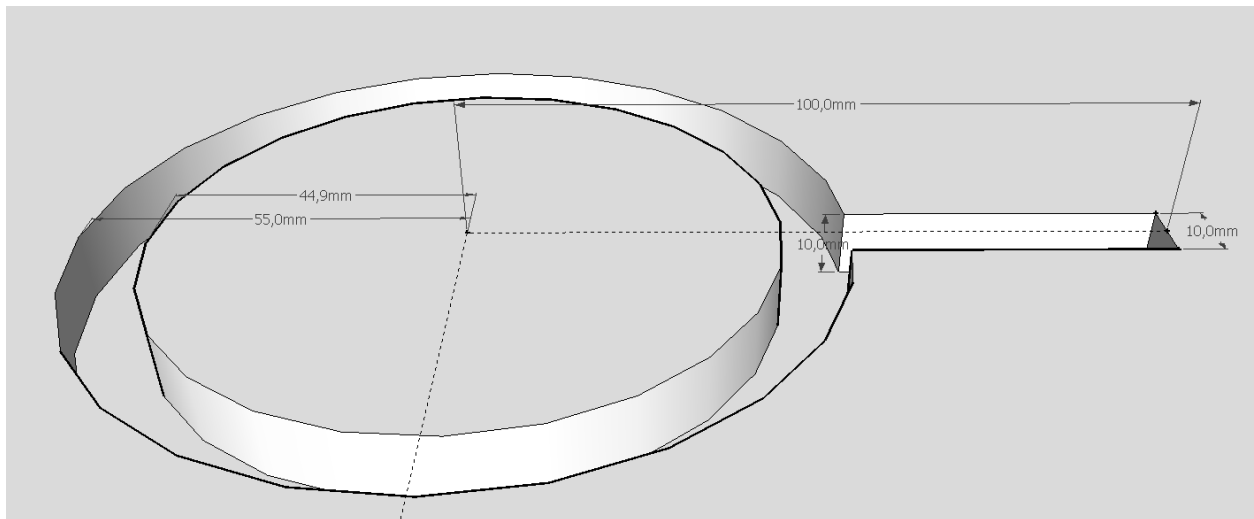
EMI-suodatin-lohkossa on käyttöjännitteen häiriöiden poistoon tarkoitettuja suodattimia.

Täyssiltakatkoja-piirissä on resonaattoriin tehoa siirtävät kytkimet kytkinvaimentimisineen ja tasajännitekondensaattoreineen sekä resonaattorikondensaattori.

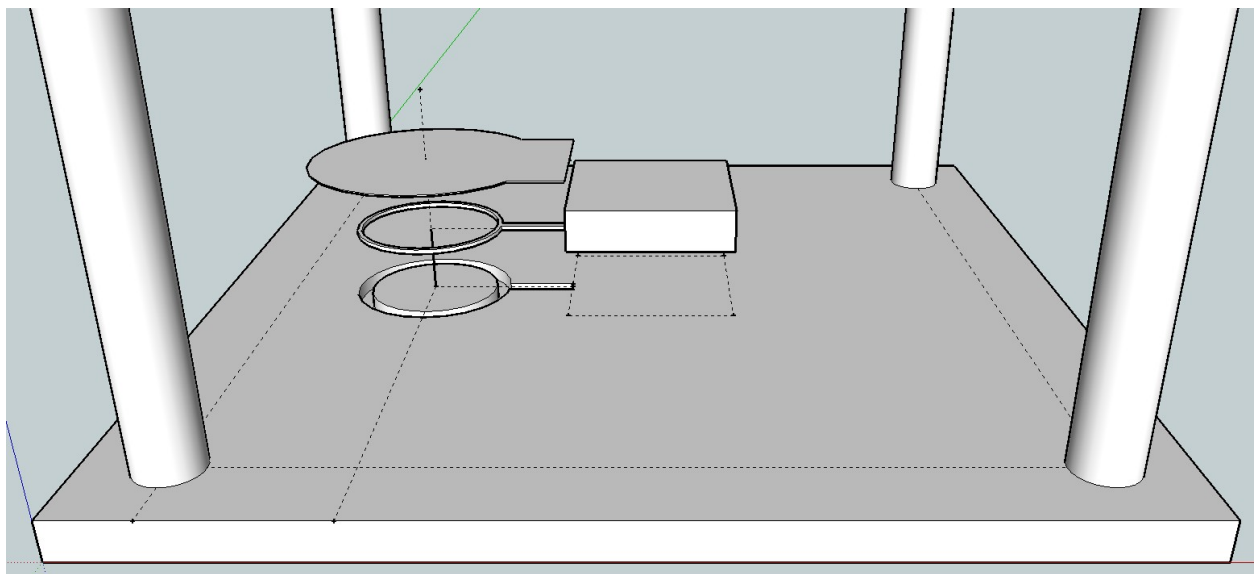
Lähettimen komponenteista kriittisimmät ovat kytkinkomponentit, resonaattorikondensaattori ja tasajännitepankin kondensaattorit. Lähettimen osaluettelo on liitteenä 6.6.

3.6.3 Lähettimen mekaaninen suunnittelu

Lähettimen sijoittaminen pöytälevyn alapintaan antoi vapaat kädet käyttää valmiita sähkökoteloita. Lähettimen piirilevy suunniteltiin mahtumaan Fiboxin 114 mm x 114 mm -koteloihin, jotka ovat aikaisemmin osoittautuneet laadukkaiksi. Lähettimen antennikelaa varten pöytälevyyn joutuu tekemään upotuksen, jotta kelojen välinen etäisyys ei kasvaisi liiaksi. Kuvassa 30 on esitetty 25 mm:n paksuiseen levyyn tehtävä jyrshintä. Kuvassa 31 on lähettimen asennuskuvaa, jossa mukana antennikelaa uraan painava kappale.



Kuva 30: Lähetinkelalle tehtävä jyrshintä pöytälevyn pohjaan



Kuva 31: Lähettimen asennus pöytälevyn pohjaan

Lähettimen piirilevyn osasijoittelukuva on liitteenä 6.5.

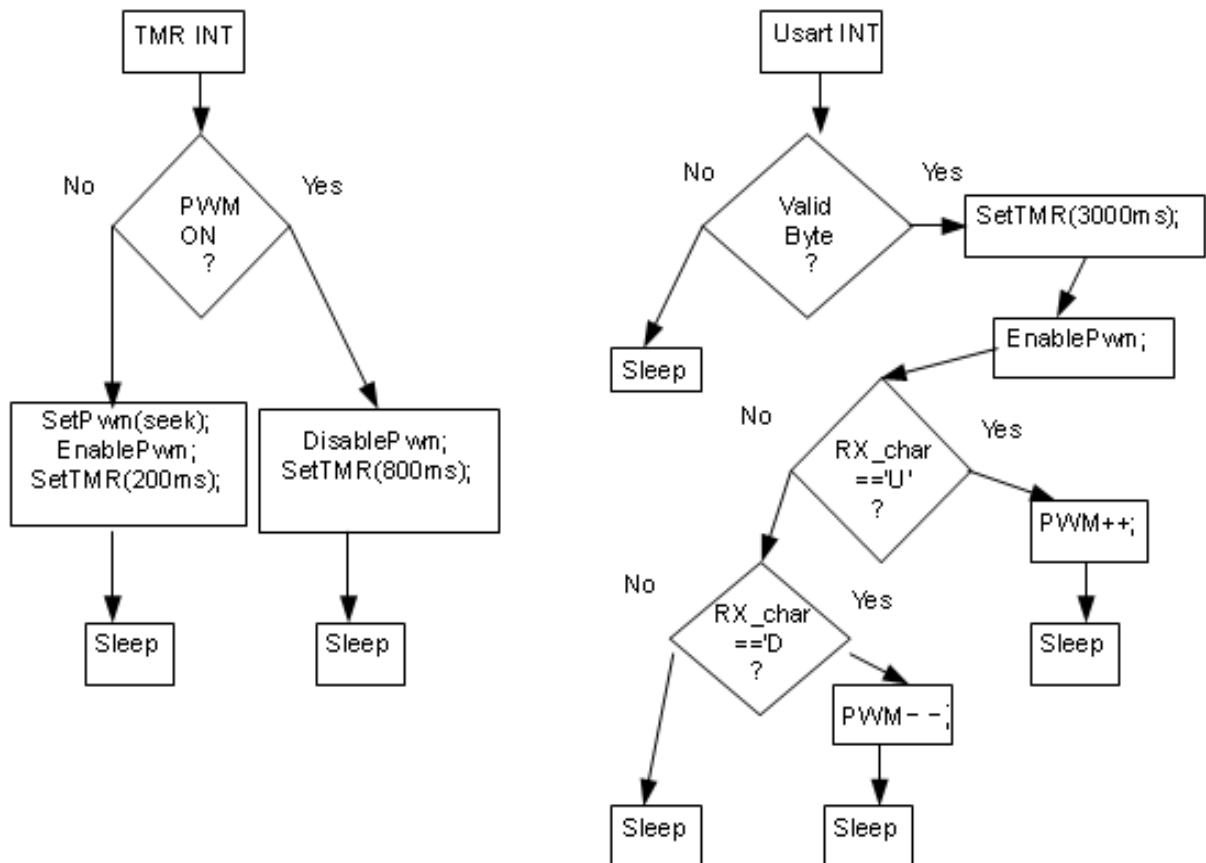
3.6.4 Lähettimen ohjelmiston toimintalogiikka

Lähettimen ohjelmiston on säädettävä lähetettävää tehoa kuormituksen mukaan. Kun tehon vastaanotin ei ole latausalueella, lähetin toimii hakutilassa. Siinä lähetystaajuudella katkottavat tasajännitepulssit ovat pulssisuhteeltaan 10 %:n suuruusluokkaa. Lisäksi lähetystä katkotaan ajallisesti siten, että 100 ms:n lähettyksen jälkeen sammutetaan pulssitus sekunniksi. Tällöin laitteen kuluttama teho hakutilanteessa laskee prosentteihin huipputehosta.

Vastaanottimen tuominen latausalueella näkyy lähettimen mikrokontrollerin sarjadatan vastaanottimelle saapuvana LSK-datana. Oikean tyyppisen sarjamuotoisen datan vastaanotto käynnistää paikoitustilan, jossa lähetys muutetaan jatkuvaksi ja pulssisuhde nostetaan 20 %:n. Mikäli vastaanotin paikoitetaan riittävän tarkasti, antaa vastaanotin käskyn siirtyä lataustilaan, joka nostaa lähetystehoa. Toisaalta, jos datavirta vastaanottimelta katkeaa, siirtyy lähetin takaisin hakutilaan.

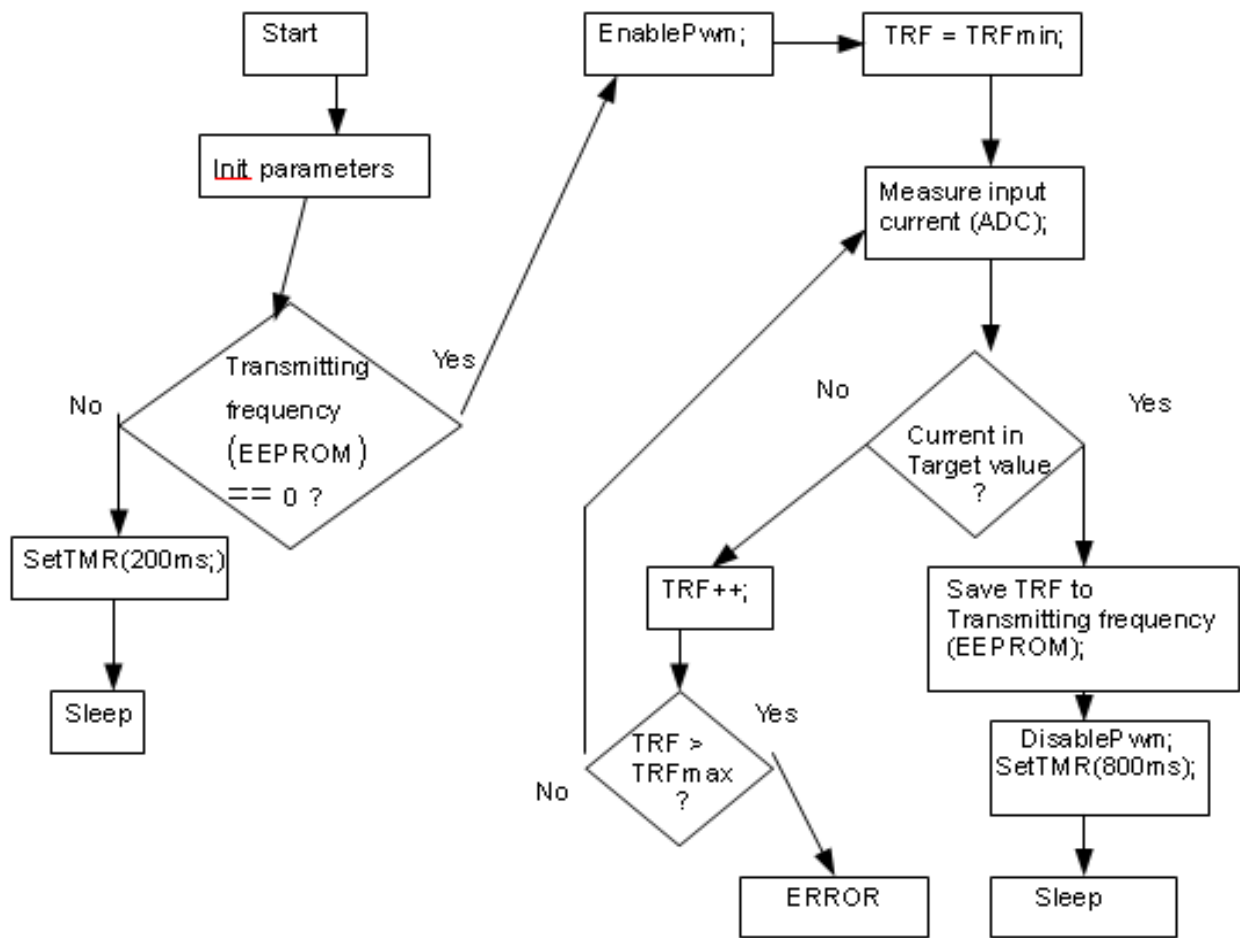
Lataustilassa lähettimen pulssisuhde nostetaan 40 %:n. Vastaanottimen komentojen mukaan pulssisuhdetta säädetään välillä 30 - 50 %, niin kauan kuin tehon vastaanotin on latausalueella ja

lähetin vastaanottaa sarjadataa.



Kuva 32: Kaavio lähettimen ohjelmistosta (osa 1/2 käynnistys)

Kuvassa 32 on esitetty lähettimen ohjelmiston toimintalogiikkaa. Ensimmäisen käynnistyksen yhteydessä pääohjelma kalibroi lähetystaajuuden. Lähetystaajuutta ei voi asettaa kiinteäksi, koska resonanssitaajuuden ja kondensaattorin toleranssit aiheuttavat hajontaa lähettimien ominaisresonanssitaajuuksiin. Kalibroinnissa pyyhkäistään tietyllä pulssinleveydellä taajuuskaista, jolla lähetystaajuus pitäisi löytyä. Mittaamalla lähettimen käyttämää tasavirtaa ADC:n avulla, voidaan päätellä oikea lähetystaajuus, joka tallennetaan EEPROM:iin seuraavia käynnistystensä varten.



Kuva 33: Kaavio lähettimen ohjelmistosta (osa 2/2 toiminta)

Kuvassa 33 esitetään lähettimen ohjelmiston toimintalogiikka normaalissa toimintatilassa. Mikrokontrolleri on lähtökohtaisesti unitilassa, josta se herätetään keskeytyksellä. Ohjelmassa käytetään kahden tyyppisiä keskeytyksiä; ajastinkeskeytyksiä ja USART-keskeytyksiä.

Ajastinkeskeytykset ohjaavat hakutilaa. Ajastimen laskiessa nollaan lähettimen PWM (tehon lähetyksen) joko kytketään päälle tai sammutetaan. PWM:n toiminta ei riipu pääohjelman tilasta, eikä mikrokontrollerin unitilaan siirtyminen keskeytä lähetystä.

USART-keskeytykset ohjaavat lataustilaa. USART-keskeytyksiä muodostuu vain vastaanottimen ollessa lähettimen magneettikentässä. USART-keskeytys viivästyttää hakutilaan siirtymistä 3000 ms:lla. Mikäli vastaanotin lähettää U-kirjaimen, nostaa lähettimen tehoa. Vastaavasti D-kirjaimen tapauksessa lähettimen teho laskee lähetystehoa.

Lisäksi ohjelmassa on keskeytys, joka tyhjentää lähetystaajuuden sisältävän EEPROM-muistipaikan. Muistipaikan tyhjennys aiheuttaa kalibroinnin seuraavan käynnistyksen yhteydessä.

3.6.5 Lähetystaajuuden valinta

Lähetystaajuudella on suuri vaikutus langattoman latausjärjestelmän ominaisuuksiin. Intuitiivisesti resonattorin ominaistajuus tuntuu parhaalta mahdolliselta lähetystaajuudelta. Olisihan lähettimen Q-arvo silloin pienemmällä ja vastaanottimen resonanssi vahvistaisi vastaanotetun jännitteen amplitudia.

Käytännössä asia ei ole näin yksinkertainen, koska kelojen keskinäisinduktanssi kasvattaa järjestelmän kokonaisinduktanssin kelojen itseinduktanssien summaa suuremmaksi. Näin ollen koko järjestelmän ominaisresonanssitaajuus laskee vastaanottimen läsnäollessa.

Siispä lähetystaajuus kannattaa valita hieman yksittäisen resonaattorin ominaistajuuden alapuolelta, jolloin lähettimen kenttään kytkeytynyt vastaanotin virittää koko järjestelmän ominaistajuutta kohti lähetystaajuutta.

Ilmiön hyödyntäminen tuo myös sen edun, että lähettimen tehoa voidaan pitää matalana hakutilanteessa ja vastaanottimen tuonti lähettimen kenttään kasvattaa lähetystehoa ilman aktiivisia säätötoimenpiteitä.

3.7 Tehonsiirtojärjestelmän mittauksia

3.7.1 Lähetystaajuuden vaikutus haku- ja lataustehoon

Pelkän lähettimen resonaattorin ominaistajuus on korkeampi kuin kokonaisjärjestelmän, jossa vastaanotin on kytkeytyneenä lähettimen kenttään. Ominaisuutta voi käyttää hyväksi järjestelmää rakennettaessa, sillä asettamalla lähetystaajuus kuormittamattoman resonaattorin ominaistajuuden alapuolelle, saadaan teho kasvamaan kuorman ilmaantuessa lähettimen kenttään.

Sopiva lähetystaajuuden poikkeutus kannattaa selvittää mittaamalla, sillä analyyttisen ratkaisun tulos olisi joka tapauksessa varmistettava mittauksilla, jotka olisivat olennaisesti samanlaiset kuin seuraavaksi esitetään.

Testilaitteisto on seuraavanlainen: Resonaattorikelan mitattu induktanssi on 54 μH ja resonaattorikondensaattorin mitattu kapasitanssi 48 nF, näistä laskettu ominaisresonanssitaajuus (f_N) on 98,9 kHz. Resonaattorin mitattu ominaisresonanssitaajuus on 99,6 kHz. Kelojen sisähalkaisija on 100 mm. Kelat ovat sijoitettuna samalle akselille ja niiden välistä etäisyyttä muutetaan 25 mm:n askelin (0, 25, 50, 75 ja 100 mm).

Mittaukertojen muuttujana toimii lähetystaajuus, jota kasvatetaan 500 Hz:n askelin. Vastaanottimen kuormana toimii aktiivikuorma, joka mahdollisuuksien rajoissa asetetaan 10 ohmin vastukseen. Aktiivikuorman rakenteesta johtuen sitä ei saa säädettyä 10 ohmin suuruiseksi, kun kuorman kytketään alle 3 V:n suuruinen jännite.

Mittauspöytäkirja on liitteenä (6.7.1). Sen sarakkeista I_{DC} kertoo lähettimen kuluttaman tasavirran suuruuden, V_{DC} kertoo lähettimen käyttämän tasajännitteen suuruuden, P_{in} em. arvoista laskettu lähetysteho, V_{out} on aktiivikuorman päihin kytkeytyvä tasajännite, I_{out} kertoo aktiivikuorman läpi kulkevan virran suuruuden, P_{out} em. arvoista laskettu vastaanotettu teho, $hyötysuhde$ on em. arvoista laskettu järjestelmän tasajännitehyötysuhde. Mittauksien pohjalta on muodostettu kuvaajat 6.7.2, jotka esittävät lähetystehon suuruutta eri taajuuksilla etäisyyttä muuttaen. Kuvaaja 6.7.3 esittää hyötysuhteen muutosta eri lähetystaajuuksilla etäisyyttä muutettaessa ja kuvaaja 6.7.4 esittää lähetystehon suhdetta kuormittamattoman lähettimen tehoon kyseisellä lähetystaajuudella.

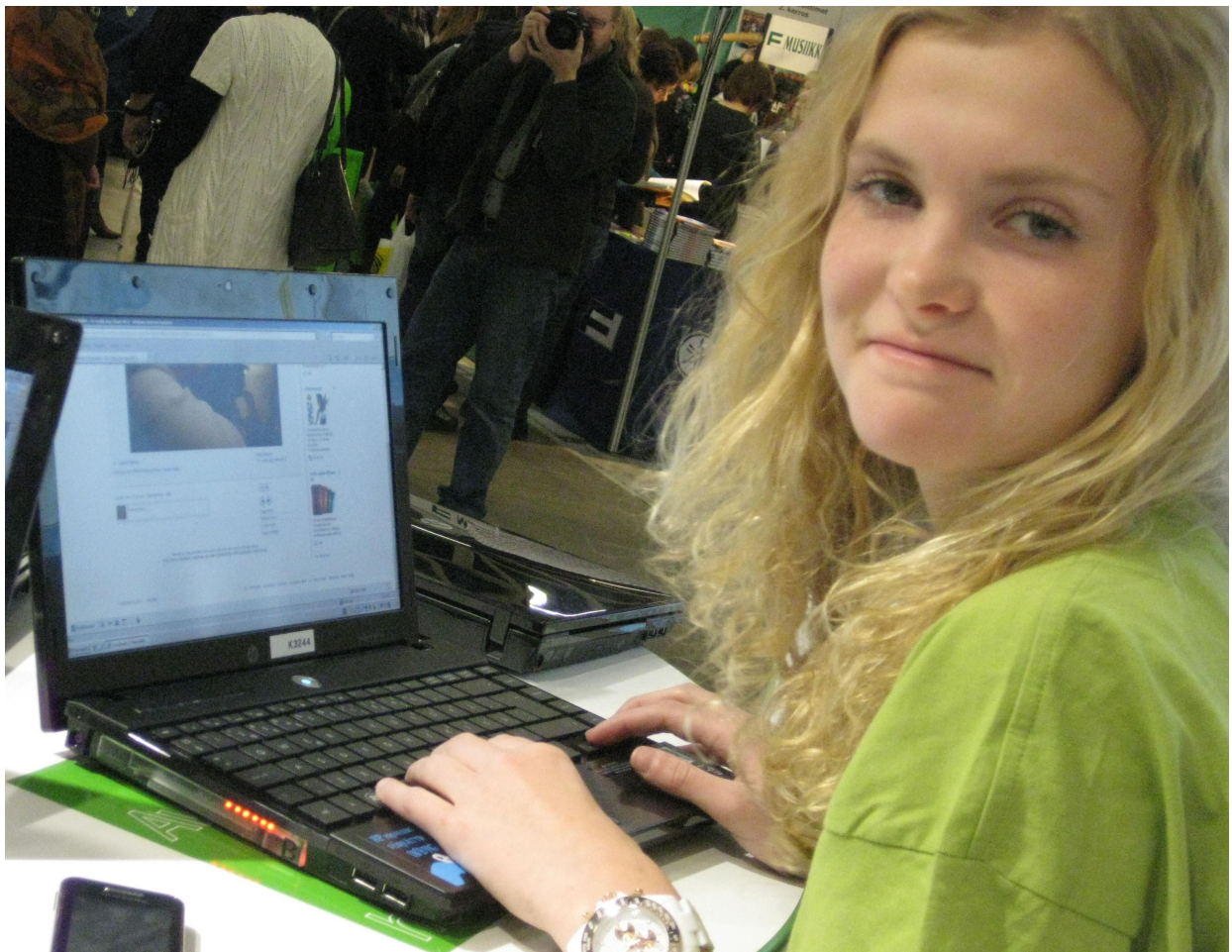
Mittauksien perustella lähetystaajuudet voidaan jakaa karkeasti kahtia, kuormitetun järjestelmän ominaistajuutta alempiin ja ylempiin. Ominaistajuutta alemmille lähetystaajuuksille on ominaista, että hyötysuhde on korkea lyhyillä siirtoetäisyyksillä (25 mm ja 50 mm) ja että lähetysteho kasvaa erityisesti 50 mm:n siirtoetäisyydellä. Lähetysteho on suurin hieman järjestelmän ominaistajuutta matalammalla 98,0 kHz:n taajuudella.

Ominaistaajuuden yläpuolisista taajuuksista ei mittauksien mukaan ole energiatehokkaaseen tehonsiirtoon. Niillä ei kuormaan saada suurta tehoa pienillä siirtoetäisyyksillä, jolloin hyötysuhde on korkeimmillaan.

3.8 Käyttäjäkokeuksia Educa 2010-messuilla

Langattoman latausjärjestelmän prototyypit valmistettiin erityisesti Educa 2010-messuja silmällä pitäen. Messualueella demonstroitiin uusien teknisten opetusvälineiden luomia mahdollisuuksia ja osa messujen kannettavista tietokoneista oli varustettu langattomilla latausjärjestelmällä. Seurasin latausjärjestelmän käyttöä ja toimintaa messujen ajan jatkokehitystä silmällä pitäen.

Suurin osa käyttäjistä osasi sijoittaa koneet latausalueiksi markatuille alueille. Koneet tuotiin niin lähelle oikeaa latausaluetta, että Multibay aseman sivussa olevan ledirivistöön syttyi valo. Jotta tehonsiirto olisi todella alkanut, olisi kone tullut sijoittaa niin tarkasti alueen keskelle, että ledien vilkkuminen olisi loppunut ja kaikki valot olisivat palaneet. Tämä hienopaikoitus osoittautui liian vaikeaksi käytännöksi. Hyvin harvoin oppilaat jakoivat etsiä latausaluetta ja odottaa latauksen alkamista.



Kuva 34: Langaton lataus käytössä Educa 2010-messuilla

Kuvassa 34 kannettava tietokone saa virtaa langattoman latauslaitteen kautta Educa 2010-messuilla. Pöydän pinnassa näkyvä vihreä alue osoittaa latausalueen karkeasti ja vastaanottimen

punaiset valot indikoivat laitteen lataavan.

4 Johtopäätökset

4.1 Täyttyneet odotukset

Projektin tärkein anti on tieto siitä, että kannettavien tietokoneiden langaton latausjärjestelmä on mahdollista toteuttaa. Järjestelmään jääneet tekniset puutteet ovat korjattavissa jatkokehityksen avulla. Educa-messuilla tapahtunut koekäyttö osoitti, että laitteiston toimintalogiikka oli riittävän yksinkertainen nopeasti omaksuttavaksi. Tosin latausalueen pienuus aiheutti sen, että tehonsiirto usein joko katkesi käytön aikana tai ei alkanut lainkaan.

4.2 Järjestelmään jääneet puutteet

Latausjärjestelmä ei tällaisenaan kykene vastaamaan askelmaisiin virrankulutuksen muutoksiin. Latausjärjestelmään tulisi kehittää metallinilmaisoin, joka lopettaisi tehon lähetyksen häviöllisiä kappaleita havaitessaan. Latausalueella olevaan metallikappaleeseen indusoituu pyörrevirtoja. Ne saavat kappaleen kuumenemaan ja kuluttavat tehoa.

Tehonsiirtojärjestelmän hyötysuhde jäi 60 % suuruusluokkaan, mikä aiheuttaa osien lämpenemää. Tehoa siirtävän magneettikentän aiheuttamat pyörrevirrat aiheuttavat lämpenemää epätoivotuissa kohteissa. Erityisesti hyvin johtavat metallit kuumenevat ja saattavat aiheuttaa vaaratilanteita prototyypin käytön aikana.

Magneettikenttä on liian voimakas alueella, jossa käyttäjän keho sijaitsee. Jo latausjärjestelmän kehittämisen alussa oli tiedossa, että prototyypin magneettikentänvoimakkuus tulee ylittämään suurimman hyväksytyin 6,25 μT :n rajan. Kentän voimakkuus lähetinantennin keskellä on noin 300 μT , eikä tästä ole kuin muutama senttimetri kohtaan, jossa käyttäjän raajat sijaitsevat.

Magneettivuon ohjaus ferriittikomponentilla poistaa ongelman, mutta tämän projektin tarkoituksiin sopivien ferriittikappaleiden valmistuttaminen olisi ollut liian kallista. Mikäli vastaavan latausjärjestelmän haluaisi tuotteistaa, olisi suljetun magneettipiirin suunnittelu yksi projektin painopisteistä.

Järjestelmä on myös kallis verattuna perinteiseen langalliseen ratkaisuun. Tämä on suoraa seurausta siitä, että langaton latausjärjestelmä sisältää itsessään langallista laturia vastaavan tasajännitelähteen, jonka antoteho on järjestelmän hyötysuhteesta aiheutuen alkuperäistä suurempi.

4.3 Järjestelmän jatkokehityspotentiaali

Yksi prototyypin valmistamiseen johtaneista syistä oli se, että langattomia matkapuhelinlatureita esitellessämme saimme jatkuvasti palautetta, jonka perusteella kannettavien tietokoneiden langattomalle lataukselle olisi kysyntää. Yleisön kommentit tarvittavasta langattomuudesta on helppo uskoa aidoiksi, sillä heidän mielessään kannettavan tietokoneen langattoman latausjärjestelmän toiminta on lähellä ideaalista.

Valmiin prototyypin kanssa tietokoneen langattomaan latauksen kysyntään voi suhtautua analyttisemmin. Induktiivisesta tehonsiirrosta aiheutuvat käyttörajoitukset ja korkea hinta ovat kuitenkin niin merkittäviä haasteita, että laitteen kaupallistaminen ei liene ajankohtaista. Kohteisiin, jossa tarvittaisiin täysin suljettu tietokone, vaikkapa sukellus- tai ulkoilmakäyttöön, induktiivisella latauksella olisi kyllä kilpailuetua.

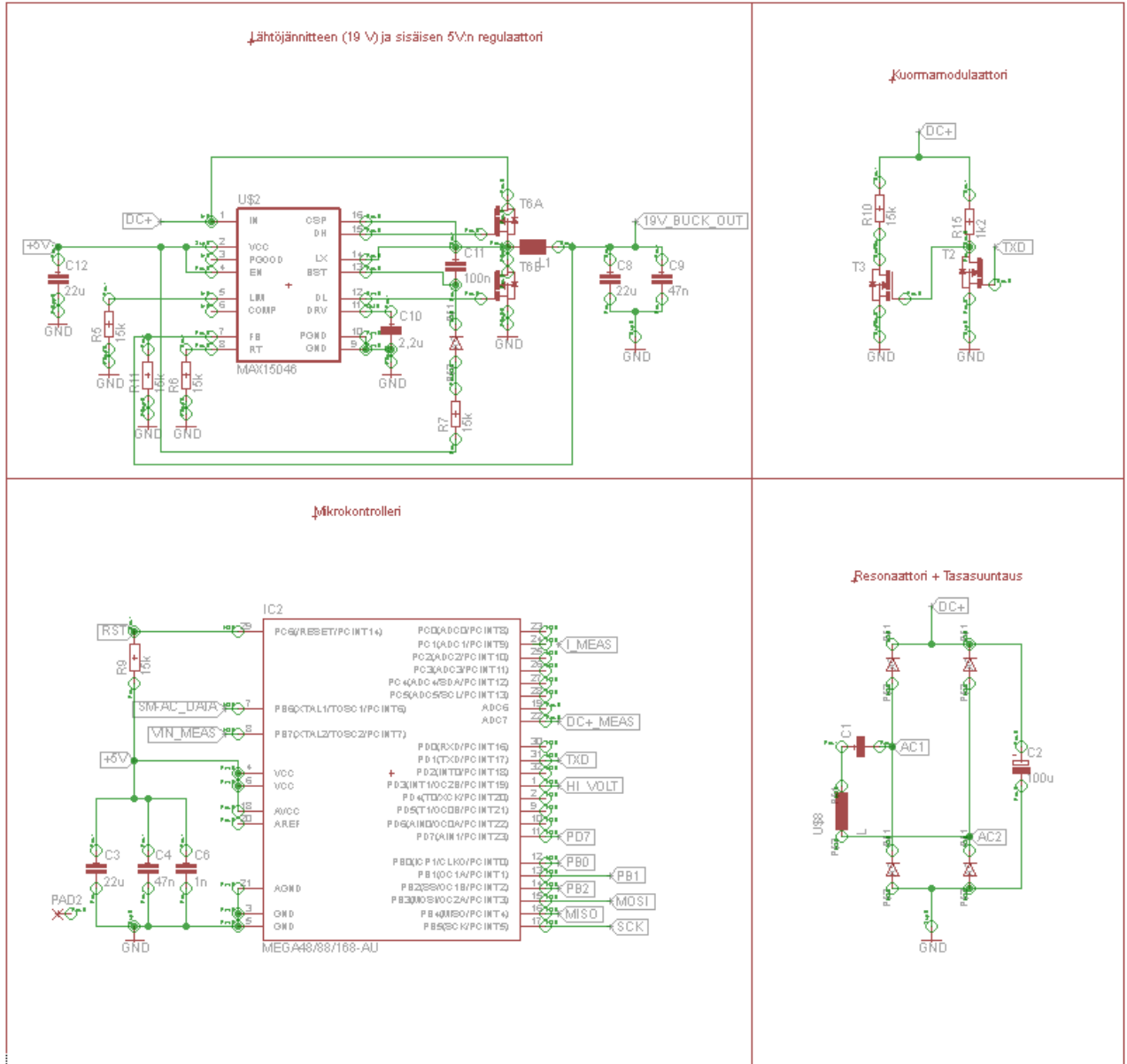
Puhtaasti teknisiä parannuksia laitteistoon voisivat olla reaktiivisen modulaation käyttö sekä metalliesineen tunnistusalgoritmi lähettimeen.

5 Lähteet

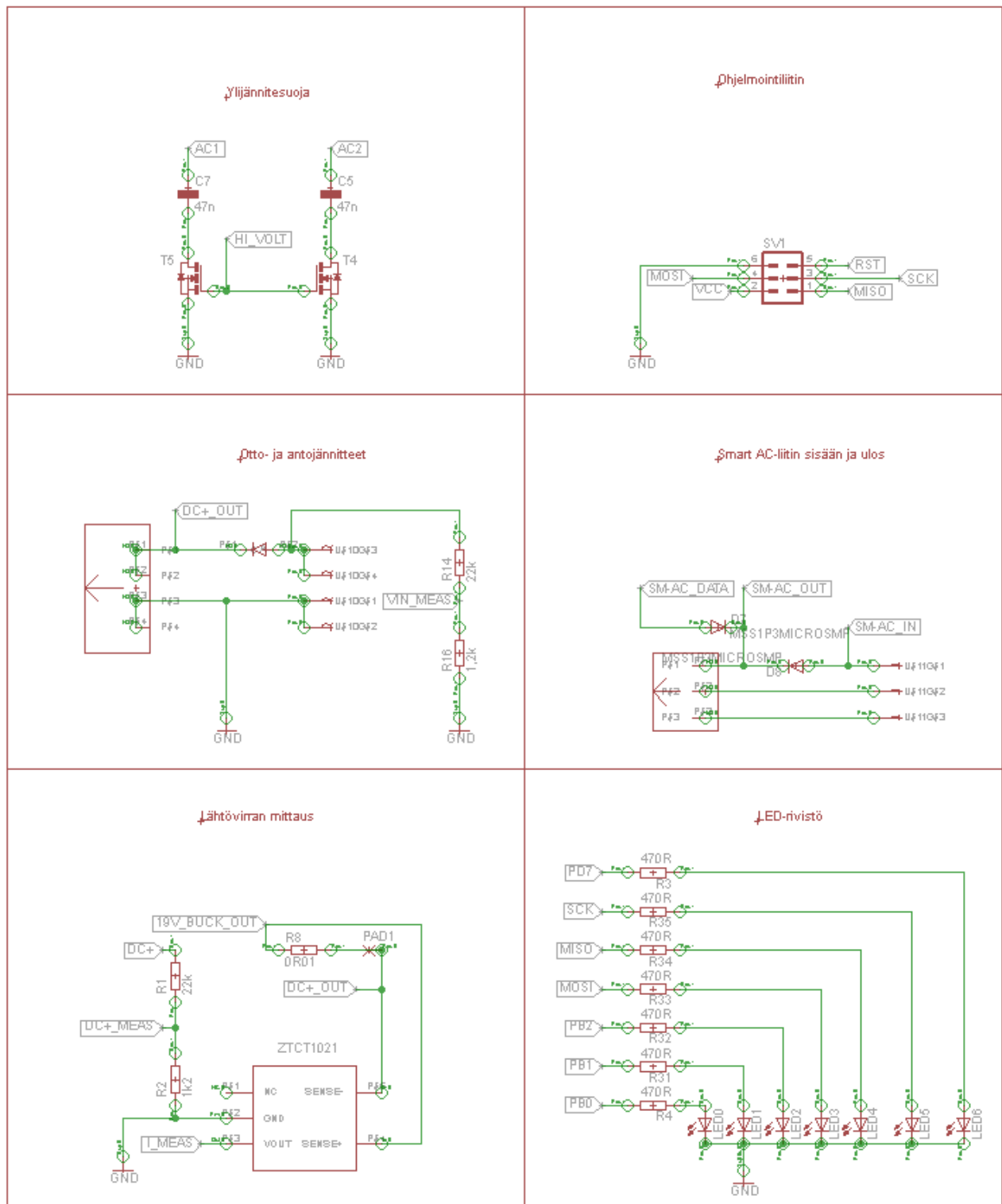
1. Fulton Innovation LCC, Wireless Power Timeline, viitattu 29.4.2011, <http://ecoupled.com/en/wireless-power>.
2. Fulton Innovation LCC, Wireless Power Patents, viitattu 29.4.2011, <http://ecoupled.com/en/wireless-power/patents>.
3. D. Woollons, "To beat or not to beat: the history and development of heart pacemakers", Engineering Science and Education Journal, vol. 4, n. 6, s. 259 – 268. joulukuu 1995.
4. G. Vandervoort, R. Puers, "Wireless energy transfer for stand-alone systems: a comparison between low and high power applicability", Sensors and Actuators, A 92, s. 305 – 3011, marraskuu 2001.
5. W. Brown, "History of power transmission by radio waves", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 32, n. 9, s. 1230 - 1242 , syyskuu 1984.
6. A. Räisänen, A. Lehto. Radiotekniikan perusteet, 12. painos, Otapaino, 2007. ISBN 978-951-672-353-5.
7. I. Lindell, A. Sihvola. Sähkömagneettinen kenttäteoria, 5. painos, Otatietao, 2004. ISBN 951-672-326-8.
8. X. Liu et al. "Optimal operation of contactless transformers with resonance in secondary circuits", Applied Power Electronics Conference and Exposition, s. 645 – 650, helmikuu 2008.
9. N. Mohan, T. Undeland, W. Robbins. Power electronics, converters, applications and design, 3. painos, John Wiley & Sons, 2003. ISBN 0-471-42908-2.
10. M. Berkhout, L. Dooper. "Class-D audio amplifiers in mobile applications", IEEE Transactions on Circuits and Systems. Vol. 57. n. 5, s. 992 – 1002, toukokuu 2010.
11. Elliot Sound Products, Power amplifier efficiency explained, viitattu 7.5.2011, <http://sound.westhost.com/efficiency.htm>.
12. S. Tretyakov, P. Vainikainen. Vuoden 2010 opetusmoniste Aalto-yliopiston kurssilta S-26.3392 Electromagnetic compability.
13. L. Tihanyi. Electromagnetic compability in power electronics, 1. painos, J. K. Eckert & Company, 1995. ISBN 0-7803-0416-0.
14. H. Nyberg, K. Jokela. Säteilijä ydinturvallisuus – Sähkömagneettiset kentät, Säteilijä turvakeskus, 2006. ISBN 951-712-501-1.
15. M. Huuskonen, M.-L. Lindbohm, J. Juutilainen. "Teratogenic and reproductive effects of low frequency magnetic fields", Mutation Research, vol. 410, n. 2, s. 167–183, 1998.

6 Liitteet

6.1 Tehon vastaanottimen kytkentäkaavio

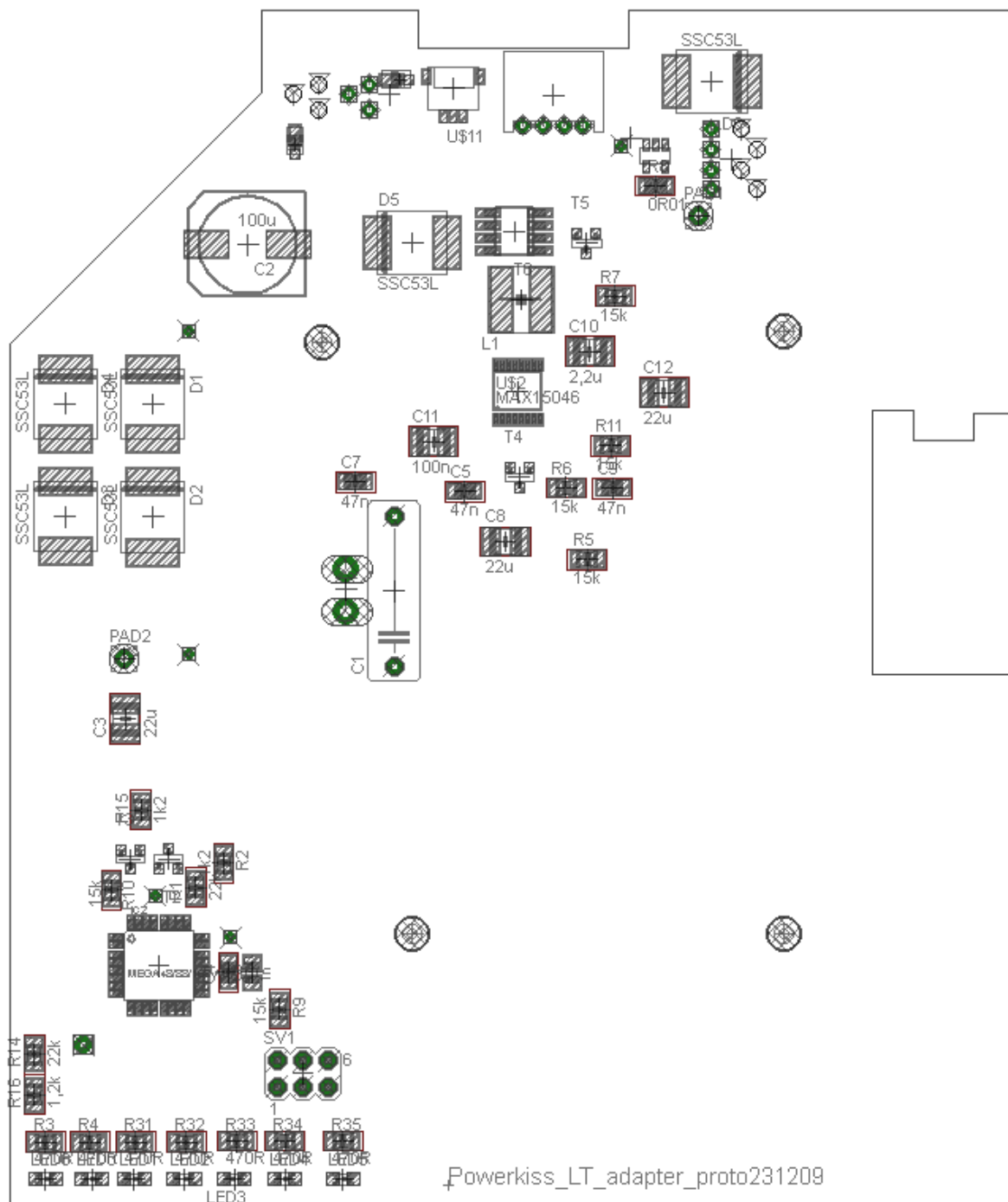


Kuva 35: Vastaanottimen kytkentäkaavio (1/2)



Kuva 36: Vastaanottimen kytkentäkaavio (2/2)

6.2 Tehon vastaanottimen osasijoittelukuva



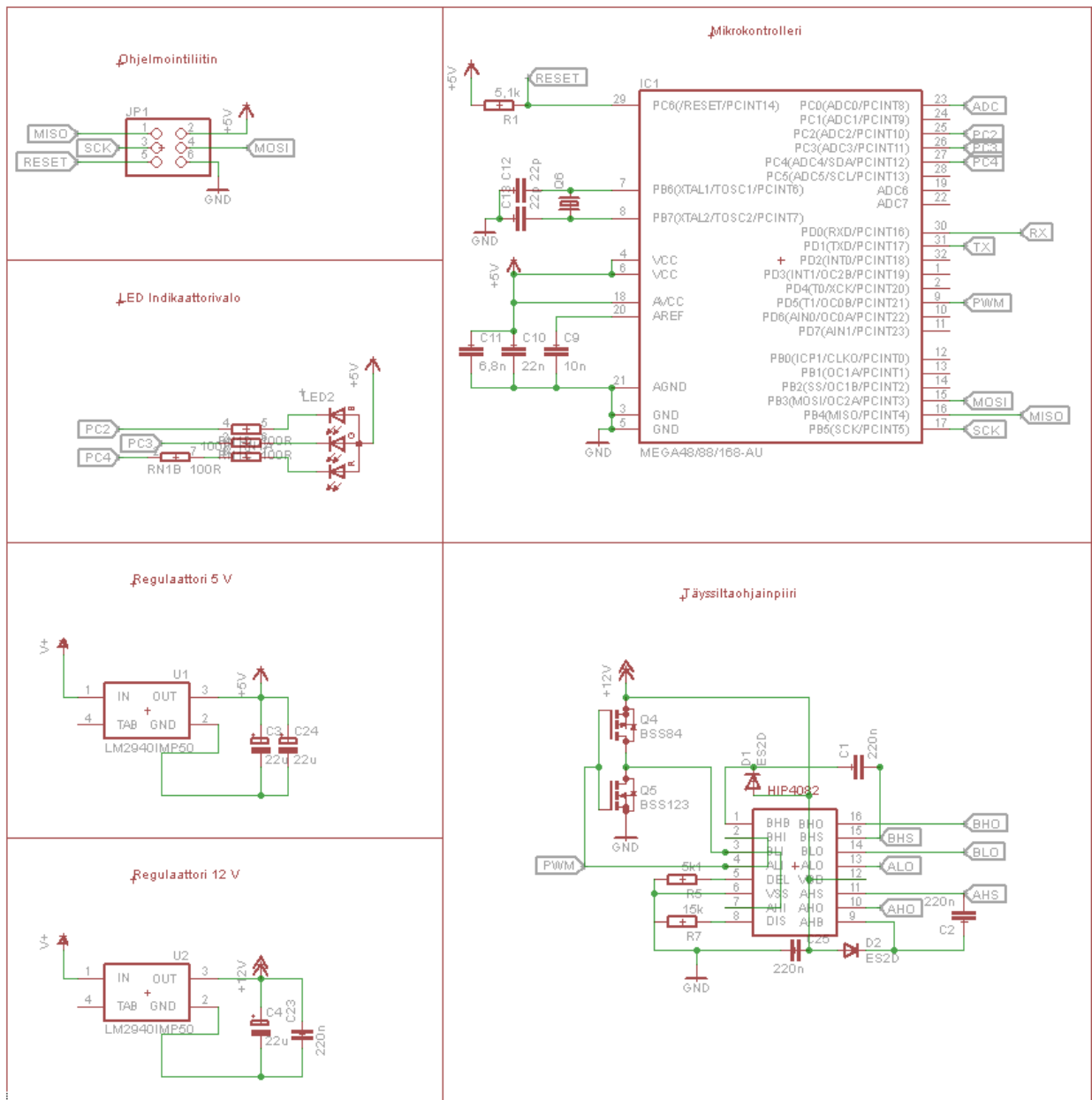
Kuva 37: Vastaanottimen osasijoittelu

6.3 Tehon vastaanottimen osaluettelo

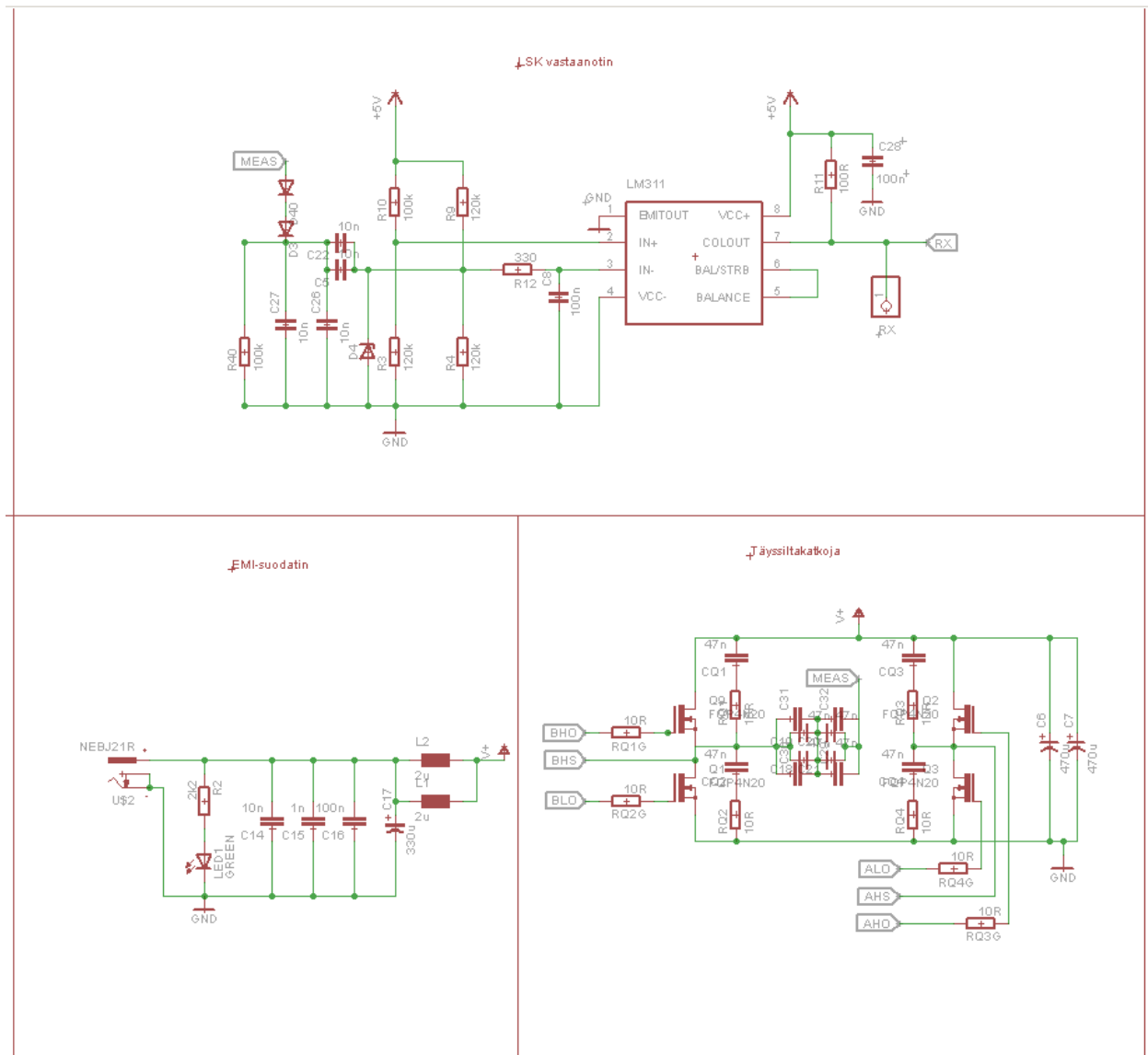
Taulukko 6.1: Vastaanottimen osaluettelo

Osa	Arvo	Kuvaus	Kotelo
C1	150u	CPOL-EU150CLZ-1014	150CLZ-1014
C2	100u	CPOL-EU150CLZ-1014	150CLZ-1014
C3	22u	C-EUC1210	C1210
C4	47n	C-EUC0805	C0805
C5	47n	C-EUC0805	C0805
C6	1n	C-EUC0805K	C0805K
C7	47n	C-EUC0805	C0805
C8	22u	C-EUC1210	C1210
C9	47n	C-EUC0805	C0805
C10	2,2u	C-EUC1210	C1210
C11	100n	C-EUC1210	C1210
C12	22u	C-EUC1210	C1210
D1	Diode	SSC53L	SSC53L
D2	Diode	SSC53L	SSC53L
D3	Diode	SSC53L	SSC53L
D4	Diode	SSC53L	SSC53L
D5	Diode	SSC53L	SSC53L
D6	Diode	SSC53L	SSC53L
D7	Diode	MSS1P3MICROSMP	MICROSMP
D8	Diode	MSS1P3MICROSMP	MICROSMP
IC2	MEGA48/88/168-AU	MEGA48/88/168-AU	TQFP32-08
L1	22u	Choke	WE-TPC_L/LH
LED0	RED	CHIPLED_0805	led
LED1	RED	CHIPLED_0805	led
LED2	RED	CHIPLED_0805	led
LED3	RED	CHIPLED_0805	led
LED4	RED	CHIPLED_0805	led
LED5	RED	CHIPLED_0805	led
LED6	RED	CHIPLED_0805	led
PAD1	2,54/1,1	2,54/1,1	wirepad
PAD2	2,54/1,1	2,54/1,1	wirepad
R1	22k	R-EU_M0805	M0805
R2	1k2	R-EU_M0805	M0805
R3	470R	R-EU_M0805	M0805
R4	470R	R-EU_M0805	M0805
R5	15k	R-EU_M0805	M0805
R6	15k	R-EU_M0805	M0805
R7	15k	R-EU_M0805	M0805
R8	0R01	R-EU_R0805	R0805
R9	15k	R-EU_M0805	M0805
R10	15k	R-EU_M0805	M0805
R11	15k	R-EU_M0805	M0805
R14	22k	R-EU_M0805	M0805
R15	1k2	R-EU_M0805	M0805
R16	1,2k	R-EU_M0805	M0805
R31	470R	R-EU_M0805	M0805
R32	470R	R-EU_M0805	M0805
R33	470R	R-EU_M0805	M0805
R34	470R	R-EU_M0805	M0805
R35	470R	R-EU_M0805	M0805
SV1	2*3	Programming connector	con-Istb
T2	NMOSSOT23	N-FET	SOT-23
T3	NMOSSOT23	N-FET	SOT-23
T4	NMOSSOT23	N-FET	SOT-23
T5	NMOSSOT23	N-FET	SOT-23
T6	NMOS2MSOP8SO8	N-FET	SOT-23
U\$1	ZTCT1021	ZTCT1021	ZTCT1021
U\$2	MAX15046	MAX15046	QSOP16
U\$8	56uH	RESONTOR_COIL	L
U\$10	S4B-4	S4B-4	S4B-4
U\$11	SM03B	SM03B	SM03B
U\$12	3-WIRE_CONTACT	3-WIRE_CONTACT	3-WIRE_CONTACT
U\$13	4-WIRE_CONTACT	4-WIRE_CONTACT	4-WIRE_CONTACT

6.4 Tehon lähettimen kytkentäkaavio

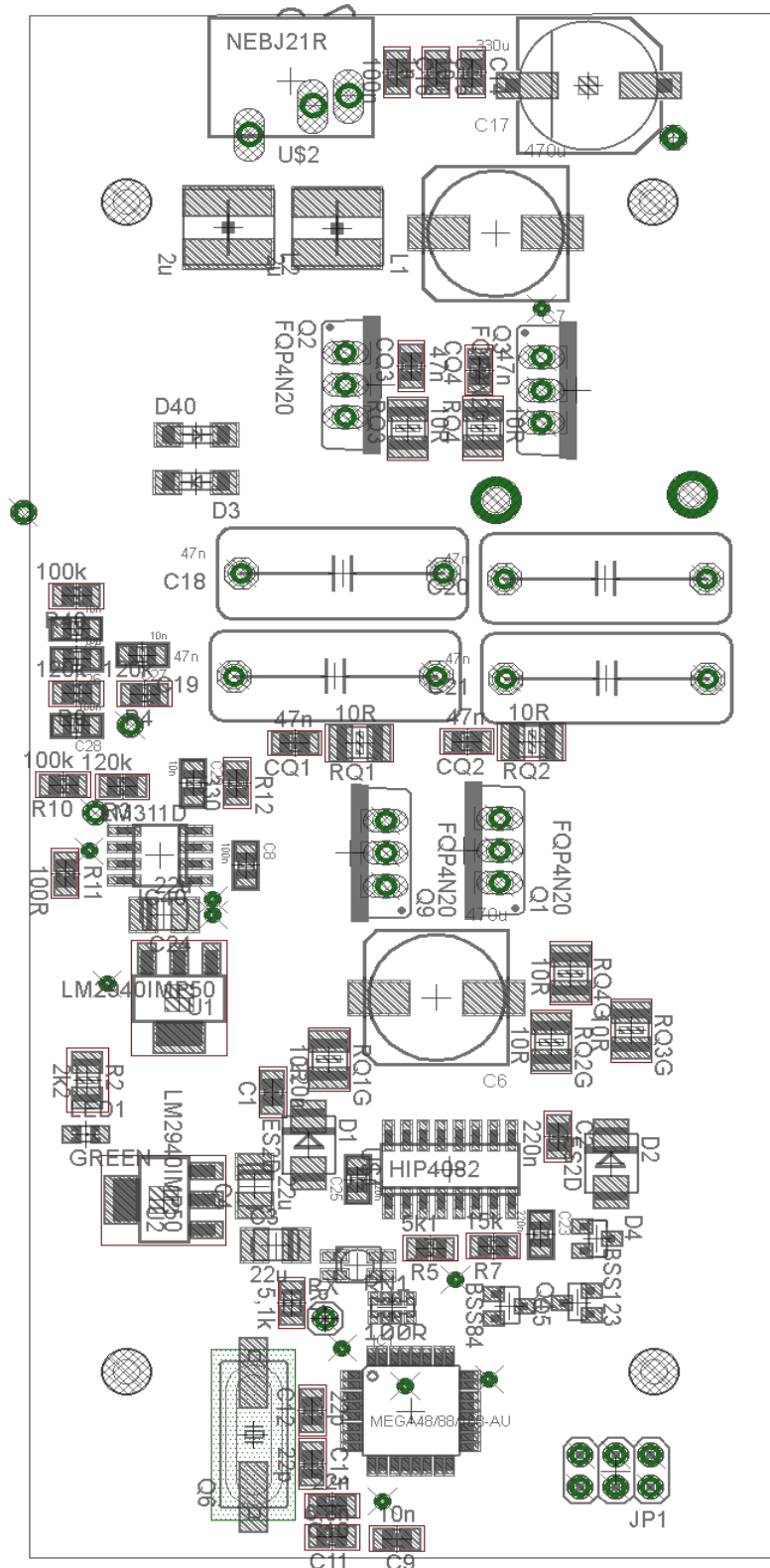


Kuva 38: Tehon lähettimen kytkentäkaavio (1/2)



Kuva 39: Tehon lähettimen kytkentäkaavio (2/2)

6.5 Tehon lähettimen osasijoittelukuva



Kuva 40: Tehon lähettimen osasijoittelu

6.6 Tehon lähettimen osaluettelo

Taulukko 6.2: Lähettimen osaluettelo

Osa	Anno	Kuvaus	Kotelo
C1	220n	C-EUC0805	C0805
C2	220n	C-EUC0805	C0805
C3	22u	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R
C4	22u	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R
C5	10n	C_0805	C0805
C6	470u	CP-153CLV-1014	153CLV-1014
C7	470u	CP-153CLV-1014	153CLV-1014
C8	100n	C_0805	C0805
C9	10n	C-EUC0805	C0805
C10	22n	C-EUC0805	C0805
C11	6,8n	C-EUC0805	C0805
C12	22p	C-EUC0805	C0805
C13	22p	C-EUC0805	C0805
C14	10n	C-EUC0805	C0805
C15	1n	C-EUC0805	C0805
C16	100n	C-EUC0805	C0805
C17	330u	CP_SV-G	CSV-G
C18	47n	CNP-C145-180X070	C145-180X070
C19	47n	CNP-C145-180X070	C145-180X070
C20	47n	CNP-C145-180X070	C145-180X070
C21	47n	CNP-C145-180X070	C145-180X070
C22	10n	C_0805	C0805
C23	220n	C_0805	C0805
C24	22u	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R
C25	220n	C_0805	C0805
C26	10n	C_0805	C0805
C27	10n	C_0805	C0805
C28	100n	C_0805	C0805
CQ1	47n	C-EUC0805	C0805
CQ2	47n	C-EUC0805	C0805
CQ3	47n	C-EUC0805	C0805
CQ4	47n	C-EUC0805	C0805
D1	ES2D	DIODE	SMB
D2	ES2D	DIODE	SMB
D3	D_	DIODE	SMA
D4	ZENER-DIODESOT23	ZENER	SOT23
D40	D_	DIODE	SMA
IC1	MEGA48/88/168-AU	MEGA48/88/168-AU	TQFP32-08
IC40	LM311D	LM311D	SOIC8
JP1	PINH-2X3	2X03	pinhead
L1	2u	WE-TPC_L/LH	WE-TPC_L/LH
L2	2u	WE-TPC_L/LH	WE-TPC_L/LH
LED1	GREEN	LEDCHIPLED_0805	CHIPLED_0805
LED2	67-23SDRSUGSUBC/TR8	67-23SDRSUGSUBC/TR8	PLCC4
Q1	FQP4N20	PMOSFET_NTO220BV	TO220BV
Q2	FQP4N20	PMOSFET_NTO220BV	TO220BV
Q3	FQP4N20	PMOSFET_NTO220BV	TO220BV
Q4	BSS84	BSS84	SOT23
Q5	BSS123	BSS123	SOT23
Q6	CRYSTALHC49UP	HC49UP	crystal
Q9	FQP4N20	PMOSFET_NTO220BV	TO220BV
R1	5,1k	R-EU_M0805	M0805
R2	2k2	R-EU_M1206	M1206
R3	120k	R-EU_R0805	R0805
R4	120k	R-EU_R0805	R0805
R5	5k1	R-EU_R0805	R0805
R7	15k	R-EU_R0805	R0805
R9	120k	R-EU_R0805	R0805
R10	100k	R-EU_R0805	R0805
R11	100R	R-EU_R0805	R0805
R12		330 R-EU_R0805	R0805
R40	100k	R-EU_R0805	R0805
RN1	100R	4R-NEXB38V	EXB38V
RQ1	10R	R-EU_R1210	R1210
RQ1G	10R	R-EU_R1210	R1210
RQ2	10R	R-EU_R1210	R1210
RQ2G	10R	R-EU_R1210	R1210
RQ3	10R	R-EU_R1210	R1210
RQ3G	10R	R-EU_R1210	R1210
RQ4	10R	R-EU_R1210	R1210
RQ4G	10R	R-EU_R1210	R1210
RX	PINH-1X1	1X01	pinhead
U\$1	HIP4082	HIP4082	SO16
U\$2	NEBJ21R	NEBJ21R	NEBJ21R
U1	5 v	LM2940IMP50	SOT-223
U2	12 v	LM2940IMP50	SOT-223

6.7 Lähetystaajuuden valintamittaukset

6.7.1 Mittaustulokset

dist	f	I_DC	V_DC	P_in	Vout	I_out	P_out	hyötysuhde	P/P0
no load	96,5 kHz	0,27	12	3,24					1
100 mm		0,28	12	3,36	2,3	0,02	0,05	0,01	1,04
75 mm	DC	0,45	12	5,4	3,95	0,4	1,58	0,29	1,67
50 mm	50,00%	0,79	12	9,48	7,5	0,75	5,63	0,59	2,93
25 mm		0,52	12	6,24	6,6	0,66	4,36	0,7	1,93
0 mm		0,13	12	1,56	2,8	0,23	0,64	0,41	0,48

dist	f	I_DC	V_DC	P_in	Vout	I_out	P_out	hyötysuhde	P/P0
no load	97,0 kHz	0,34	12	4,08					1
100 mm		0,4	12	4,8	2,8	0,18	0,5	0,11	1,18
75 mm	DC	0,59	12	7,08	4,9	0,49	2,4	0,34	1,74
50 mm	50,00%	0,93	12	11,16	8,3	0,83	6,89	0,62	2,74
25 mm		0,5	12	6	6,54	0,65	4,25	0,71	1,47
0 mm		0,13	12	1,56	2,9	0,23	0,67	0,43	0,38

dist	f	I_DC	V_DC	P_in	Vout	I_out	P_out	hyötysuhde	P/P0
no load	97,5 kHz	0,43	12	5,16					1
100 mm		0,55	12	6,6	3,3	0,32	1,06	0,16	1,28
75 mm	DC	0,74	12	8,88	5,71	0,57	3,25	0,37	1,72
50 mm	50,00%	1,06	12	12,72	8,9	0,89	7,92	0,62	2,47
25 mm		0,58	12	6,96	7	0,71	4,97	0,71	1,35
0 mm		0,13	12	1,56	2,8	0,29	0,81	0,52	0,3

dist	f	I_DC	V_DC	P_in	Vout	I_out	P_out	hyötysuhde	P/P0
no load	98,0 kHz	0,54	12	6,48					1
100 mm		0,63	12	7,56	3,8	0,38	1,44	0,19	1,17
75 mm	DC	0,84	12	10,08	6,05	0,61	3,69	0,37	1,56
50 mm	30,00%	1,1	12	13,2	9,09	0,91	8,27	0,63	2,04
25 mm		0,48	12	5,76	6,37	0,63	4,01	0,7	0,89
0 mm		0,12	12	1,44	2,9	0,23	0,67	0,46	0,22

dist	f	I_DC	V_DC	P_in	Vout	I_out	P_out	hyötysuhde	P/P0
no load	98,5 kHz	0,61	12	7,32					1
100 mm		0,6	12	7,2	3,4	0,34	1,16	0,16	0,98
75 mm	DC	0,58	12	6,96	4,8	0,48	2,3	0,33	0,95
50 mm	22,00%	0,4	12	4,8	5	0,5	2,5	0,52	0,66
25 mm		0,19	12	2,28	3,4	0,34	1,16	0,51	0,31
0 mm		0,1	12	1,2	2,8	0,19	0,53	0,44	0,16

dist	f	I_DC	V_DC	P_in	Vout	I_out	P_out	hyötysuhde	P/P0
no load	99,0 kHz	0,68	12	8,16					1
100 mm	DC	0,87	12	10,44	4,2	0,44	1,85	0,18	1,28
75 mm	22,00%	0,78	12	9,36	5,7	0,57	3,25	0,35	1,15
50 mm		0,42	12	5,04	5,1	0,51	2,6	0,52	0,62
25 mm		0,18	12	2,16	3,4	0,34	1,16	0,54	0,26
0 mm		0,1	12	1,2	2,7	0,17	0,46	0,38	0,15

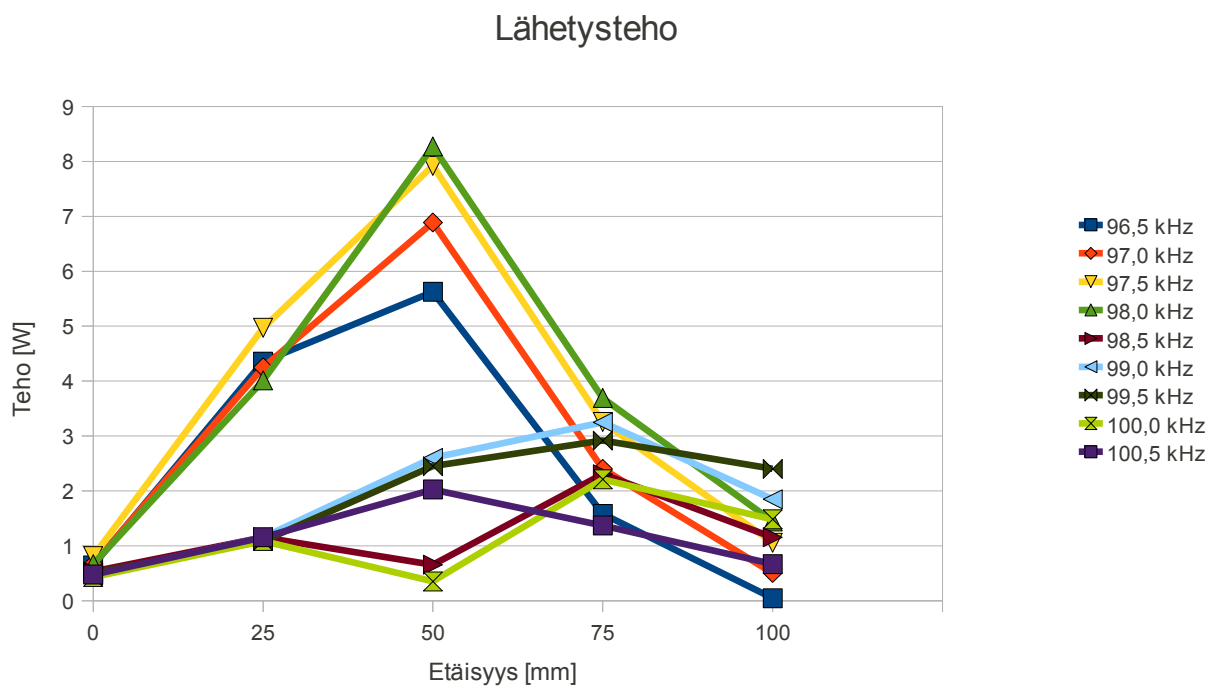
dist	f	I_DC	V_DC	P_in	Vout	I_out	P_out	hyötysuhde	P/P0
no load	99,5 kHz	1,6	12	19,2					1
100 mm		1,14	12	13,68	4,9	0,49	2,4	0,18	0,71
75 mm	DC	0,75	12	9	5,4	0,54	2,92	0,32	0,47
50 mm	0,22	0,41	12	4,92	5	0,49	2,45	0,5	0,26
25 mm		0,18	12	2,16	3,3	0,33	1,09	0,5	0,11
0 mm		0,1	12	1,2	3	0,17	0,51	0,43	0,06

dist	f	I_DC	V_DC	P_in	Vout	I_out	P_out	hyötysuhde	P/P0
no load	100,0 kHz	1,08	12	12,96					1
100 mm		0,81	12	9,72	3,8	0,39	1,48	0,15	0,75
75 mm	DC	0,63	12	7,56	4,7	0,47	2,21	0,29	0,58
50 mm	22,00%	0,38	12	4,56	4,8	0,48	2,3	0,51	0,35
25 mm		0,19	12	2,28	3,3	0,33	1,09	0,48	0,18
0 mm		0,1	12	1,2	2,7	0,16	0,43	0,36	0,09

dist	f	I_DC	V_DC	P_in	Vout	I_out	P_out	hyötysuhde	P/P0
no load	100,5 kHz	0,52	12	6,24					1
100 mm		0,46	12	5,52	2,9	0,23	0,67	0,12	0,88
75 mm	DC	0,4	12	4,8	3,7	0,37	1,37	0,29	0,77
50 mm	22,00%	0,33	12	3,96	4,5	0,45	2,03	0,51	0,63
25 mm		0,19	12	2,28	3,4	0,34	1,16	0,51	0,37
0 mm		0,1	12	1,2	2,8	0,17	0,48	0,4	0,19

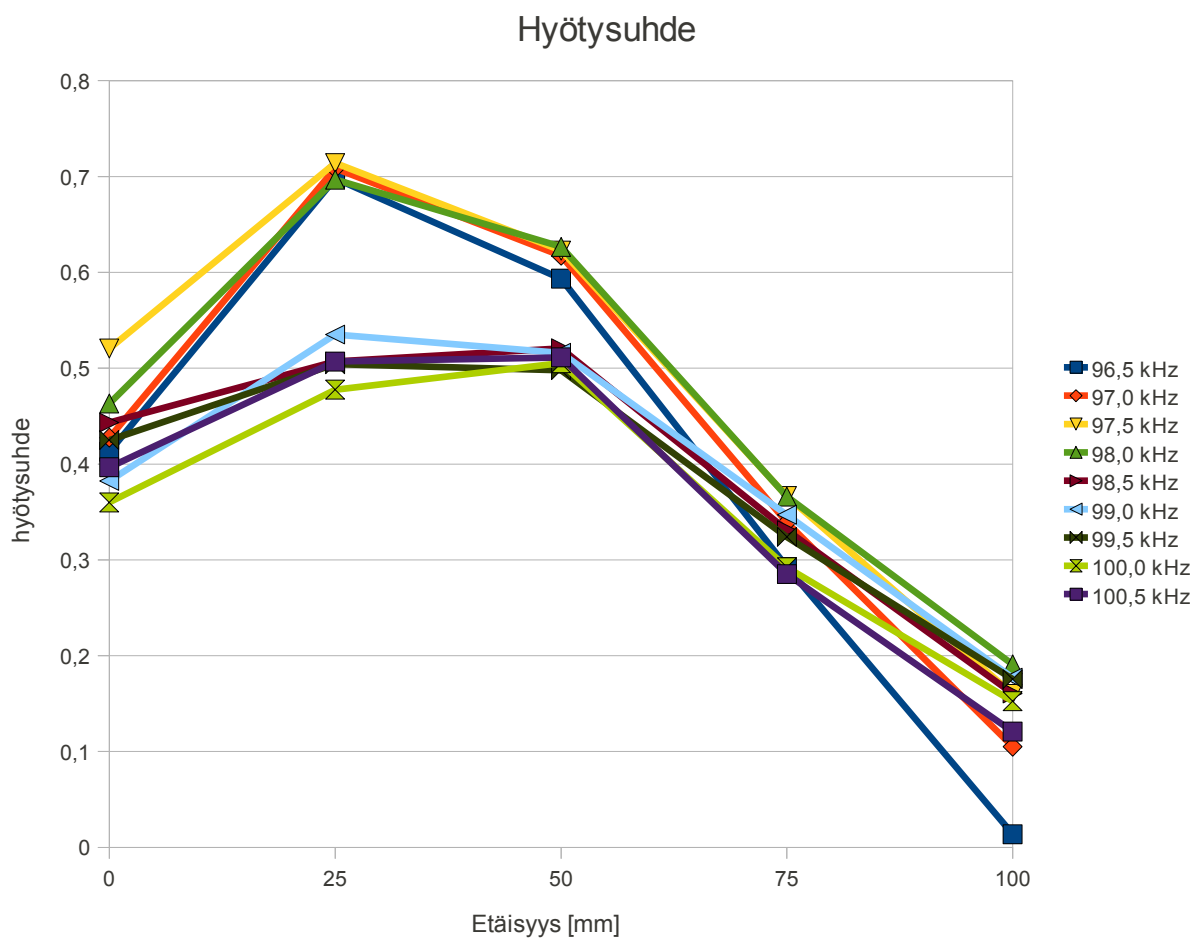
Taulukko 6.3: Lähetystaajuuden haarukointimittaus

6.7.2 Lähetystehton kuvaajat



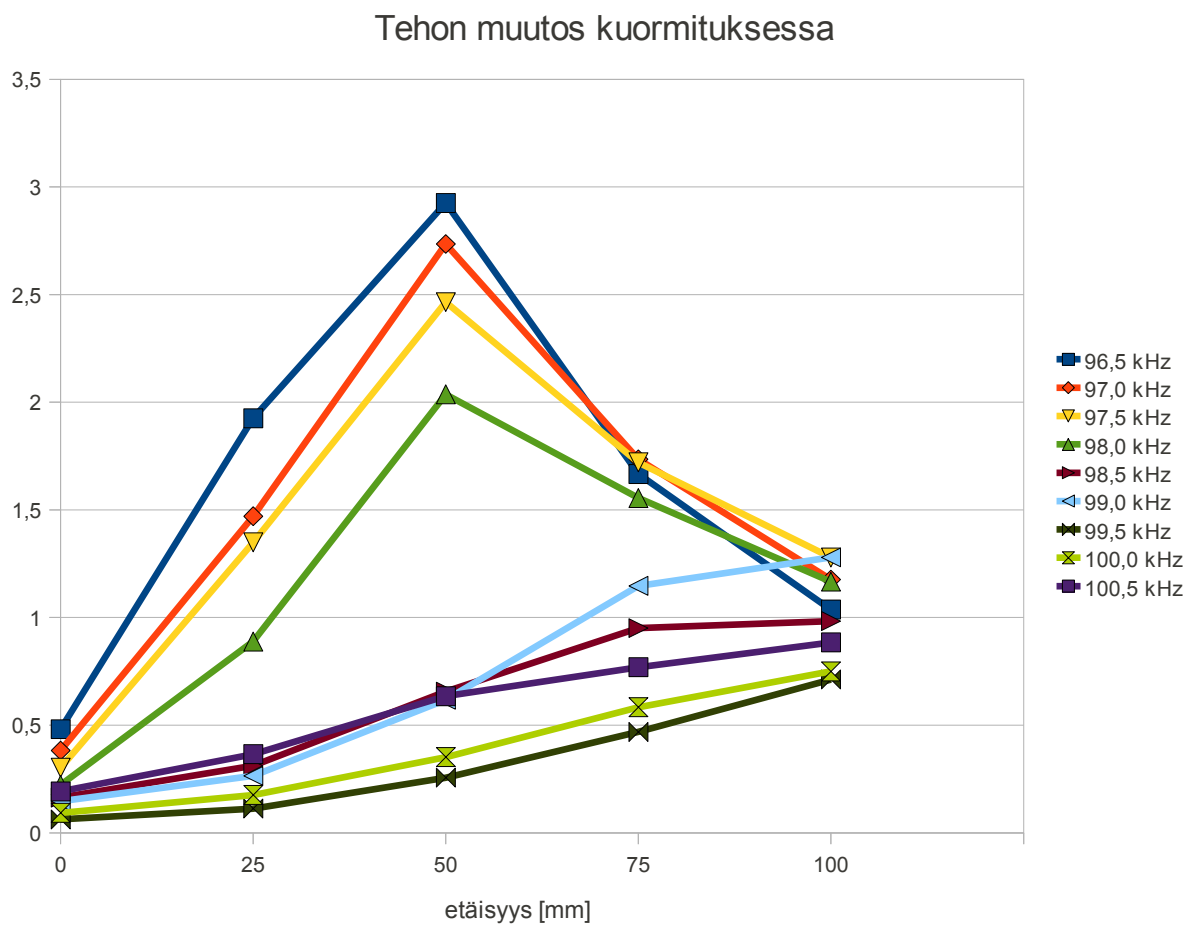
Kuva 41: Lähetystehto eri taajuuksilla etäisyyden funktiona

6.7.3 Hyötysuhteen kuvaajat



Kuva 42: Tehonsiirron hyötysuhde etäisyyden funktiona eri taajuuksilla

6.7.4 Lähetystehton muutoksen kuvaajat



Kuva 43: Lähetystehton muutos siirtoetäisyyden funktiona eri lähetystaajuuksilla