



Tommi Kiljander

INDUKTIOLATAUKSEN STANDARDI JA KOMMUNIKAATIO

INDUKTIOLATAUKSEN STANDARDI JA KOMMUNIKAATIO

Tommi Kiljander
Opinnäytetyö
Kevät 2011
Tietotekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Tietotekniikka, langaton tietoliikenne

Tekijä: Tommi Kiljander

Opinnäytetyön nimi: Induktiolatauksen standardi ja kommunikaatio

Työn ohjaaja: Heikki Vartiovaara, MobileSpot Oy

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2011

Sivumäärä: 36

Nopean mobiiliteknologian kehityksessä langattomuudella on iso rooli. Työn tilaajan toiveena ja tämän työn aiheena oli tutkia standardin mukaisen induktiolatauksen toimintaperiaatteita sekä mitata tiedonsiirron kulkua ladattavan laitteen ja induktiolaturin välillä. Lopuksi selvitettiin myös mahdollisuus oman datan kirjoittamiseen induktiolaturiin.

Langattoman latauksen QI-standardi määrittelee sähkömagneettiselle induktiolle tietyt ehdot, joten työn ensimmäisenä tavoitteena oli induktion toimintaperiaatteen selvittäminen. Toisena tavoitteena oli tutustua QI-standardiin, joka mahdollistaa induktiolla toimivan latausjärjestelmän rakentamisen.

Viimeisenä vaiheena kommunikaation mittauksissa selvisi induktion hyvä kyky toimia tiedonsiirron rajapintana. Bittivirtojen kulku tukiaseman ja vastaanottimen välillä näkyi mittauksissa selkeästi. Datan kirjoittamisen esteenä toimivat vain standardin ehdot, mutta käyttämällä hyväksi standardin varamaa tilaa ylimääräisille käskyille mahdollistetaan myös oman datan kirjoittaminen tukiasemalle.

Asiasanat: sähkömagneettinen induktio, induktiolaturi, QI-standardi, bqTESLA

SISÄLTÖ

| | |
|---|----|
| TIIVISTELMÄ | 3 |
| SISÄLTÖ | 4 |
| 1 JOHDANTO | 5 |
| 2 INDUKTIO | 6 |
| 2.1 Sähkömagneettinen induktio | 6 |
| 2.2 Induktiolataus | 7 |
| 2.3 Hakkurit | 8 |
| 2.3.1 Half Bridge -muunnin | 8 |
| 2.3.2 Full Bridge -muunnin | 9 |
| 2.4 Energy Harvesting | 10 |
| 3 STANDARDIT | 12 |
| 3.1 Wireless Power Consortium | 12 |
| 3.2 Qi-standardi | 12 |
| 3.3 Lähetin | 14 |
| 3.3.1 A1-suunnitelma | 15 |
| 3.3.2 A2-suunnitelma | 17 |
| 3.4 Vastaanotin | 18 |
| 3.5 Kommunikointi | 20 |
| 3.6 Esimerkkitapauksia | 22 |
| 3.6.1 Esimerkkivastaanotin | 22 |
| 3.6.2 Vieras esine rajapinnalla | 24 |
| 4 BQTESLA | 25 |
| 4.1 Lähettimen kehitysalusta | 25 |
| 4.2 Vastaanottimen kehitysalusta | 26 |
| 5 KOMMUNIKAATION TUTKIMINEN | 27 |
| 5.1 Kommunikaatiosignaalin kulku lähettimessä | 29 |
| 5.2 Mittaukset | 29 |
| 5.3 Datan kirjoittaminen lähettimelle | 32 |
| 6 POHDINTA | 34 |
| LÄHTEET | 35 |

1 JOHDANTO

Mobiiliteknologia on tällä hetkellä yksi suurimpia teknologian aloja ja markkinoille tulee jatkuvasti uusia laitteita ja sovelluksia. Kaikki mobiililaitteet vaativat toimiakseen akun, jonka lataaminen on toistaiseksi vaatinut vielä johdollisen laturin. Erilaiset laturit kuormittavat turhaan luontoa ja laturiliitännät mobiililaitteissa huonontavat luotettavuutta. Langattoman lataamisen vaihtoehtoja tutkitaankin monessa yrityksessä ja joitain sovelluksia on jo kehitetty.

Langatonta energiaa on mahdollista saada useista lähteistä, kuten epästandardin mukaisista induktiolatureista ja tässä työssäkin lyhyesti esiteltävästä Energy Harvestingista. Markkinoilla olevat tuotteet eivät tue mitään standardia, joten työn aiheena onkin tutkia Qi-standardin mukaista ratkaisua. Standardin lisäksi työssä esitellään Texas Instrumentsin valmistama bqTESLA-kehitysalusta sekä kehitysalustan avulla suoritettut kommunikaatiomittaukset. Työ tehdään MobileSpot Oy:lle, jonka toiveesta työssä tutkitaan myös mahdollisuus kirjoittaa omaa dataa latausjärjestelmään.

2 INDUKTIO

2.1 Sähkömagneettinen induktio

Sähkömagneettista induktiota käytetään sähkön tuotannossa ja sitä ilmenee myös päivittäin käytettävissä laitteissa, kuten sähköhammasharjan laturi ja induktioliesi. Sähköä indusoituu johtimeen, kun sen ohitse kulkee jatkuvasti muuttuva magneettikenttä. Vastaavasti johtimessa kulkeva sähkövirta alkaa muodostaa ympärilleen magneettikenttää. Tarvittava magneettikenttä saadaan aikaan tavallisella magneetilla tai käämin avulla. Käämit ovat usealle silmukalle kiedottua johdinta, ja toimiakseen käämi tarvitsee jatkuvasti muuttuvan magneettivuon, joka saadaan aikaan liikuttamalla joko käämiä tai magneettia. Käämissä olevien johdinsilmukoiden läpi kulkeva magneettivuo liikuttaa käämin johtimien elektroneja ja muodostaa näin sähkövirtaa. Käämissä kulkeva virta muodostaa magneettikentän, joka pyrkii vastustamaan virran muutosta. Tätä ilmiötä kutsutaan induktanssiksi (H) ja se ilmoitetaan aina yhtenä käämin arvona. Induktion löysi Michael Faraday, joka nimesi ilmiön Faradayn induktiolaiksi (kaava 1). (Inkinen – Manninen – Tuohi 2002, 165–168.)

$$E = - \frac{d\Phi}{dt} \qquad \text{KAAVA 1}$$

E = lähdejännite

$$\frac{d\Phi}{dt} = \text{magneettivuon muutosnopeus}$$

Käämi muodostuu useasta johdinsilmukasta, joten lähdejännite riippuu silmukoiden lukumäärästä (kaava 2) (Inkinen ym. 2002, 167).

$$E = -N \frac{d\Phi}{dt} \qquad \text{KAAVA 2}$$

N = kierrosten lukumäärä

Jonkin pinnan läpi kulkevaa magneettikenttää kutsutaan magneettivuoksi. Magneettivuon suuruus riippuu pinnan pinta-alasta sekä pinnan ja magneettivuon välisestä kulmasta. (Inkinen ym. 2002, 165.)

$$\Phi = BA \cos \theta$$

KAAVA 3

Φ = magneettivuo

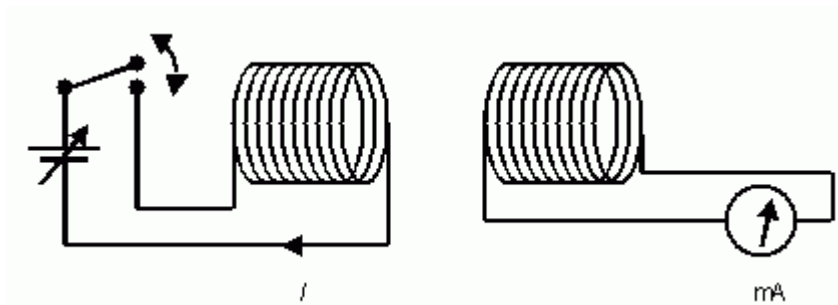
A = pinnan pinta-ala

B = magneettivuon tiheys

θ = pinnan ja magneettivuon välinen kulma

2.2 Induktiolataus

Sähkömagneettinen induktio mahdollistaa sen, että energiaa voidaan siirtää lyhyitä matkoja ilmassa. Tätä ominaisuutta on hyödynnetty joissain laitteissa, mutta nyt vasta tekniikkaa on alettu kehittää mobiililaitteisiin. Elektroniikassa käämejä on yleensä kaksi, ensiö- ja toisiokäämi (kuva 1). Induktiolataus perustuu näiden käämien väliseen sähkömagneettiseen induktioon, missä ensiökäämi sijaitsee laturissa ja toisiokäämi ladattavassa laitteessa. Toisiokäämin tarvitsema magneettikenttä muodostetaan ensiökäämillä. Ensiökäämiin johdetaan muuttuvaa sähkövirtaa eli vaihtovirtaa, jolloin sen ympärille muodostuu magneettikenttä, joka ylittää toisiokäämille. Muuttuva magneettikenttä kulkee toisiokäämin johtimien läpi ja johtimeen alkaa indusoitua sähkövirtaa. Tässä työssä toisiokäämiin indusoitunutta virtaa käytetään akkujen ja ladattavien paristojen lataukseen. (16. Induktio. 2010.)



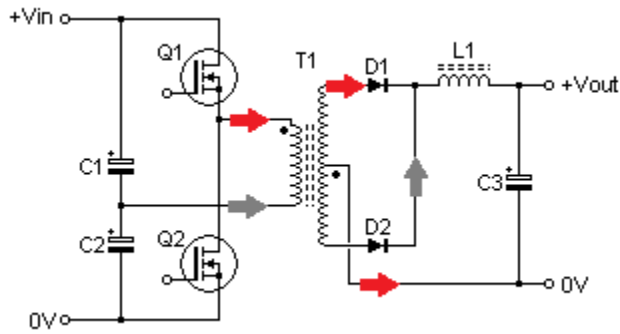
KUVA 1. Ensiökäämin virtaa muutetaan jolloin toisiokäämiin indusoituu sähkövirtaa. (16. Induktio. 2010.)

2.3 Hakkurit

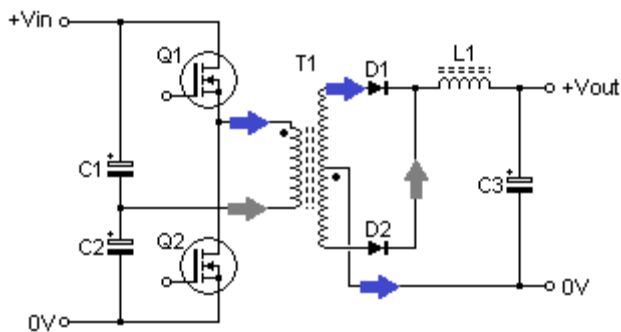
Hakkurit ovat eräänlaisia muuntajia, joita käytetään useasti sähkömagneettisen induktion yhteydessä. Tavallisiin muuntajiin verrattuna hakkureilla saavutetaan parempi hyötysuhde, mutta ne ovat hankalampia toteuttaa. Käämit tarvitsevat toimiakseen vaihtovirtaa, mutta akuilla ja pattereilla toimivat mobiililaitteet käyttävät tasavirtaa usein, joten tarvitaan hakkureiden kykyä muuttaa tasavirtaa vaihtovirraksi ja päinvastoin. Perustoimintaperiaatteena on päästää hakkurin läpi vuoroin positiivinen ja negatiivinen jännite. Näin saadaan käämi toimimaan halutulla vaihtovirran taajuudella. Yleisimmät hakkureiden toteutustavat eli hakkuritopologiat ovat Flyback-, Single Transistor Forward-, Two Transistor Forward-, Half Bridge- ja Full Bridge -muunnin. Tässä työssä tarvitaan vain Half Bridge- ja Full Bridge -hakkuritopologioita. (Varviala 2009, 2.)

2.3.1 Half Bridge -muunnin

Half Bridge -muunnin (kuva 2) sisältää kaksi kondensaattoria (C1, C2) ja kaksi transistoria (Q1, Q2) rinnankytkettynä sekä käämin. Kondensaattorien välille muodostuu puolet syötettävästä jännitteestä. Käämille syötetään vaihdellen puolet positiivisesta ja puolet negatiivisesta jännitteestä, jolloin se alkaa jännitevaihtelun takia säteillä magneettikenttää kohti toisiokäämiä. (Varviala 2009, 6.)



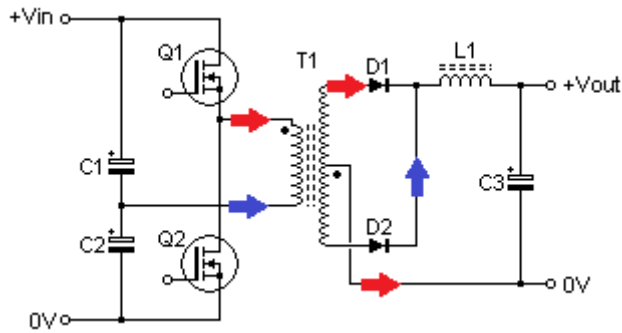
KUVA 2. Virran kulku Half Bridge -muuntimessa, kun transistori Q1 on auki. (Hill 1997.)



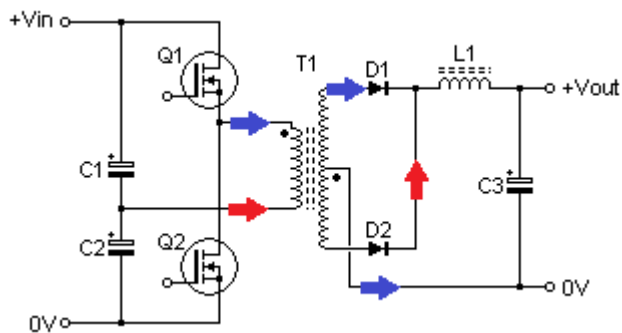
KUVA 3. Virran kulku Half Bridge -muuntimessa, kun transistori Q2 on auki. (Hill 1997.)

2.3.2 Full Bridge -muunnin

Full Bridge -muunnin toimii lähes samalla periaatteella kuin Half Bridge -muunnin. Muuntimessa olevat neljä transistoria päästävät vuorotellen jännitettä läpi tietyllä taajuudella. Kuvassa 4 olevat transistorit $Q1$ ja $Q4$ avautuvat yhtä aikaa, jolloin ensiökäämille kulkeutuu virtaa. Sen jälkeen transistorit $Q2$ ja $Q3$ avautuvat ja muut sulkeutuvat (kuva 5). Näin ensiökäämille saadaan halutulla taajuudella vaihtovirtaa. (Varviala 2009, 7.)



KUVA 4. Virran kulku Full Bridge -muuntimessa, kun transistorit Q1 ja Q4 ovat auki. (Hill 1997.)



KUVA 5. Virran kulku Full Bridge -muuntimessa, kun transistorit Q2 ja Q3 ovat auki. (Hill 1997.)

2.4 Energy Harvesting

Energy Harvesting on nimensä mukaisesti energiasadonkorjuuta, jossa hyödynnetään luonnon omaa energiaa sekä ihmisten kehittämien laitteiden hukkaenergiaa. Energiaa on helposti kerättävissä esimerkiksi auringonvalosta, lämpötilaeroista ja liikkeestä. Ympäriämme on nykyään myös paljon radioaaltoja, joiden ensisijainen tarkoitus on siirtää tietoa langattomasti. Näitä radioaaltoja on mahdollista kaapata ja hyödyntää tiedonsiirron sijasta niistä lähtevä energia. Ihminen itsessään tuottaa myös paljon energiaa liikkeessään. Tekniikka on suunnattu erityisesti pienille elektronisille laitteille, jotka käyttävät virtalähteenä akkua tai ladattavaa paristoa. Kehitteillä onkin laitteita, jotka saavat virtaa ihmisen ruumiinlämmöstä ja kenkien tärinästä. Tätä voisi hyödyntää erilaisissa ur-

heilusovelluksissa. Energy Harvesting hyödyntää paremmin luontoa sekä jo olemassa olevia teknisiä laitteita. (Energy Harvesting Forum 2009.)

Energy Harvesting -tekniikkaa ei saa kuitenkaan sekoittaa opinnäytetyöni aiheena olevaan induktiolataukseen, vaikka paljon yhtäläisyyksiä löytyykin. Molemmat tekniikat keräävät energiaa langattomasti, mutta induktiolaturi on oma energialähteensä eikä hyödynnä ympäristössä olevia lähteitä. Vastaavasti induktiolaturi on hyötysuhteeltaan tehokkaampi tapa ladata mobiililaitte. Langallisten latureiden jäädessä pois induktiolataus mahdollistaa kestävämmät laitteet ja vähentää erilaisten laturien valmistusta. Induktiota käytetään kuitenkin monissa Energy Harvesting -sovelluksissa. (Taipale 2010.)

3 STANDARDIT

Langaton lataus on niin uusi asia, että suurin ongelma on ollut standardien puute. Markkinoilla on erilaisia standardoimattomia latausalustoja, mutta ne vaativat mobiililaitteeseen valmistajan valmistaman adapterin. Tähän ongelmaan puuttui Wireless Power Consortium (WPC), joka julkaisi heinäkuussa 2010 Qi-standardin. (Ojanperä 2011.)

3.1 Wireless Power Consortium

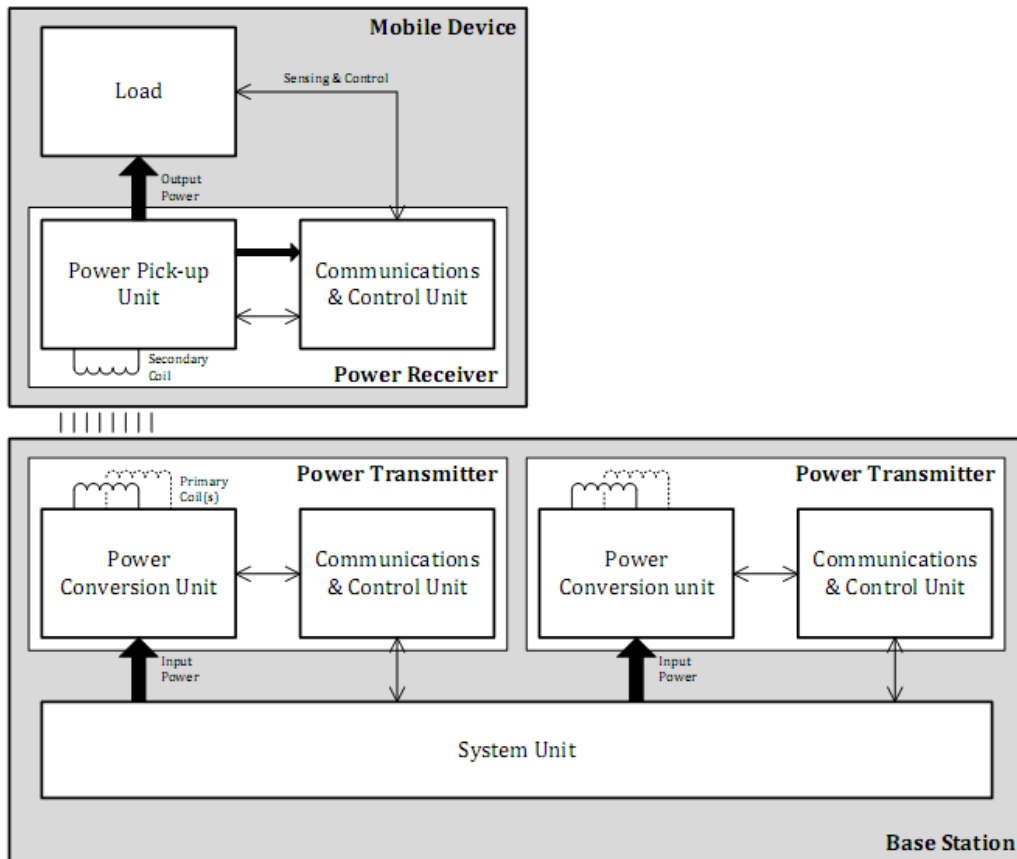
Wireless Power Consortium on usean itsenäisen yrityksen liitto. Liitto koostuu monenlaisista tekniikan alan yrityksistä ja liittyminen on täysin vapaata kaikille. Texas Instrumentsin lisäksi liittyneistä voisi mainita mm. Motorolan, Nokian, Panasonicin ja Samsungin. WPC:n tarkoituksena on suunnitella teknologia standardien mukaisten langattomien virtalähteiden kehittämiseen ja näitä tuloksia liittouman jäsenet voivat käyttää langattomien ratkaisujen kehityksessä. WPC julkaisikin heinäkuussa 2010 langattomaan lataukseen soveltuvan Qi-standardin. Qi-logolla varustetun mobiililaitteen voi ladata standardin mukaisella latausalustalla. (The "Last Wire" In Our Wireless World.)

3.2 Qi-standardi

Nykyisiä mobiililaitteita on mahdollista ladata induktiolla toimivalla langattomalla latausalustalla vain alustan valmistajan adapterin avulla. Qi-standardin avulla on mahdollista kehittää mobiililaitteita, jonka sisään tämä lataus ominaisuus olisi rakennettu, ja näitä laitteita olisi mahdollista ladata yhdellä laturilla valmistajasta riippumatta. Näin päästäisiin eroon adaptereista ja johdollisista latureista. Tässä työssä käyttämäni bqTESLA-kehitysalusta käyttää WPC-organisaation luomaa Qi-standardia. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

Standardi koostuu kolmesta osasta. Ensimmäisessä osassa on määritelty laturin eli tukiaseman ja ladattavan laitteen eli mobiililaitteen mekaniikka ja elektroniset arvot. Siinä on selitetty myös, miten tukiaseman ja mobiililaitteen kommunikointi hoidetaan. Lopuksi on vielä annettu joitain esimerkkejä erilaisista toteutuksista ja häiriötilanteesta. Alla on selvitettynä minun työhöni olennaisin standardin ensimmäisestä osasta. Kaksi muuta osaa standardista keskittyvät tarkemmin laitteiston suorituskykyyn ja sisältävät joitain testituloksia, mutta nämä osat eivät ole julkisia ja ovat saatavilla vain jäsenille, joten tarkempaa tietoa ei ole. Standardista löytyvät vaatimukset ovat ehdottomat, ellei toisin mainita. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

Qi-standardissa mainitaan lähetin ja vastaanotin sekä tukiasema ja mobiililaitte (kuva 6). Lähetin ja vastaanotin ovat osia, joissa käämit sijaitsevat. Tukiasema ja mobiililaitte ovat isoja kokonaisuuksia, joissa eri yksiköt sijaitsevat. Tarkempi kuvaus tässä työssä käytettävistä yksiköistä käydään läpi myöhemmin. Standardissa esitellään kuitenkin kaksi hieman toisista poikkeavaa tukiasemaa ja molemmille on vielä kaksi eri toteutustapaa. Tukiasemat eroavat toisistaan käämien määrällä ja vastaanottimen paikannuksen toteutuksessa. Yksinkertaisemmassa versiossa on yksi ensiökäämi ja mobiililaitteita voi ladata vain yksi kerrallaan. Toisessa versiossa käytetään useampaa ensiökäämiä, jolloin vastaanottimen sijainti pystytään paikantamaan paremmin ja voidaan ladata useaa laitetta yhtä aikaa. Mobiililaitteen vastaanottimen suunnitteluun on vain yksi vaihtoehto ja sen toteutus on hieman vapaampaa. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)



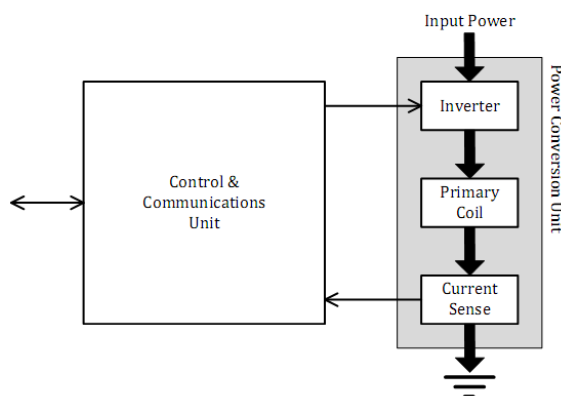
KUVA 6. Lohkokaavio tukiaseman ja mobiililaitteen yksiköistä. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

3.3 Lähetin

Tässä työssä selvitetään yhden ensiökäämin sisältävän tukiaseman rakenne, josta on kaksi eri toteutustapaa. Tavat A1 ja A2 eroavat toisistaan mobiililaitteen paikannuksen toteutuksessa. Tavot A1:ssä paikannus on ns. opastava paikannus. Paikannus toimii yksinkertaisesti niin, että lähettimen ja vastaanottimen käämin keskellä on magneettinen ydin, jonka avulla käämit osataan asettaa vastakkain. Vastaavasti tavassa A2 mobiililaitte voidaan asettaa mielivaltaiseen kohtaan latausalustalla ja tukiasema paikantaa vastaanottimen. Paikannuksen jälkeen ensiökäämi liikkuu tukiaseman sisällä toisiokäämin alle. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

3.3.1 A1-suunnitelma

A1-malli sisältää tehoyksikön sekä kontrollointi- ja kommunikointiyksikön (kuva 7). Digitaalinen kontrolli- ja kommunikointiyksikkö ottaa vastaan mobiililaitteelta tulevat käskyt. Käskyt käyvät läpi protokollan ja käskyjen avulla kontrolli- ja kommunikointiyksikkö osaa ohjata tehoyksikköä. Tehoyksikkö sisältää muuntimen eli hakkurin, ensiökäämin ja virtamittarin. Hakkuri muuntaa ulkoa päin tulevan tasasähkön (DC) vaihtosähköksi (AC), joka ohjaa ensiökäämiä. Lopuksi virtamittari seuraa ensiökäämin virtaa ja antaa tarvittavia käskyjä kontrollointiyksikölle. Näin lähetin pystyy jatkuvasti kontrolloimaan, kuinka paljon virtaa tarvitaan, ja osaa laskea tarpeellisen latausvirran. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)



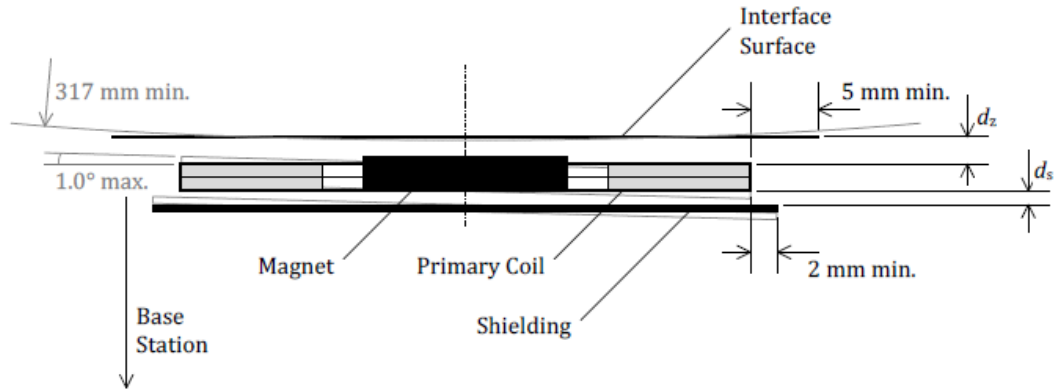
KUVA 7. Lohkokaavio mallin-A1 lähettimestä (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

Mekaaniset ominaisuudet on standardissa tarkoin määritelty ja erilaisista johtimista käytetään yleisesti AWG-arvoa, joka kertoo johtimien ominaisuuksia. Ensiökäämissä käytetään joko 20 AWG- tai 40 AWG -johtimia, joiden halkaisijat ovat 0,08 mm tai 0,008 mm. Ensiökäämin tulee koostua kahdesta samanlaisesta kerroksesta ja sen täytyy olla ympyrän muotoinen. Tarkat mitat käämistä ovat taulukossa 1. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

TAULUKKO 1. Ensiökäämin mitat suunnitelmassa A1. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

| Parametri | Arvot |
|----------------------------|---------|
| Ulkokehän halkaisija | 43 mm |
| Sisäkehän halkaisija | 20,5 mm |
| Paksuus | 2,1 mm |
| Johtimien kierrosten määrä | 10 |
| Kerrosten lukumäärä | 2 |

Ensiökäämin synnyttämälle magneettikentälle täytyy kehittää suoja (kuva 8), jotta se ei häiritsisi tukiaseman muita osia. Tehohäviön minimoimiseksi tukiaseman ja mobiililaitteen välinen rajapinta on kuitenkin jätettävä mahdollisimman ohueksi. Käämin alapuolelle rakennetaan matalamagneettinen suojamateriaali suojaamaan tukiaseman muita osia magneettikentältä. Materiaalina käytetään ferriittiä. Käämin keskellä käytetään magneettia, jonka avulla vastaanotin pystytään asettamaan oikealle kohdalle. Magneetin halkaisija on 15,5 mm ja magneettivuo saa olla enintään 100 mT tukiaseman ulkopuolella. Hakkuritopologiaa käytetään Half Bridge -muunninta. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)



$$d_z = 1,75 \text{ mm} - 2,5 \text{ mm}$$

$$d_s = 1 \text{ mm}$$

KUVA 8. Ensiökäämin suojaus. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

3.3.2 A2-suunnitelma

A2-suunnitelmassa tukiasema toimii täysin samalla periaatteella kuin A1-suunnitelman tukiasema. Erona on kuitenkin paikannusyksikkö, josta saatu vastaanottimen paikkatieto ilmoitetaan ensiökäämiä liikuttavalle yksikölle. Paikannuksen toteutusta ei määritellä standardissa, mutta sen lopussa on esimerkki yhdestä toteutustavasta. Mekaanisina eroina ovat käytettävät materiaalit ja ensiökäämissä sekä suojauksessa on pieniä mekaanisia eroja (taulukko 2). Paikannusjärjestelmän vuoksi magneettia ei myöskään tarvita. Suojamateriaalina toimii matalamagneettinen metalli. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

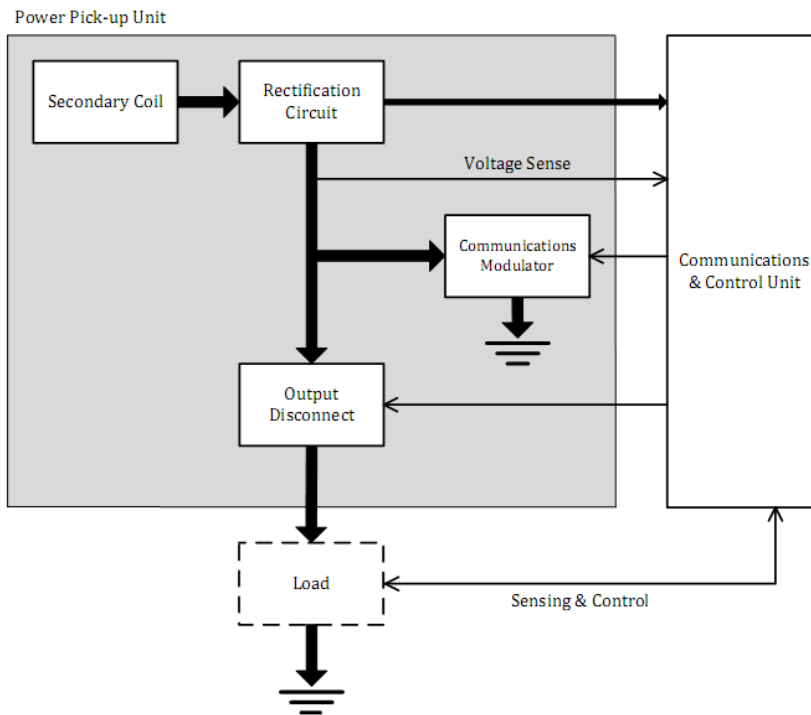
TAULUKKO 2. Ensiökäämin mitat suunnitelmassa A2. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

| Parametri | Arvo |
|----------------------------|-------|
| Ulkokehän halkaisija | 40 mm |
| Sisäkehän halkaisija | 19 mm |
| Paksuus | 2 mm |
| Johtimien kierrosten määrä | 10 |
| Kerrosten lukumäärä | 2 |

Suojaus on lähes samanlainen kuin A1-suunnitelmassa, mutta käämin alla olevan suojan tarvitsee olla paksuudeltaan vain 0,2 mm ja ylärajapinnan etäisyys eli $d_z = 2 \text{ mm} - 3 \text{ mm}$. Hakkuritopologiana käytetään Full Bridge -muunninta. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

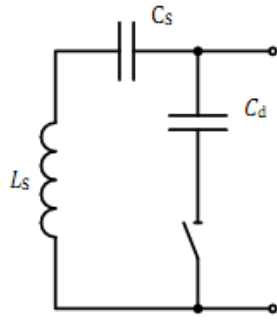
3.4 Vastaanotin

Vastaanottimen suunnittelu on hieman vapaampaa, koska sen sijoittaminen erilaisiin mobiililaitteisiin on hankalaa. Vastaanottimessa (kuva 9) tulee olla kuitenkin kaksi pääyksikköä ja latausta vaativa kuorma. Tehon vastaanottoyksikkö sisältää toisiokäämin, vahvistinpiirin, kommunikaatiomodulaattorin sekä ulostulon katkaisimen. Toimintaperiaate on hyvin paljon samanlainen kuin tukiaseman toiminta. Kommunikaatio- ja kontrollointiyksikkö saa latausta vaativalta kuormalta tiedon ja antaa sen mukaan käskyjä vastaanotinyksikölle, joka välittää käskyt tukiasemalle. Vastaanotettu teho muunnetaan hakkureilla tasavirraksi ja sitä mitataan jatkuvasti, että kontrollointiyksikkö osaa ohjata latausta. Ulostulon katkaisin estää virran vuotamisen kuormaan, kun sitä ei tarvita. Kommunikaatiomodulaattorin toimintaperiaatetta ei kerrota tarkemmin standardin ensimmäisessä osassa, mutta sen tarkoitus on muokata käskyt tukiaseman ymmärtämään muotoon. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)



KUVA 9. Vastaanottimen lohkokaavio. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

Piiri, jossa toisiokäämi sijaitsee, on värähtelypiiri (kuva 10). Sen tarkoituksena on havaita vaihtovirran aiheuttama värähtely eli resonointi. Standardin mukainen piiri sisältää käämin lisäksi kaksi resonoivaa kondensaattoria sekä vaihtoehdoisen kytkimen. Ensimmäisen kondensaattorin (C_s) tarkoituksena on parantaa tehokkuutta ja toinen kondensaattori (C_d) havaitsee piirin resonoinnin. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)



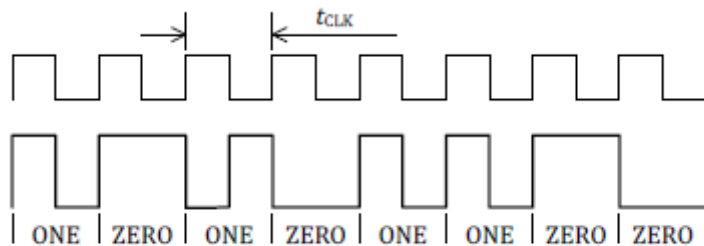
KUVA 10. Vastaanottimen värähtelypiiri. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

Piirissä olevan käämin rakenne riippuu käytetyn vastaanottimen mallista. Mallia A1 käytettäessä toisiokäämiin voi sijoittaa pienen magneettisen osan, jonka avulla vastaanotin voidaan asettaa oikealle paikalle. A2-mallissa magneettia ei tarvitse. Mobiililaitteen pinnan ja toisiokäämin väli ei saa ylittää 2,5 mm:ä. Suojausta ei standardissa määritellä eikä sen käyttö ole pakollista, mutta suositeltavaa, koska magneettikenttä voi häiritä elektronisia osia. Suojamateriaaleina voi käyttää samoja materiaaleja, joita käytetään myös tukiaseman suojaamiseen. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

3.5 Kommunikointi

Lähettimen ja vastaanottimen välisessä kommunikoinnissa käytetään tiettyä protokollaa. Vastaanotin hoitaa kommunikoinnin ja kontrolloi tehon lähetystä. Lähetin kuitenkin aloittaa kommunikoinnin kyselemällä mahdollisia rajapinnalla olevia laitteita. Kyselyä kutsutaan digitaaliseksi pingiksi. Paikalla oleva latausta tarvitseva vastaanotin ilmoittaa paikallaolostaan pingillä. Tämän jälkeen vastaanotin lähettää tunnisteen ja tehon tarpeen. Lähetin tunnistaa vastaanottimen ja säättää itsensä tehon lähetykseen. Vastaanotin kontrolloi tehon tarvetta ja lähetin mukautuu sen mukaan. Latauksen valmistuttua vastaanotin ei lähetä enää signaalia lähettimelle. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

Viestisignaalit lähetetään käämien avulla. Kaikki käskyt käyttävät amplitudimodulaatiota. Modulaatiossa käämistä lähtevän signaalin jännitteen tai virran ylitettyä tietyn tason bitti muuttuu nolasta ykköseen eli signaalin amplitudi vaihtelee. Saadut bitit koodataan bi-phase-koodausmenetelmällä (kuva 11). (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)



KUVA 11. Bi-phase-koodausmenetelmä. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

Bi-phase-koodauksessa dataa luetaan kellojaksojen välein. Tilan vaihtuessa kellojakson aikana ykkösestä nolnaan se tulkitaan pelkäksi ykköseksi. Tilan pysyessä samana kellojakson ajan se tulkitaan nolaksi. Viestit koostuvat neljästä osasta: preamble (aloitusosa), header (tunnisteosa), message (viestiosa) ja checksum (tarkistusosa). Preamble eli viestin aloitusosa on 11–25 bittiä pitkä jono ykkösiä ja lopuksi aloitusbittinä toimiva nolla. Näin tukiasema ja mobiililaitte erottavat viestit lataussignaalien seasta. Tunnisteosa kertoo viestiosan pituuden ja viestin aiheen. Itse viestiosa sisältää erilaisia käskyjä viestin aiheesta riippuen. Standardi sisältää useita aiheita ja käskyn, jonka mukaan laitteet toimivat. Checksum on tarkistusosa, joka auttaa varmistamaan, että viesti on tullut kokonaisuudessaan perille. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

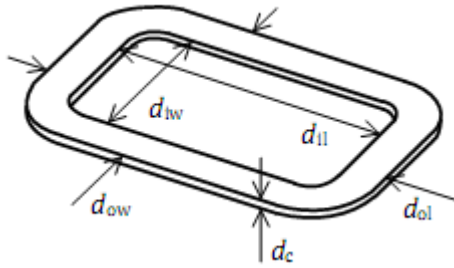
3.6 Esimerkitapauksia

Standardissa esitellään muutama esimerkki erilaisista tilanteista tai laitesuunnitelmista. Ensimmäisessä esimerkissä kerrotaan kaksi erilaista vastaanotinta. Seuraavissa esimerkeissä kerrotaan, miten paikannus hoidetaan. Lähettimen täytyy paikantaa vastaanotin ja opastaa se oikealle paikalle. Viimeisenä esimerkkinä selvitetään, miten suositellaan hoitamaan häiriötilanne, jossa ulkopuolelta tulee esine rajapinnalle. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

3.6.1 Esimerkkivastaanotin

Vastaanottimen suunnittelu on standardissa vapaampaa kuin lähettimen suunnittelu. Standardi antaa kaksi esimerkkiä, miten mobiililaitteen vastaanotinyksikkö voidaan toteuttaa. Tässä luvussa esitellään vastaanotin, joka on tehty laaamaan matkapuhelimistakin tuttua litiumioniakkua. Samaa toteutustapaa on käytetty myös myöhemmin esille tulevassa Texas Instrumentsin bqTESLA-kehitysalustan vastaanottimessa. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

Esimerkkivastaanottimen käämin (kuva 12) induktanssi on $15,3 \mu\text{H}$ ja se on valmistettu 14 kierroksesta $0,41 \text{ mm:n}$ paksuista 26 AWG -tyypin johdinta, joka on valmistettu 26 jännteestä 40 AWG ($0,08 \text{ mm}$) -tyypin johdinta. Käämi on suorakulmion muotoinen pyöreän sijaan, sisältää magneetin ja on yksikerroksinen. Tarkemmat mitat on lueteltu taulukossa 3. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

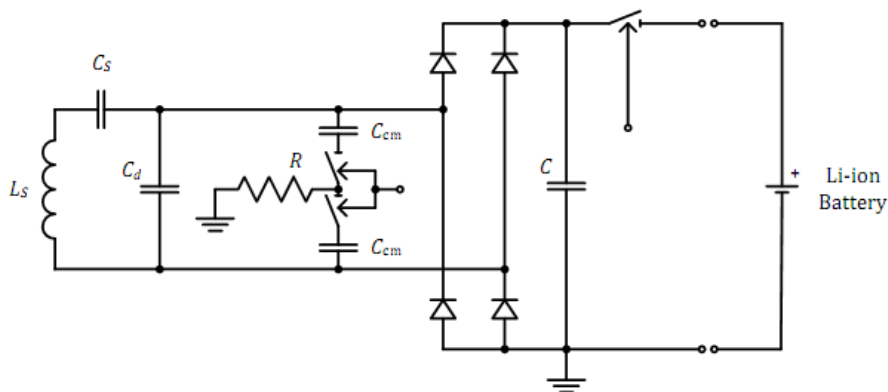


KUVA 12. Esimerkkitoisiokäämi. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

TAULUKKO 3. Esimerkkitoisiokäämin ulkoiset mitat.

| Symboli | Arvo |
|----------|----------|
| d_{ol} | 44,25 mm |
| d_{il} | 28,75 mm |
| d_{ow} | 30,25 mm |
| d_{iw} | 14,75 mm |
| d_c | 0,6 mm |

Suojaus on vastaanottimessa vapaaehtoista, mutta esimerkissä on käytetty pinta-alaltaan 52 mm * 35 mm:n ja paksuudeltaan 1 mm:n suojausta. Suojamateriaalina toimii ferriitti ja se on sijoitettu käämin päälle. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)



KUVA 13. Esimerkkivastaanottimen piirikaavio. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

Vastaanottimen elektroniikka sisältää värähtelypiirin, jossa sijaitsee kaksi kondensaattoria, C_s (137 nF) ja C_d (1,6 nF). Värähtelypiirin jälkeen on rinnan kytketty kommunikaatiomodulaattori, joka sisältää kaksi 22 nF:n suuruista kondensaattoria, joiden välissä on kaksi kytkintä. Kytkinten välissä on vastus, jonka arvo on 10 k Ω . Lopuksi vastaanottimessa on vielä tasasuuntauspiiri, joka on rakennettu Full Bridge -hakkuritopologialla, mutta transistorien tilalla on diodit ja vielä rinnan kytketty 20 μ F:n kondensaattori. Vastaanottimen ulostuloihin kytetään muut järjestelmän vaatimat osat, kuten kommunikaatio- ja kontrollointiyksikkö. Esimerkin mukainen vastaanotin pystyy lataamaan litiumioniakkua korkeintaan 5 W:n teholla. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

3.6.2 Vieras esine rajapinnalla

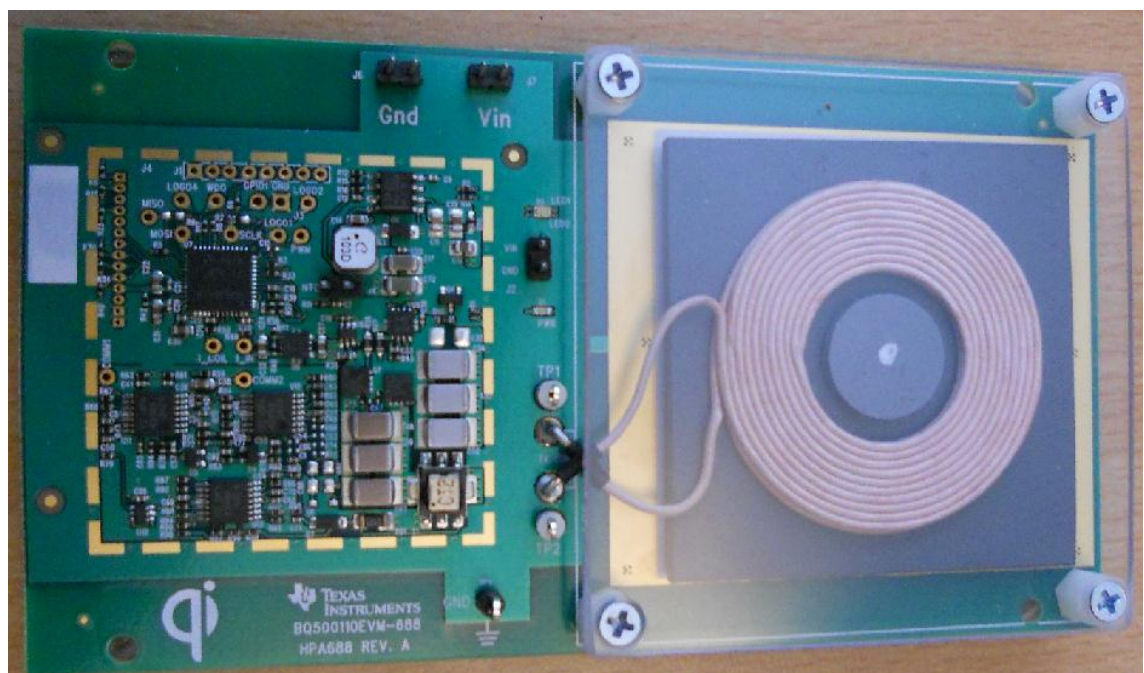
Energiaa siirretään ilmassa magneettikentän avulla, joten suunnittelussa täytyy ottaa huomioon erilaiset tilanteet. Yksi mahdollinen tilanne on ulkopuolisen metalliesineen ilmestyminen magneettikenttään. Metalliesine voi aiheuttaa magneettikentässä muutoksia ja alkaa lämmetä itse. Myös muut metalliesineet lähettimessä tai vastaanottimessa voivat lämmetä. Lämpö tuottaa elektroniikassa ongelmia ja on energiahukkaa latauksessa. Standardi esittelee esimerkin, miten kyseiseltä tilanteelta voidaan välttyä. Vastaanottimeen asennetaan sensori, joka mittaa tukiaseman ja mobiililaitteen rajapinnan lämpötilaa. Mikäli lämpötila nousee annetun arvon yläpuolelle, lähetin lähettää lopetuskäskyn. Vastaavasti tukiasema voi mitata lämpötilaa rajapinnalla ja katkaista tehon lähettämisen. Tukiasema voi myös arvioida rajapinnan läpi kulkevaa tehoa ja vertailla sitä vastaanottimen ilmoittamiin arvoihin. Jos arvot poikkeavat liikaa, tukiasema katkaisee tehon lähetyksen. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

4 BQTESLA

BqTESLA on Texas Instrumentsin valmistama langattoman energian kehitysalusta. Alustalla pystyy kehittämään latausalustoja, jotka lataavat erilaisia kannettavia laitteita ilman johtoja. Laite on ensimmäinen alusta joka käyttää WPC-järjestön luomaa Qi-standardia. Pakkaus sisältää karkean version lähettimestä ja vastaanottimesta. (Brandon 2011.)

4.1 Lähettimen kehitysalusta

Lähettimen kehitysalusta (bq500110EVM) toimii valmiina latausalustana mobiililaitteelle. Alustan tarkoituksena on toimia esimerkkinä tukiaseman kehityksessä sekä testilaitteena vastaanottimelle. Kehitysalusta koostuu ohjainosasta sekä ensiökäämistä. Ensiökäämi on lähettimen A1-mallin mukainen, eli se sisältää magneetin. Ohjainosassa tärkein osa on bq500110-piiri. Piiri hoitaa kehitysalustan loogiset funktiot ja aukaisee lähettimeltä tulevat viestipaketit. Kehitysalustalla on WPC:n hyväksymä sertifikaatti, joten sille voi kehittää Qi-standardin mukaisia vastaanottimia. (bq500110EVM-688 Evaluation Module 2011.)



KUVA 14. Lähettimen kehitysalusta bq500110EVM-688.

4.2 Vastaanottimen kehitysalusta

Vastaavasti vastaanottimen kehitysalusta demonstroi täydellistä vastaanotinta ja soveltuu tukiaseman testaamiseen. Kehitysalustassa on kolme merkittävää osaa. Se sisältää toisiokäämin, vastaanottimen ohjainyksikön ja virtalähdeyksikön. Vastaanottimen ohjainyksikössä toimii MSP430BQ1010-piiri. Piiri hoitaa kommunikaation sekä seuraa jännitteen ja virran kulkua. Virtalähdeyksikkö antaa vastaanottimen ohjainyksikölle 3,3 V jännitettä ja 15 mA virtaa. Se sisältää myös regulaattoreita, jotka pitävät ulostulojännitteet sopivalla tasolla. (bq25046EVM-687 Evaluation Module 2011.)

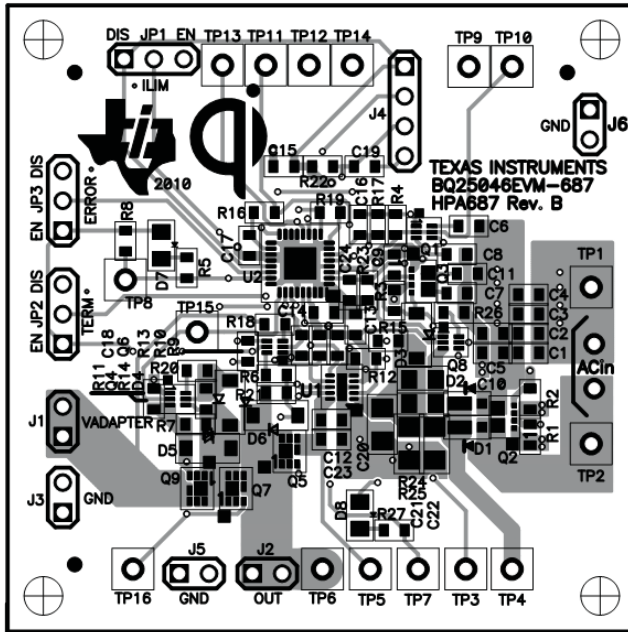


KUVA 15. Vastaanottimen kehitysalusta bq2546EVM-687.

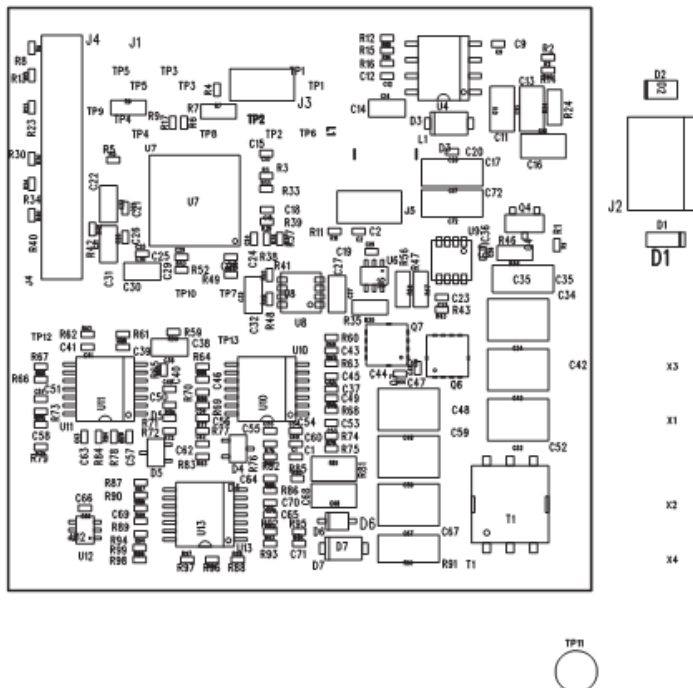
5 KOMMUNIKAATION TUTKIMINEN

Mobilespot Oy:n toiveena oli saada tukiaseman ja vastaanottimen välille tiedon-
siirtoyhteys. Laitteiden välillä liikkuu lataukseen liittyviä tietoja, mutta tarkoituk-
sena oli saada myös omaa dataa tukiasemalle. Näin laitteiden käyttökohteet
lisääntyisivät huomattavasti. Apuna kommunikaation tutkimisessa käytettiin
bqTESLA-kehitysalustaa. Ongelmaksi muodostuivat kuitenkin standardin ja ke-
hitysalustan mahdolliset rajoitteet.

Kaikki testaaminen aloitettiin syöttämällä bqTESLA:n lähettimeen 19 V:n jännite
ja 500 mA virtaa. bqTESLA sisältää useita erilaisia testauspisteitä, joista osasta
pystyy seuraamaan kommunikaatiosignaalia. Kehitysalusta sisältää myös muu-
taman jumpperin eli oikosulkupalan, joissa kytkentää vaihtamalla voidaan simu-
loida erilaisia latauksen aikana mahdollisia tilanteita. Kuvassa 16 ja 17 on vas-
taanottimen ja lähettimen piirikaaviot, joista löytyy suurin osa testauspisteistä
(TPx) ja jumppereita (JPx). Mittausten tavoitteena oli selvittää kommunika-
atiosignaalin kulku lähettimestä vastaanottimelle ja testata erilaisia lataustilantei-
ta.



KUVA 16. Vastaanottimen piirikaavio. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)



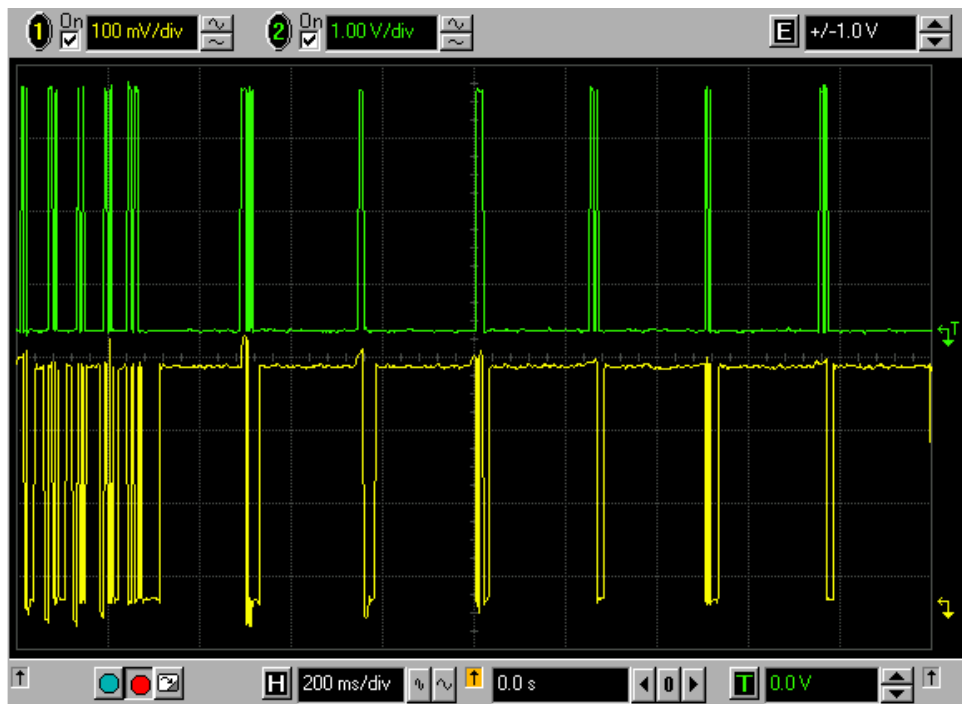
KUVA 17. Lähettimen piirikaavio. (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

5.1 Kommunikaatiosignaalin kulku lähettimessä

Kommunikointisignaalien kulkua seurattiin vastaanottimelta lähettimelle. Vastaanotin lähetti amplitudimoduloitua signaalia sähkömagneettisen induktion avulla toisiokäämistä ensiökäämiin. Mittauksissa todettiin, että lähettimen täytyy käsitellä eli demoduloida signaaleja, jotta viestiksi tarkoitettu bittivirta voidaan erottaa induktion aiheuttamasta häiriöstä. Demoduloinnissa saapunut signaali jaetaan kahteen eri linjaan, jotka käyvät läpi erilaiset loogiset funktiot. Funktioiden avulla häiriöisestä signaalista voidaan suodattaa vain vastaanottimen lähettämä viesti. Molempien linjojen viestit eivät vielä kuitenkaan täysin vastaa lähetettyä viestiä, mutta kahdesta hieman poikkeavasta signaalista lähetin pystyy laskemaan alkuperäisen viestin.

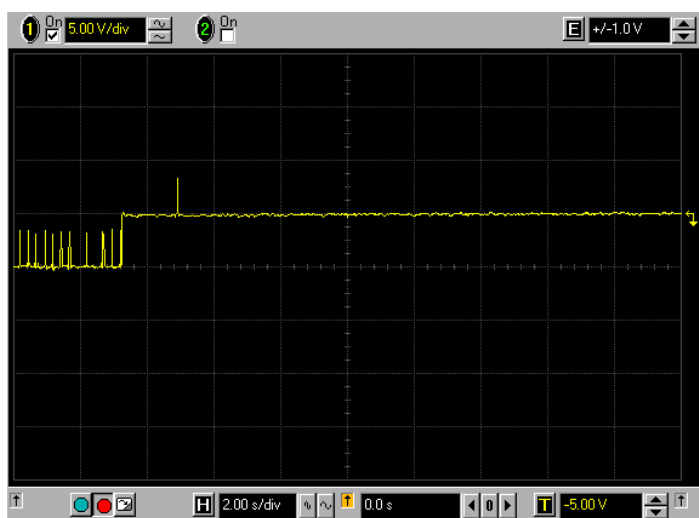
5.2 Mittaukset

Mittaukset aloitettiin kytkemällä oskilloskooppi vastaanottimen testipisteeseen 10 (TP10), josta voidaan mitata vastaanottimen lähettämä alkuperäinen viesti sekä kytkemällä toinen oskilloskooppi lähettimen testipisteeseen 13 (TP13), joka on testipiste toiselle vastaanottimen linjoista. Kyseisellä kytkennällä seurattiin bittivirran kulkua vastaanottimesta lähettimelle. Ensimmäisenä testattiin latauksen aloitus. Kuvassa 18 ylempi käyrä on vastaanottimen signaali ja alempi käyrä on lähettimeen tullut demoduloitu signaali. Kuvasta voi todeta, että signaalit ovat melkein samanlaiset eli viesti tulee lähettimen testipisteeseen 13 lähes muuttumattomana.



KUVA 18. Signaalin kulkua vastaanotimessa ja lähettimessä

Seuraavaksi simuloitiin tilanne, jossa lataus joudutaan lopettamaan ulkoisen häiriötekijän vuoksi (kuva19). Lopetus käskyssä signaalin tila ei muutu eli viesti on pitkä rivi nollia ja tietyllä aikavälillä toistuva ykkösbitti. Harvan ykkösbitin avulla vastaanotin ilmoittaa olevansa kuitenkin tukiasemalla. Tässä tilassa lataus ei kuitenkaan käynnisty automaattisesti, vaan vastaanotin pitää käyttää pois- ja asettaa takaisin latausalustalle.



KUVA 19. Keskeneräisen latauksen lopetus

Viimeisenä mittauksena verrattiin edellisessä luvussa mainittuja lähettimen kahden kommunikaatiolinjan bittivirtoja sekä alkuperäistä viestiä. Bittivirtojen huomattiin sisältävän vain muutamia bittivirheitä, mutta ne eivät sattuneet koskaan samaan aikaan. Tästä johtuen lähetin osaa korjata virheet ja muodostaa alkuperäisen viestin. Kuvassa 20 on latauksen lopetuskäsky. Kuvassa olevat kaksi signaalia kuvaavat kahden kommunikaatiolinjan bittivirtaa. Latauksen lopetus näkyy vain pienenä poikkeamana kuvan keskivaiheella, mutta molemmat signaalit päätyvät lopulta lähettämään pelkkää nollaa.



KUVA 20. Lopetuskäskyn bittivirtaa lähettimen kommunikaatioväylillä

5.3 Datan kirjoittaminen lähettimelle

Sähkömagneettinen induktio mahdollistaa bittien lähettämisen lähettimen ja vastaanottimen välillä, kuten mittauksetkin sen todistivat. Kommunikaation seuraamisen jälkeen tutkittiin mahdollisuutta kirjoittaa lähettimelle muutakin dataa kuin lataukseen tarvittavia käskyjä. Tämä mahdollistaisi tukiaseman käyttämisen muuhunkin kuin lataamiseen. Rajoittavana tekijänä on QI-standardi, joka on suunniteltu vain latausta koskevien tietojen lähettämiseen.

Tekniikka oli valmis lähettämään haluttua signaalia, joten ongelman selvittämiseksi täytyi tutkia standardin rajoitteet. Taulukossa 4 on standardin mukaisia aloitusosan paketteja, jotka sisältävät viestiosan pituuden ja aiheen. Taulukosta näkee, että valmiiksi koodattujen pakettien lisäksi on jätetty ylimääräistä tilaa omille ohjauspaketeille eli taulukossa alimmaisena oleville proprietary-paketeille. Tukiaseman pitää kuitenkin osata tulkita paketteja tai se jättää paketin huomioimatta. Proprietary-paketit ovat myös isoimpia paketteja. Esimerkiksi alin paketti sisältää 24 kappaletta 8 bitin pituisia viestejä. Tukiaseman pitää kuitenkin osata toimia pakettien käskyjen mukaan tai se jättää paketit huomioimatta. Standardia tulkitsemalla todettiin, että viestejä ei silti poisteta, ne vain jätetään huomioimatta eli kyseistä ominaisuutta hyödyntämällä voisi olla mahdollista kirjoittaa omaa dataa proprietary-paketteihin.

TAULUKKO 4. QI-standardin pakettityypit (System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010.)

| Header* | Packet Types | Message Size |
|--|-------------------------|--------------|
| <i>ping phase</i> | | |
| 0x01 | Signal Strength | 1 |
| <i>identification & configuration phase</i> | | |
| 0x06 | Power Control Hold-off | 1 |
| 0x51 | Configuration | 5 |
| 0x71 | Identification | 7 |
| 0x81 | Extended Identification | 8 |
| <i>power transfer phase</i> | | |
| 0x02 | End Power Transfer | 1 |
| 0x03 | Control Error | 1 |
| 0x04 | Rectified Power | 1 |
| 0x05 | Charge Status | 1 |
| <i>identification & configuration / power transfer phase</i> | | |
| 0x18 | Proprietary | 1 |
| 0x19 | Proprietary | 1 |
| 0x28 | Proprietary | 2 |
| 0x29 | Proprietary | 2 |
| 0x38 | Proprietary | 3 |
| 0x48 | Proprietary | 4 |
| 0x58 | Proprietary | 5 |
| 0x68 | Proprietary | 6 |
| 0x78 | Proprietary | 7 |
| 0x84 | Proprietary | 8 |
| 0xA4 | Proprietary | 12 |
| 0xC4 | Proprietary | 16 |
| 0xE2 | Proprietary | 20 |
| 0xF2 | Proprietary | 24 |

6 POHDINTA

Langaton lataus on todennäköisesti tulevaisuudessa yleistyvää tekniikkaa, joten aihe oli erittäin kiinnostava ja opetti paljon elektroniikasta, josta minulla ei ollut kovin paljon aikaisempaa kokemusta.

Työ sisälsi paljon teoriaa sähkömagneettisesta induktiosta ja langattoman latauksen standardista. Materiaalia ja lähteitä oli runsaasti, joten niiden kasaaminen järkeväksi kokonaisuudeksi oli haastavaa. Kaikkea en edes pyrkinyt aukaisemaan, koska yksityiskohdat löytyvät lähteissä olevista linkeistä ja dokumenteista. Suurin haaste työssä oli kuitenkin elektroniikka. Työn alkuperäinen tavoite oli rakentaa oma standardin mukainen induktiolaturi tai vastaanotin. Tuotteiden tilaus- ja aikatauluongelmien sekä haastavan elektroniikkasuunnittelun vuoksi työtä muutettiin niin, että päädyttiin selvittämään asiaa teoriatasolla ja tutkimaan induktiolatureiden tiedonsiirto-ominaisuuksia.

Ratkaisu oli kuitenkin järkevä, koska oli hyödyllisempää keksiä laitteisiin jotain uutta kuin rakentaa jo olemassa oleva järjestelmä uudelleen. Langattoman latauksen lähettimen ja vastaanottimen toimintaperiaatteista opittiin runsaasti uutta ja saaduilla tiedoilla olisi mahdollista rakentaa oma järjestelmä. BqTESLA-kehitysalustaa mitatessa havaittiin laitteen kyky lähettää selkokielisiä bittijonoja sähkömagneettisen induktion avulla. Bittien kirjoittaminen QI-standardia käyttävään järjestelmään vaatii hieman standardin rajoitteiden kiertämistä. Mahdollisuus ei kuitenkaan riko standardin ehtoja.

Työ muuttui hieman matkan varrella, mutta olen tyytyväinen tehtyihin muutoksiin. Hyödyllistä oli oppia induktiolatausjärjestelmän toimintaa ja keksiä siihen jotain uutta. Toimiva lataus- ja tiedonsiirtokokonaisuus mahdollistaa tulevaisuudessa erittäin monipuoliset ratkaisut. QI-standardia tukevat laitteet todennäköisesti yleistyvät tulevaisuudessa, joten tästä työstä voi olla konkreettista hyötyä muille niin myös itselleni.

LÄHTEET

16. Induktio. 2010. Helsingin yliopisto. Saatavissa:

<http://www.courses.physics.helsinki.fi/ope/opelab/16kokon/luento.html>.

Hakupäivä 15.3.2011.

Brandon, Alan 2011. TI's bqTESLA wireless charging development kit helps designers cut the cord on portable devices. Saatavissa:

<http://www.gizmag.com/ti-bqtesla-wireless-charging-kit/17592>. Hakupäivä

7.3.2011.

bq500110EVM-688 Evaluation Module 2011. Saatavissa:

<http://focus.ti.com.cn/cn/lit/ug/slvu429a/slvu429a.pdf>. Hakupäivä 3.2.2011.

bq25046EVM-687 Evaluation Module 2011. Saatavissa:

<http://focus.ti.com.cn/cn/lit/ug/slvu420/slvu420.pdf>. Hakupäivä 3.2.2011.

Energy Harvesting Forum 2009. Saatavissa: <http://www.energyharvesting.net/>.

Hakupäivä 1.3.2011.

Hill, C. J. 1997. Switch Mode Power Supplies. Saatavissa:

<http://pe2bz.philpem.me.uk/Power/-%20Inverters/D-101-Converters-etc/smps.htm#halfbrdg>. Hakupäivä 13.4.2011.

Inkinen, Pentti – Manninen, Reijo – Tuohi, Jukka 2002. Momentti 2. Insinööriy-siikka. Helsinki: Otava.

Ojanperä, Veijo 2011. Langatonta latausta helposti. Saatavissa:

<http://www.proessori.fi/uutiset/uutinen2.asp?id=57075>. Hakupäivä 1.3.2011.

System Description. Wireless Power Transfer. Volume I: Low Power. Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. 2010. Saatavissa: <http://www.wirelesspowerconsortium.com/news/announcements/low-power-standard-ready.html>. Hakupäivä 25.2.2011.

Taipale, Juha 2010. Energy harvesting - energiaa ympäristöstä. Saatavissa: <http://www.kenttavayla.fi/visio/2010/11/energy-harvesting-%E2%80%93energiaa-ymparistosta/>. Hakupäivä 1.3.2011.

The “Last Wire” In Our Wireless World. Saatavissa <http://www.wirelesspowerconsortium.com/about/our-vision.html>. Hakupäivä 12.3.2011.

Varviala, Jaakko 2009. Hakkuriteholähteet ja niiden ominaisuudet. Saatavissa https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/2770/Varviala_Jaakko.pdf?sequence=1. Hakupäivä 30.3.2011.