



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

JARKKO RUOHO
USB-VÄYLÄN SUOJAEROTUS SAIRAALAKÄYTTÖÖN

Diplomityö

Tarkastajat: Dosentti (TkT) Jarkko
Niittylahti, TkT Sakari Junnila
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja Sähkötekniikan
tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 3. maaliskuuta 2010

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Tietotekniikan koulutusohjelma

JARKKO RUOHO: USB-väylän suojaerotus sairaalakäyttöön

Diplomityö, 50 sivua, 6 liitesivua

Maaliskuu 2010

Pääaine: Sulautettut järjestelmät

Tarkastajat: Dosentti (TkT) Jarkko Niittylahti, TkT Sakari Junnila

Avainsanat: Suojaerotus, USB

Sairaalaympäristöön tarkoitettujen potilasmittalaitteiden hinta on usein merkittävä tekijä uusia laitteita hankittaessa ja voi ratkaista valinnan kahden tasapuolisen laiteoimittajan välillä. Hintapaineisiin vastatakseen laitevalmistajilla on halu käyttää toimistokäyttöön tarkoitettuja tietokoneita myös potilasmittauksista tulevan teidon jäsentämiseen ja näyttämiseen. Tiedonsiirto mittalaitteesta tietokoneeseen on helppointa järjestää jo valmiiksi tietokoneessa olevan liittymän kautta. Nykyisin kaikissa tietokoneissa on Ethernet ja Universal Serial Bus (USB) -liittymät. Tässä työssä tutkitaan USB-väylän soveltuvuutta potilasmittalaitteiden liittämiseen tavalliseen yleiskäyttöiseen tietokoneeseen.

Sähkökäyttöisten potilasmittalaitteiden pitää olla kaksoiseristettyjä verkkovirrasta. Tämä tarkoittaa, että laitteen pitää toimia normaalisti ja turvallisesti, vaikka verkkovirran puolella esiintyisi 4 kV:n jännite. Helppoiten tämä saavutetaan riittävän jännitekestoisuuden omaavalla suojaerotuksella. Tavallinen tietokoneen virtalähde ei ole suojaerotettu. Myöskään pelkkä virtalähteen korvaaminen suojaerotuksella ei ole aina riittävä vaihtoehto, varsinkin jos tietokonetta halutaan käyttää myös muihin tehtäviin. Suojaerotus voidaan kiertää vahingossa esimerkiksi kytkemällä suojaerottamaton tulostin tietokoneeseen. Lisäksi usein halutaan erottaa eri mittaukset myös toisistaan. USB-väyläisten mittalaitteiden kytkeminen turvallisesti yleiskäyttöiseen tietokoneeseen edellyttää suojaerotusta mittalaitteessa tai USB-väylässä. Tässä työssä esitellään suojaerotuksen toteutus USB-väylän signaaleihin laitteen sisällä. Pienin muutoksin sama tekniikka soveltuu myös suoraan USB-johtimiin tehtävään suojaerotukseen.

Suojaerotuksen prototyyppi toteutetaan USB-väylän full-speed versioon, eli 12 Mb/s nimellinopeuden omaavaan versioon. Työssä käsitellään myös muiden nopeusluokkien suojaerotus ja esitetään tarvittavat muutokset siten, että yhdellä kytkennällä voidaan tukea nopeuksia 1,5 ja 480 Mb/s välillä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Information Technology

JARKKO RUOHO : Medical Isolation for USB

Master of Science Thesis, 50 pages, 6 Appendix pages

March 2010

Major: Embedded Systems

Examiners: Adjunct professor Jarkko Niittylahti, Doctor (Sc) Sakari Junnila

Keywords: Isolation, USB

Price is an important criterion when new medical measurement instruments are purchased. Because of price competition manufacturers wish to use commercial off-the-self (COTS) products as much as possible. Regular office computers are well-suited for displaying and organizing patient measurement information. The most convenient way of connecting measurement devices to a computer would be via Universal Serial Bus (USB) or Ethernet plug, as they can be found from every modern computer. This thesis examines how USB could be used in a safe manner to connect a medical measurement instruments to regular office computer.

Electrically operated medical instruments must have double insulation in order to protect the patient and medical personnel. In practice double insulation means that the device could be used safely even in case of 4 kV voltage applied to the mains power side. The easiest way to achieve the desired level of safety is to have electrical isolation with high breakdown voltage. Regular computer power supplies are normally not isolated. Changing the supply would not suffice if the computer is used also for other than medical instrumentation tasks. The isolation may be accidentally bypassed by for example connecting a non-isolated printer to the computer. Normally it is good to have isolation also between separate measurement units. In order to connect a medical instrument safely to a computer via USB there must be isolation either in the device or on the bus. This thesis presents an isolation implementation for the USB-signal within the device. With minor changes the isolation can be implemented also in USB-cable.

The prototype isolation works in full-speed USB, which is 12 Mb/s version. Other speeds of the bus are also considered. All the changes needed to support speeds in the range of 1.5 - 480 Mb/s are described.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on aloitettu Tekesin ETX-ohjelmaan kuuluneen Väylät ja liittynät hankkeen osana vuonna 2001. Esitän kiitokseni hankkeen johtajalle dosentti, TkT Jarkko Niittylahdelle, joka toimii myös työn tarkastajana. Kiitän myös työn ohjaajaa TkT Sakari Junnilaa.

Lempäälässä 12.04.2010

Jarkko Ruoho
Pappilantie 20
37500 Lempäälä
Puh. 040 5336292

SISÄLLYS

1. Johdanto	1
2. USB-väylä	3
2.1 Yleistyminen	3
2.2 Helppokäyttöisyys	4
2.2.1 Kytke ja käytä	5
2.2.2 Sähkönsyöttö	5
2.3 USB 2.0-väylän fyysinentaso ja linkkitaso	5
2.3.1 Ero- ja yksimuotoiset signaalit	6
2.3.2 Kaksisuuntainen liikenne yhdellä johdinparilla	6
2.3.3 Eromuotoisen datan binäärikoodaus	6
2.3.4 Signalointi	7
2.4 USB 3.0 -väylän fyysinentaso ja linkkitaso	8
2.5 USB-laitteiden välinen kommunikointi	9
2.6 Muut tietokoneiden oheislaitteväylät	10
2.6.1 Firewire-väylä	10
2.6.2 Lähiverkko	11
2.7 Langattomat yhteydet	11
2.7.1 Langaton USB	12
2.7.2 Bluetooth	13
2.7.3 Langaton lähiverkko	14
2.8 Yhteenveto	14
3. Suojaerotus	15
3.1 Suojaerotuksen hyödyt potilasmittauksissa	15
3.2 Suojaerotuksen vaatimukset sairaalaympäristössä	17
3.3 Väylien suojaerotus	18
3.4 Suojaerotuskomponentit	18
3.4.1 Muuntaja	19
3.4.2 Optoerotin	19
3.4.3 Kondensaattori	20

3.4.4	Optiset kuidut	20
3.5	Yhteenveto	21
4.	Toteutusvaihtoehdot	22
4.1	Tarjolla olevat kaupalliset USB:n suojaerotusratkaisut	22
4.2	Muuntajasuojaerotus	23
4.2.1	Erillinen suojaerotusmuuntaja	24
4.3	Optinen suojaerotus	25
4.4	Kapasitiivinen suojaerotus	25
4.5	Vahvistimien suunnan päättely	26
4.6	Suojaerotus USB-väyläohjaimen ja mittauskytkennän välillä	28
4.7	USB 3.0 signaalien suojaerotus	28
4.8	Käyttäjänitteen suojaerotus	29
4.9	Yhteenveto	30
5.	Prototyypikytkenä	31
5.1	Yleiskäyttöinen passiivinen muuntajasuojaerotuskytkentä	31
5.1.1	High-speed-väylän erityispiirteet	32
5.1.2	Muuntajien toiminnalliset vaatimukset	34
5.1.3	Komponenttien mitoitus	34
5.1.4	Low-speed-laitteen nopeustiedon välittäminen suojaerotuksen yli	36
5.2	Mittauksissa käytetyn prototyypin kytkentä	36
5.2.1	Kytkenän hinta	38
5.2.2	Kytkenän fyysinen koko	39
5.3	Yhteenveto	40
6.	Tulokset	41
6.1	Testausjärjestelyt	41
6.2	Signaalimuotojen mittaukset	42
6.3	Yhteenveto	45
7.	Johtopäätökset	46
7.1	Pohdinta	47
7.2	Tulevaisuuden kehityssuunta	47
	Lähteet	48

Liite 1: Eromuotoinen isännän ajama signaali ennen suojaerotusta	51
Liite 2: Eromuotoinen isännän ajama signaali suojaerotuksen jälkeen	52
Liite 3: Eromuotoinen laitteen ajama signaali ennen suojaerotusta	53
Liite 4: Suojaerotuskytkennän piirilevyn kuparointi	54
Liite 5: Suojaerotuskytkennän osasijoittelukaavio yläpuolelta	55
Liite 6: Suojaerotuskytkennän osasijoittelukaavio alapuolelta	56

1. JOHDANTO

Työn tavoitteena oli löytää edullinen tapa liittää mikrokontrolleriperustainen mittalaite turvallisesti ja edullisesti tavanomaiseen tietokoneeseen. Tavallinen kotitietokone tai kannettava tietokone on edullinen verrattuna erityisesti potilas- tai teollisuusympäristöön suunniteltuun vastaavat ominaisuudet omaavaan laitteeseen. Samoin kotitietokoneista löytyvät oheislaiteväylät ovat edullisia toteuttaa, koska niihin liittyviä väyläohjaimia valmistetaan suuria määriä. Usein tietokoneiden oheislaiteväylät on alkujaan suunniteltu edulliseksi valmistaa.

Potilasmittalaitteille asetetut vaatimukset eroavat kotitietokoneille asetetuista vaatimuksista erityisesti turvallisuuden osalta. Turvallisuuteen liittymättömät vaatimukset on rajattu tämän työn ulkopuolelle. Myös tietokoneen toimintavarmuuden vaikutus turvallisuuteen on rajattu pois, koska käytettävän oheislaiteväylän valinnalla ja toteutuksella on siihen vähän vaikutusta. Tässä työssä potilasmittalaitteilla tarkoitetaan potilaan elintoimintojen mittaukseen tarkoitettuja laitteita, joita käytetään potilaan välittömässä läheisyydessä. Välittömässä läheisyydessä oleviin laitteisiin potilas voi koskettaa jatkuvasti tai ajoittain.

Potilasympäristössä on tiukemmat turvallisuuteen liittyvät vaatimukset kuin kotitietokoneilla, joten tavalliset oheislaiteväylät eivät sovellu sellaisenaan potilasmittauksiin. Jos näitä väyliä kuitenkin halutaan käyttää potilasympäristössä, on niihin tehtävä turvallisuutta parantavia muutoksia. Näistä tärkein on suojaerotus, eli galvaaninen erotus tietokoneen ja mittauskytkennän välillä.

Teollisuuden mittalaitteille asettamat vaatimukset liittyvät laitteen toimintavarmuuteen erilaisissa ympäristön vikatilanteissa. Tässä työssä sivutaan korkeiden jännitteiden sekä maatasojen eroista johtuvia ongelmia, koska niiden ratkaisut ovat usein samankaltaisia potilasympäristön turvallisuuteen liittyvien ongelmien kanssa.

USB-väylä (Universal Serial Bus) on kotitietokoneista tuttu erittäin yleinen väylä. Työn tavoitteen kannalta se on houkutteleva, koska se on suunniteltu edulliseksi

toteuttaa ja sen eri nopeuksiset versiot sopivat moniin erilaisiin mittauksiin ja sovelluksiin. Uusin versio, USB 3.0 määrittelee SuperSpeed-datanopeuden lisäksi yhteensopivuuden vanhempien USB-versioiden määrittelemien datanopeuksien kanssa [1]. USB:n 3.0 määrittely tukee tiedonsiirtonopeuksia 1.5 Mb/s, 12 Mb/s, 480 Mb/s ja 5 Gb/s. Tämä mahdollistaa sekä äärimmäisen edullisten ja toisaalta kaikkein kehittyneiden oheislaitteiden kytkennän tietokoneeseen saman oheislaitteväylän kautta.

Aktiiviset mikrokontrolleripohjaiset mittalaitteet tarvitsevat aina myös käyttö-sähköä. Sähkön syöttöön saadaan helposti suojaerotus yksinkertaisella hakkurikytkennällä tai käyttämällä akkuja tai paristoja. Nämä kytkennät on rajattu tämän työn ulkopuolelle.

Työn alussa esitellään USB-väylä ja sen toiminta. Lisäksi esitellään lyhyesti muut samankaltaiset väylät ja mahdollisuudet niiden suojaerotukseen. Langattomat yhteydet ovat aina suojaerotettuja, mutta niiden langallisia yhteyksiä heikomman luotettavuuden ja tietoturvan vuoksi niitä ei voi käyttää kaikissa sovelluksissa. Vertailun vuoksi myös yleisimmät langattomat yhteystekniikat esitellään lyhyesti.

Kolmannessa luvussa kuvataan lyhyesti potilas- ja teollisuusympäristöjen erityisvaatimukset sekä kerrotaan kuinka suojaerotus auttaa näiden vaatimusten täyttämässä. Lisäksi kyseisessä luvussa esitetään suoraerotuksen toteutus teoreettisella tasolla. Neljännessä luvussa käydään läpi eri tavoin toteutettujen suojaerotusten soveltuvuus USB-väylään. Tämän jälkeen viidennessä luvussa esitellään toteutettu suojaerotuskytkentä ja käydään läpi esimerkkitoteutuksen toiminta. Kuudennes-sa luvussa kerrotaan kytkennällä saavutetut tulokset. Seitsemännessä luvussa esitetään mittauksiin perustuvat johtopäätökset. Viimeisessä luvussa pohditaan työn onnistumista ja mahdollisia jatkokehityskohteita.

2. USB-VÄYLÄ

USB-väylän määrittely löytyy ilmaiseksi internetistä osoitteesta <http://www.usb.org/>. USB-väylä rakentuu isäntä - orja (host - slave) -mallin mukaisesti. Määrittelyssä käytetään termejä isäntä ja laite (device). Isäntä aloittaa aina kaiken tiedonsiirron ja laite käyttää väylää vain vastatakseen isännälle. Väylän rakentamisessa käytetään isännän ja laitteen lisäksi keskittimiä (hub). Keskittimet mahdollistavat useiden laitteiden kytkemisen yhteen isäntään. Isäntä myös määrää siitä minkä kytketyistä laitteista kanssa kulloinkin keskustellaan.

Nykyisin yleisesti käytössä olevat USB-laitteet noudattavat määrittelyn versiota 2.0, mikä määrittelee datanopeudet 1,5 Mb/s (low-speed), 12 Mb/s (full-speed) ja 480 Mb/s (high-speed) [2]. Uudempi 3.0-versio on yhteensopiva vanhempien versioiden kanssa siten, että USB 2.0:n toiminnallisuus on aina tuettuna ja lisäksi on tarjolla 5 Gb/s (SuperSpeed) nopeus [1]. SuperSpeed-signalointiin käytetään erillisiä johtimia ja USB 2.0 -määrittelyn mukaisille signaaleille on omat johtimensa. Edellä esitetyt nopeudet ovat väylän nimellisuopeuksia. Tällä nopeudella dataa liikkuu vain lyhyitä pätkiä kerrallaan.

Väylän tiedonsiirto koostuu paketeista. Varsinaista dataa sisältävien pakettien lisäksi käytössä on komento- (token) ja kättelypaketteja (handshake) sekä väylän ajoituksiin liittyviä paketteja.

2.1 Yleistyminen

USB-määrittely on alusta lähtien tehty halpoja kuluttajaelektroniikan laitteita varten. Kaikki väylän rakenteet on pyritty määrittelemään niin, että ne voidaan toteuttaa hyvin halvalla. Tämä on tärkeä tekijä väylän yleistymisessä. Laitevalmistajan pitää maksaa USB-väylän käytöstä 2000 USD kahden vuoden välein väylän määrittelyä hallinnoivalle USB Implementers Forumille [3].

Pienten valmistuskustannusten, joustavuuden ja erityisesti eri datanopeuksien ansiosta USB-väylä voidaan liittää myös halpoihin ja yksinkertaisiin laitteisiin, kuten tietokoneiden hiiriin ja jopa leluihin. Laaja-alainen käyttö yhdessä avoimen määrittelyn kanssa tarjoaa yhteensopivuutta eri laitevalmistajien kesken. Käyttäjälle tämä tuo säästöä, koska eri laitteet toimivat samassa ympäristössä.

Kaikissa nykyisin myynnissä olevissa uusissa tietokoneissa on valmiina USB-väylä ja käyttöjärjestelmien tuki on erinomainen. USB 3.0:lle oli olemassa ajurit Linux-käyttöjärjestelmässä ennen kuin ensimmäiset laitteet tulivat edes myyntiin [4, kappale 1.1], [5].

2.2 Helppokäyttöisyys

USB-väylää lähdettiin alkujaan kehittämään kuluttajille myytäviin tietokoneen oheislaitteisiin korvaamaan muun muassa PS/2, sarja- ja rinnakkaisportit. Kuluttajille myytävissä laitteissa tärkeimpiä ominaisuuksia on helppokäyttöisyys ja hinta. Väylän määrittelyssä keskityttiin juuri helppokäyttöisyyteen. USB-laitteen pitäisi toimia halutulla tavalla kunhan se vain kytketään tietokoneeseen ilman, että tietokonetta tarvitsisi sammuttaa ennen kytkemistä. Myös liittimen kytkemisen pitäisi olla helppoa.

USB-laitteiden liittäminen tietokoneeseen onkin hyvin yksinkertaista. Ainoastaan yksi liitin täytyy kytkeä. Sillä samassa johdossa kulkee sekä käyttö sähkö että data. Liittimien muotoilu puolestaan estää niiden kytkemisen väärin päin.

Tietokoneen käyttöjärjestelmä tarvitsee aina ajurin uuden laitteen järkevää käyttöä varten. Laiteajuri on tietokoneohjelma, joka osaa käyttää varsinaista laitetta. Samalla ajuri tarjoaa käyttöjärjestelmän kautta muille ohjelmille mahdollisuuden käyttää laitetta. Esimerkiksi kuvanlukija tarvitsee ajurin, joka ohjaa kuvanlukijan toimintaa, mahdollisesti korjaa luettujen kuvien värit ja muuttaa kuvainformaation sellaiseen muotoon, että kuvankäsittelyohjelma ymmärtää sitä. USB-laitteen käytön yksinkertaistamiseksi ajurin löytäminen on pyritty automatisoimaan.

2.2.1 Kytke ja käytä

USB-väylä on niin sanottu kytke ja käytä -väylä (plug and play), eli laitteiden pitäisi toimia ilman mitään erillisiä toimia heti kytkennän jälkeen. Järjestelmä lataa laitteen tarvitsemat ajurit automaattisesti laitteen itsensä kertoman laitekuvaimen perusteella. Laitekuvaimessa on mainittuna muun muassa laitteen tyyppi (device class), sekä valmistajan ja laitteen tunnistus. Eri laitteilla on omat tunnistensa, joiden yksilöllisyydestä huolehtii yritys nimeltään USB Implementers Forum, Inc. [2, kappale 9.6]. Näiden perusteella käyttöjärjestelmä osaa ladata laitteelle oikean ajurin. Kun laitetta kytketään ensimmäistä kertaa, käyttöjärjestelmä saattaa vaatia ajurien asentamista. Tämän jälkeen laite toimii aidosti kytke ja käytä -periaatteella. Myös tarvittavat ohjelmistot voidaan ladata automaattisesti ja laitteen käyttäjän kannalta oleelliset tiedot voidaan näyttää näytöllä heti kun laite on kytketty.

2.2.2 Sähkönsyöttö

Suojaerotetun laitteen sähkönsyötön pitää myös olla suojaerotettu. USB-väylän määrittelyn mukaan laite voi ottaa käyttösähkösä joko USB-väylästä tai sillä voi olla oma virtalähde [2, kappale 7.2]. Väylästä sähkönsyöttönsä ottavat laitteet on jaettu kahteen luokkaan: alle 100 mA (low-power bus-powered) ja alle 500 mA (high-power bus-powered) kuluttaviin laitteisiin. Yli 100 mA kuluttava laite saa kuitenkin käynnistyksessä kuluttaa korkeintaan 100 mA. Suurempaa virtaa laite saa ottaa vasta saatuaan siihen luvan USB-väylän isännältä. SuperSpeed-laitteilla vastaavat virrat ovat 150 mA ja 900 mA [1, kappale 11.4.1]. Yksityiskohtaiset tiedot USB-väylän sähköisistä ominaisuuksista löytyvät USB 2.0 -määrittelystä ja SuperSpeed-nopeuden osalta USB 3.0 -määrittelystä [2, kappale 7.1] [1, kappale 6.6].

2.3 USB 2.0-väylän fyysinentaso ja linkkitaso

USB 2.0 -väylässä kulkee neljä johdinta. Maa- ja käyttöjännitejohtimet, sekä kaksi johdinta informaation siirtoon. Dataa siirtävistä johtimista käytetään standardissa nimitystä D- ja D+. Datalinjat on yleensä kierretty pariiksi, vaikka hitain low-speed-määrittely ei sitä vaadikaan.

2.3.1 Ero- ja yksimuotoiset signaalit

USB-väylässä kaikki varsinainen tiedonsiirto tapahtuu eromuotoisesti. Low-, full- ja high-speed -versiossa käytetään lisäksi maajohtimeen verrattavaa yhteismuotoista signalointia väylän tilan välittämiseen. Kaikissa versioissa laitteet ja niiden nopeudet tunnistetaan yhteismuotoisesti. Datalinjojen nimellinen eromuotoinen impedanssi on 90Ω . Lähettimen impedanssi maahan nähden on 45Ω . Low- ja full-speed -versioissa käytetään 3 voltin TTL-logiikan kanssa yhteensopivia jännitetasoja. Looginen nolla on alle 0,3 V ja looginen yksi on 2,8-3,6 V. High-speed nopeudella jännitetasot ovat matalampia. Looginen yksimuotoinen nolla on $0V \pm 10mV$ ja yksi on $400 mV \pm 10 \%$.

2.3.2 Kaksisuuntainen liikenne yhdellä johdinparilla

USB 3.0 SuperSpeed versiossa tietoa voidaan välittää samanaikaisesti sekä isännältä laitteelle että laitteelta isännälle (protokollan sallimissa rajoissa). Hitaammissa versioissa on käytössä vain yksi johdinpari, jolloin dataa liikkuu kerrallaan vain yhteen suuntaan. Kun laitteelta siirretään isännälle päin tietoa, isäntä käskyy laitetta antamaan tietoa tietyn määrän, jonka jälkeen isäntä taas ottaa väylän haltuun.

Koska keskittimet toimivat myös toistimina väylällä, myös niiden täytyy ymmärtää väylän protokollaa siten, että ne osaavat valita oikean suunnan, johon signaaleja ajetaan.

2.3.3 Eromuotoisen datan binäärikoodaus

Eromuotoinen data on koodattu NRZI-koodauksella (Non return to zero inverted), eli tila '0' tarkoittaa että sähköinen signaali pysyy samana ja tila '1' aiheuttaa tilan muutoksen [2, kappale 7.1.8]. Lisäksi käytetään bittien täydennystä (bit stuffing) jossa jokaisen kuuden peräkkäisen '1' -tilan jälkeen väylälle lisätään yksi '0' -tila [2, kappale 7.1.9].

2.3.4 Signalointi

Isäntä tai keskitin tunnistaa porttiin kytketyn laitteen läsnäolon ja laitteen nopeuden D+ tai D- -linjan nousemisesta ylös. Isäntäpäässä on 15 k Ω alaspäinvetoastukset molemmissa linjoissa. Low-speed-laitteessa on 1,5 k Ω yläspäinvetoastus D- -linjasta 3,3 V käyttöjännitteeseen. Muissa nopeusluokissa yläspäinvetoastus on D+ -linjassa. Isännän käynnistyessä kytketyn laitteen tunnistus tapahtuu joko ennen nollaus signaalia (reset) tai vähintään 2,5 μ s nollauksen jälkeen. Nollaus signaali kestää vähintään 10 ms ja sen aikana molemmat datalinjat on vedetty alas loogiseen '0' -tilaan.

High-speed-laitteen tunnistus tapahtuu nollaus signaalin aikana. Aluksi high-speed-laite tunnistautuu full-speed-laitteeksi. Tämän jälkeen keskitin tai isäntä antaa nollaus signaalin, jonka aikana laite tunnistautuu uudelleen syöttämällä virtaa D- -linjaan. Väylällä tämä näkyy eromuotoisena '0'-tilana, jonka yhteismuotoinen jännite on full-speed keskitimen tai isännän näkökulmasta niin alhainen, että se tulkitaan nollaus signaaliksi. Signaalista käytetään nimeä "chirp K". High-speed-nopeutta tukeva keskitin tai isäntä vastaa tähän viestiin vielä vastaavalla sarjalla '0' ja '1' -tiloja. '1' -tila on määrittelyssä nimetty "chirp J:ksi". Chirp J:ssä syötetään virtaa D+ -linjaan. Laitteen lähettämä chirp K kestää 1 - 7 ms. Isännän lähettämässä sarjassa kukin chirp-tila kestää 40 - 60 μ s.

Signaloinnin osalta eromuotoinen looginen tila tulkitaan tiloiksi J ja K eri tavalla riippuen väylän nopeudesta. J-tila on väylän lepotila (idle). Tähän tilaan datalinjat asettuvat laitteen nopeuden tunnistamisessa käytettyjen vastusten ansiosta. Low-speed-laitteella J-tila on eromuotoinen '0' ja K on '1'. Muilla nopeusluokilla J on '1' ja K on '0'.

Low- ja full-speed-datapaketit alkavat aina synkronointikuviolla, jossa toistetaan ensin kolme kertaa tiloja K ja J, jonka jälkeen tulee kaksi K-tilaa. High-speed synkronoinnissa K- ja J-tiloja toistetaan 15 kertaa, minkä jälkeen tulee kaksi K-tilaa.

Synkronointikuvion ensimmäinen siirtymä lepotilasta K-tilaan tulkitaan paketin aluksi (Start of packet, SOP). Paketin loppu on merkitty yhteismuotoisella nollalla (Single ended zero, SE0), mikä on toteutettu siten, että molemmat datalinjat ajetaan loogiseen '0'-tilaan vähintään kahden bitin ajaksi. Tämän jälkeen väylä ajetaan lepotilaan.

USB-väylällä käytetään tarkistustiivistealgoritmiä (cyclic redundancy check, CRC), joka havaitsee varmasti kaikki yhden ja kahden bitin virheet vastaanotetussa paketissa sekä suurimman osan muista bittivirheistä. Ainoa osa väylän liikenteestä, jota ei ole suojattu tiivisteellä, on paketin tunniste (PID, packet identification). Se on pituudeltaan neljä bittiä ja se lähetetään aina sekä normaalina sanana että käännettynä sanana. Vastaanottaja varmistaa myös, että tunnisteen neljä bittiä vastaavat paketissa mukana olevia käännettyjä tunnistebittejä.

2.4 USB 3.0 -väylän fyysinentaso ja linkkitaso

USB 3.0 -väylä rakentuu kahdesta erillisestä väylästä; USB 2.0 -määrittelyn vanhemmasta väylästä ja 3.0-määrittelyssä esitellystä SuperSpeed väylästä. SuperSpeed-nopeutta tukevassa USB-johdossa on hitaampien versioiden johtimien lisäksi eromuotoiset lähetys- (SSTX+ ja SSTX-) ja vastaanottoparit (SSRX+ ja SSRX-), yhteensä siis 8 johdinta. SuperSpeed datalinjat on aina kierretty pareiksi ja parit on suojattu erikseen johtavalla (shielded) kuorella.

SuperSpeed-väylä tukee lähettämistä ja vastaanottamista samanaikaisesti (full-duplex). Osittain tästä johtuen isännän ja laitteen roolit on lähentyneet toisiaan määrittelyssä. Toinen syy on, että SuperSpeed laitteiden ei nykyisellään oleteta olevan erityisen edullisia. Koska SuperSpeed-nopeutta ei vielä tarvita ihan kaikkein halvimmissa laitteissa, voidaan laitteelta olettaa muutenkin parempaa laskentakapasiteettia kuin USB 2.0 -laitteilta.

Väylän eromuotoinen jännitetaso on nimellisesti $1 V_{p-p}$. Yhteismuotoinen jännite on nimellisesti $0 V$, koska lähetin on kytketty väylälle sarjakondensaattoreiden (AC-kytkentä) kautta. Linjakoodauksena käytetään 8b/10b koodausta [1, kappale 6.3]. Se tuottaa väylälle pitkän aikavälin kuluessa saman määrän '0' ja '1' -tiloja, eli väylän tasajännitteen pitäisi pysyä nollassa. Vastaanottimen terminointi ja epäideaalisuudet voivat silti tuottaa väylälle tasajännitteen. Määrittelyn mukainen terminointi voidaan toteuttaa datalinjoista maatasoon kytkettävillä 45Ω :n vastuksilla [1, kappale 6.8.3].

Laitteen tunnistus väylältä perustuu vastaanottimen terminoinnin tunnistamiseen lähettimen puolella. Tunnistamiseen käytetään yksinkertaisesti lähettimen sar-

jakondensaattorin ja vastaanottimen terminoinnin muodostamaa RC-viivettä.

Virrankulutuksen minimoimiseksi väylälle on määritelty myös vähävirtainen lepotila (low power state). Lepotiloja on kolme eri tasoista. Matalimman virrankulutuksen tilasta U3 herätään laitteen tunnistuksen kautta siten, että U3-tilassa vastaanottimen terminointi on auki. Tilojen U1 ja U2 aikana väylällä ei liiku dataa ja väylän eromuotoinen jännitetaso on nolla. U0-tila on normaali toimintatila. U1 ja U2 tiloissa käytetään matalataajuisia jaksotettuja viestejä (low frequency periodic signaling, LFPS). LFPS:n käyttämä taajuus on 10-50 MHz ja jännitetasoina käytetään samoja arvoja kuin normaalisti. LFPS-viestien koodaus on toteutettu käyttämällä eri mittaisia purskeita. Herääminen normaaliin toimintatilaan U0 tapahtuu näiden LFPS-viestien avulla. LFPS-viestien lähetys ja vastaanotto kuluttaa vähemmän energiaa kuin normaali täydellä nopeudella toimiva liikenne. Väylän ollessa U0-tilassa, molempien päiden lähettimet lähettävät koko ajan. Jos laitteella tai isännällä ei ole mitään lähetettävää, lähetetään merkkiä 0, joka koodataan normaalisti 8b/10b -koodauksen mukaiseksi 10 bittiseksi symboliksi.

2.5 USB-laitteiden välinen kommunikointi

Alkuperäinen USB 2.0 -määrittely ei mahdollista kahden laitteen välistä tiedonsiirtoa ilman USB-isännän aktiivista datan välittämistä laitteiden välillä. Isäntä-orjallia perusteltiin alkujaan sillä, että laitteet voidaan pitää yksinkertaisina, kun kaikki äly keskitetään isäntään. Nykyisin myös monissa USB-laitteissa on laskentakapasiteettia niin paljon, että USB-oheislaitteiden käyttö niiden kanssa alkaa olla perusteltua. Kuluttajalaitteista esimerkiksi suoraan kamerasta voidaan haluta tulostaa kuvia tulostimelle ilman tietokonetta. Useimmiten kuitenkin halutaan siirtää kamerasta kuvia tietokoneelle. Myös lääketieteellisissä mittauksissa voidaan myös haluta tulostaa suoraan itsenäisestä mittalaitteesta tai vaihtoehtoisesti siirtää mitausdataa tietokoneelle jatkokäsittelyä varten.

USB 2.0 -määrittelyä täydennettiin vuonna 2001 USB OTG (On-The-Go) -määrittelyllä. Viimeisin versio määrittelystä on 2.0 [6]. Siinä kuvataan, kuinka älykäs laite voi vaihtaa roolinsa myös isännäksi. USB-laitteissa käytetään aina B-tyyppin liitintä. Isännissä ja keskittimien alavirran porteissa käytetään A-tyyppin liittimiä. Näin on es-

tetty laitteiden väärä kytkentä. Liittimistä on määritelty myös pienemmät mini- ja mikromallit. Roolia vaihtavassa laitteessa on aina käytettävä mikro-AB-liitintä. Micro-USB-liittimet eroavat isommista USB-liittimistä siten, että niissä on viisi kontaktia. Viides kontakti on kytketty aina B-tyypin johtoliittimessä maatasoon ja A-tyypin johtoliittimessä se on jätetty kellumaan. Mikro-AB-liittimeen sopii fyysisesti sekä mikro-A- että mikro-B-tyypin johtoliittimet. Muutoin laitteen tunnistaminen tapahtuu kuten normaalisti. Kytkettäessä kaksi OTG-määrittelyn mukaista USB-laitetta toisiinsa isännäksi valikoituu A-tyypin johtoliittimeen kytketty laite. Roolit voivat kuitenkin vaihtua, jos alkuperäinen isäntä päästää väylän lepotilaan (suspend). Tällöin alkuperäinen orjalaite voi pyytää lupaa ryhtyä isännäksi HNP-protokollalla (Host Negotiation Protocol). Orjalaite poistaa D+ -linjalta ylösvetovastuksen. Isännälle se näkyy laitteen poistona. OTG määrittelyn mukaan isännän pitää tässä vaiheessa kytkeä oma D+ -linjan ylösvetovastus aktiiviseksi. Alkuperäinen orja havaitsee tässä vaiheessa uuden laitteen väylällä ja ryhtyy sille isännäksi. Muutoin toiminta tästä eteenpäin on normaalia, mutta alkuperäinen isäntä jatkaa väylän sähkönsyöttäjänä.

2.6 Muut tietokoneiden oheislaitteväylät

USB-väylän lisäksi tietokoneissa on nykyisin aina lähiverkkoliityntä. Lähiverkko on alkujaan tarkoitettu tietokoneiden väliseksi yhteydeksi, mutta yleisyytensä johdosta sitä käytetään myös oheislaitteiden kytkemiseen. Käytöltään lähemmäksi USB:tä asettuu Firewire-väylä, mutta se ei ole aivan yhtä yleinen kuin USB.

2.6.1 Firewire-väylä

Apple (Apple Computer, Inc.) kehitti 1990 luvun alkupuolella sarjamuotoisen väylän, jonka maksiminopeus on 400 Mb/s. Vuonna 1995 IEEE standardoi väylän. Standardin nimi oli IEEE 1394-1995. Myöhemmin standardista on tehty myös b-versio, joka mahdollistaa jopa 3,2 Gb/s siirtonopeudet. Viimeisin versio standardista on nimeltään IEEE 1394-2008 [7]. Firewire -nimi on Applen omistama tavaramerkki. Muita nimiä, joilla väylä tunnetaan ovat i.Link (Sony), Lynx (Texas Instruments) ja IEEE 1394.

Firewire-väylä on suosittu digitaalisissa videokameroissa ja tallennusmedioissa. Topologiaaltaan se on ketjutettava, eli laitteet laitetaan yhteen ketjuun. Ketjutus on joissain sovelluksissa hyvä asia, koska silloin ei tarvita erillisiä keskittimiä. Toisaalta tämän työn kannalta ketjutettavuus on huono asia, koska jokaisen laitteen molemmat portit pitäisi suojaeristää. Myös keskittimiä on olemassa, eli kaksi porttia ei ole pakollinen ominaisuus.

Liitynnän toteuttaminen Firewire-väylään ei ole aivan yhtä edullista kuin USB-väylässä. Väylän ketjutopologia vaatii useisiin laitteisiin kaksi porttia ja koska laitteet voivat keskustella myös ilman isäntää, vaaditaan väyläohjaimelta enemmän. Aiemmin Firewire-laitteilta vaadittiin porttikohtaista lisenssimaksua, mutta nykyisellään väylän käyttö on ilmaista [8]. Lisäksi Firewire ei ainakaan vielä ole yleistynyt niin, että se olisi kaikissa uusissa tietokoneissa. Väylän standardin mukaan väylän virransyöttökyky on enintään 45 wattia.

2.6.2 Lähiverkko

Lähiverkko eli Ethernet on pitkän historiansa ansiosta laajalle levinnyt tekniikka. Yleisimmin käytössä oleva nopeus on 100 Mb/s ja 1 Gb/s yleistyy myös nopeasti. Ethernet-standardi vaatii myös suojaerotuksen [9, Kappaleet 14.3.1.1, 23.5.1.1 ja 40.6.1.1]. Ethernet-portin toteutukseen liittyvät komponentit on edullisia suurten valmistusmäärien ja toimivan kilpailun ansiosta. Ethernetin käytöstä ei myöskään tarvitse maksaa lisenssimaksuja. Ethernetin käyttökustannuksia nostaa kuitenkin suhteellisen vaativa protokollapino. Lisäksi vanhemmissa Ethernet-standardeissa ei ole otettu kantaa sähkönsyötöön. IEEE määritteli vuonna 2003 Ethernet standardiin myös sähkönsyötön samalla kaapelilla, josta käytetään nimeä PoE (Power over Ethernet) [9, Luku 33]. PoE -tekniikka ei ole kuitenkaan yleistynyt siinä määrin, että sitä voisi kutsua edulliseksi ainakaan samalla tavalla kuin USB:tä.

2.7 Langattomat yhteydet

Langattomien laitteiden helpon liikuteltavuuden ansiosta kahden laitteen välille luotettava yhteys on vaikeampi toteuttaa kuin johdollisen yhteyden tapauksessa. Suoran yhteyden muodostamiseksi eri laiteparit voivat käyttää esimerkiksi eri taajuuk-

sia. Nykyään yleisempi tapa on, että kaikki laitteet käyttävät samoja, mahdollisesti vaihtuvia, taajuuksia. Kahdenkeskiset yhteydet muodostetaan yhteisesti sovitun protokollan mukaisesti. Esimerkiksi Bluetooth käyttää tätä lähestymistapaa [10].

Langattomia yhteyksiä on erittäin helppo salakuunnella verrattuna langallisiin yhteyksiin. Langatonta liikennettä voidaan salakuunnella ilman fyysistä yhteyttä mihinkään kuunneltavaan osaan. Salakuuntelun helppouden vuoksi kaikissa uusissa yleiskäyttöisissä langattomissa yhteyksien määrittelyissä on mukana mahdollisuus salaukseen.

2.7.1 Langaton USB

USB Implementers Forum on määritellyt vuonna 2005 USB 2.0:n rinnalle langattoman siirtotien [11]. Määrittelyn mukaan tiedonsiirtoon käytetään hyvin laajakaisista radiota, UWB:tä (ultra wide band). Sen on määritellyt WiMedia Alliance ja sitä käytetään myös muissa langattomissa tekniikoissa [12, 13]. Käytettävä taajuuskaista on 3,1-10,6 GHz. Nimellisaika on suurimmillaan 480 Mb/s. Väylän rakenne eroaa langallisesta USB:stä siinä, että keskittimiä ei ole muita kuin isännän yhteydessä. Kaikki laitteet yhdistetään suoraan langattomaan isäntään radioyhteydellä. Langaton isäntä voi kuitenkin itse olla langallinen laite. Samoin langattomana laitteena voi toimia langallinen keskitin, johon puolestaan voi kytkeä normaalin langallisen USB 2.0:n määrittelyn mukaisia laitteita ja keskittimiä. Langattomat laitetypit on esitelty langattoman USB:n määrittelyssä [11, kappale 3.9]. USB 3.0 -määrittelyn SuperSpeed versiota ei ole mainittu langattoman USB:n määrittelyssä, koska USB 3.0 -määrittely valmistui myöhemmin. Lisäksi langattoman USB:n nopeus rajoittaisi SuperSpeed laitteiden tiedonsiirtonopeuden USB 2.0 high-speed -tasolle tai alemmaksi.

Myös muut tahot ovat toteuttaneet USB:stä langattomia versioita, mutta ne eivät ole yleistyneet yksittäisten valmistajien tuotteita laajemmalle. Nimien samankaltaisuuden aiheuttamien sekaannusten vuoksi USB Implementers Forum on päättänyt kutsua oman määrittelynsä mukaisia laitteita nimellä Certified Wireless USB. Kaupallisesti langattomat USB-väylätoteutukset eivät ole vielä yleistyneet. Helmikuussa 2010 suuressa suomalaisessa verkkokaupassa, verkkokauppa.com:ssa

(<http://verkkokauppa.com/>) oli myynnissä kaksi langattoman USB määrittelyn mukaista tuotetta. Langaton Belkin merkinen keskitin oli hinnastossa, mutta saatavuudesta ei ollut tietoa. Q-Waves merkinen mediatoistin oli saatavissa heti hintaan 109,90 €. Mediatoistimen mukana tulee langalliseen USB-väylään kytkettävä langaton isäntä. Langaton USB on nykyisin vielä kallis USB tai muihin langattomiin tekniikoihin verrattuna.

2.7.2 Bluetooth

Bluetooth on Ericssonin kehittämä langaton henkilökohtainen lähiverkko kannettavien laitteiden liittämiseen. Nykyään Bluetooth-standardia kehittää Bluetooth SIG. Määrittelyn viimeisin versio on 4.0 [10].

Bluetooth soveltuu käytettäväksi sairaalassa pienen lähetystehonsa ansiosta. Lisäksi pieni lähetysteho tarkoittaa pientä virrankulutusta, joka on langattomissa tekniikoissa oleellista akkukäyttöisyyden vuoksi. Tällä saralla on vielä odotettavissa huomattavasti kehitystä, koska matkapuhelinten valmistajat käyttävät aktiivisesti Bluetoothia ja ovat painostaneet voimakkaasti sen kehittämiseen mahdollisimman virtapihiksi. Bluetooth-määrittelyssä on myös low energy -versio [10, nide 1, luku 1.2]. Radiotien luotettavuuden parantamiseksi Bluetoothissa käytetään taajuushyppelyä (frequency hopping). Taajuushyppelyn ansiosta yhdellä taajuudella esiintyvä häiriö ei estä langattoman yhteyden käyttöä.

Langattomuuden ansiosta laitteiden varsinainen kytkeminen on verrattoman helppoa ja turvallista. Langaton tiedonsiirto tarjoa luontaisesti täydellisen suojaerotuksen, koska mittalaitteen ja anturilaitteen väliin voi jäädä useita metrejä etäisyyttä. Bluetoothille onkin kaavailtu monia käyttötarkoituksia sairaalaympäristössä [14]. Toisaalta kaikki sähkömagneettinen säteily vaikuttaa herkkiin mittauksiin. Usein langattomat tekniikat aiheuttavat enemmän sähkömagneettisia häiriöitä kuin vastaavan tiedon välittämiseen tarkoitettu langallinen tekniikka. Hyvä esimerkki langattomien laitteiden aiheuttamista sähkömagneettisista häiriöistä on GSM-puhelin, jonka radiolähttimen aiheuttamia häiriöitä kuuluu usein puhelimen lähellä olevista äänentoistolaitteista.

2.7.3 Langaton lähiverkko

Langaton lähiverkko (WLAN) on IEEE:n standardoima [15]. Standardi määrittelee useita eri nopeuksia välille 1-54 Mb/s, kun käytetään 2.4 GHz maksutonta ISM-kaistaa (Industrial, Scientific and Medical). Standardin mukaan myös 5 GHz kaistan käyttö on mahdollista [15, luku 17]. Langaton lähiverkko soveltuu Bluetoothin tapaan sairaalaympäristöön sellaisenaan. Se on nopea ja omaa kohtuullisen pienen lähetystehon. Langaton lähiverkko on mahdollista tehdä niin laajaksi, että se kattaa koko sairaalan alueen, sillä yhteys voidaan säilyttää lähiverkon solusta toiseen siirryttäessä.

Koska kyseessä on lähiverkkotekniikka, ohjelmistoille langaton lähiverkko näkyy samalla tavalla kuin langallinen lähiverkko. Tämä tuo joustavuutta käyttöön, koska käyttäjä voi valita tilanteen mukaan langallisen tai langattoman yhteyden.

2.8 Yhteenveto

Tässä luvussa esiteltiin USB-väylä yleisesti sekä tärkeimmät ominaisuudet, jotka vaikuttavat suojaerotuksen toteutukseen. USB-väylä on sarjamuotoinen half-duplex-väylä. USB-laitteilla on mahdollisuus ottaa myös käyttösähkösä USB-väylältä. Lisäksi tähän lukuun koostettiin suojaerotuksen toteutukseen liittyvät yksityiskohdat USB-väylän eri versioiden määrittelyistä. Luvussa esiteltiin lyhyesti myös muut yleiset väylät ja langattomat yhteydet.

Seuraavassa luvussa perustellaan suojaerotuksen tarpeellisuus sekä esitellään suojaerotuksen toteutus teoriassa.

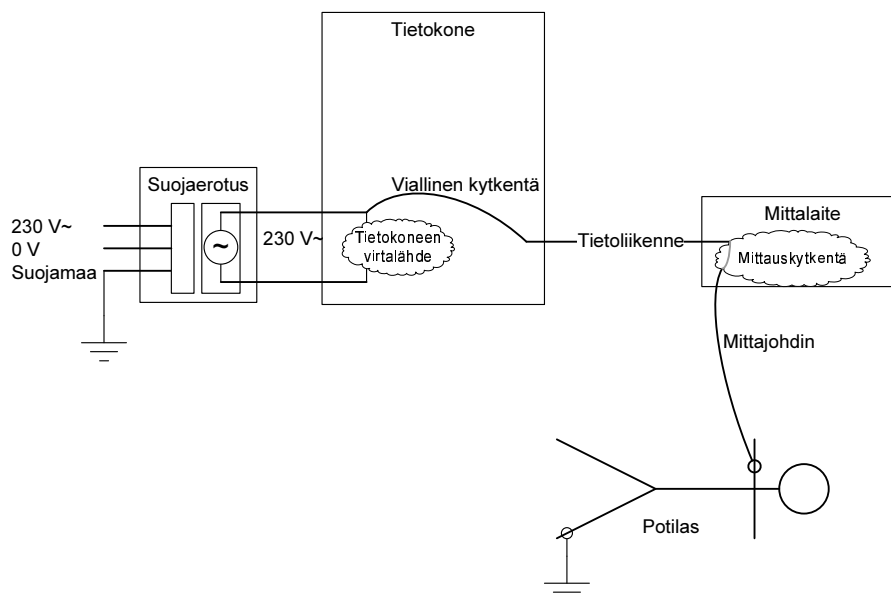
3. SUOJAEROTUS

Suojaerotus tarkoittaa kahden sähköisen piirin galvaanista erottamista. Piireillä ei ole johtimella toteutettua yhteyttä, joten niiden vertailutasot (maatasot) kelluvat toisiinsa nähden. Suojaerotettu puoli kelluu myös maahan nähden. Suojaerotetut kytkennät ovat kuitenkin yhteydessä toisiinsa siten, että sähköenergia ja sähköinen informaatio siirtyy niiden välillä. Esimerkiksi muuntajalla voidaan toteuttaa suojaerotus, jonka läpi kulkee sähköenergiaa. Muuntajan ensiö- ja toisiopuolten vertailutasot ovat irti toisistaan ja kuitenkin vaihtovirta kulkee muuntajan läpi. Tässä työssä keskitytään sähköisen informaation siirtämiseen suojaerotuksen yli.

3.1 Suojaerotuksen hyödyt potilasmittauksissa

Suojaerotuksen tärkein ominaisuus on turvallisuuden parantuminen. Laitteen vikaantuessa siten, että laitteen kuoreen tai muuhun kosketeltavissa olevaan osaan kytkeytyy jännite, suojaerotus katkaisee virtapiirin, joka muutoin muodostuisi kuoren ja käyttäjän kautta maatasoon ja jännitelähteen välille. Esimerkki on annettu kuvassa 3.1. Kuvassa suojaerotus on toteutettu laitteen käyttösjähkölle, mutta maataso voisi yhtä hyvin kytkeytyä myös jonkin tiedonsiirtokanavan kautta, esimerkiksi maadoitetun tulostimen ja sen USB-kaapelin kautta. Tämän riskin minimoimiseksi potilasmittauksiin tarkoitettuihin tietokoneisiin ei saa jättää ulkoisia portteja, joihin voisi kytkeä lääkintäkäyttöön hyväksymättömiä laitteita [16].

Lääkintälaitteiden osalta pitää huomata, että suojaerotuskaan ei suoja sähköiskulta kaikissa tilanteissa. Jos käyttäjä pääsee koskemaan yhtä aikaa sekä suojaerotettuun käyttöjännitteeseen että suojaerotettuun maatasoon, syntyy käyttäjän läpi kulkeva virta. Tämä riski voidaan eliminoida suojaeristämällä laite. Silloin kun mitta-anturia tai muuta vastaava kohtaa ei voida suojaeristää riittävän hyvin, täytyy kyseisen kytkennän virta rajoittaa riittävän pieneksi. Erityisesti mittajohtimien



Kuva 3.1: Esimerkki avoimesta virtapiiristä, jossa suojaerotus estää käyttäjää saamasta sähköiskua

suojaerityksen riittävyttä pohdittaessa pitää ottaa huomioon myös suojakuoren haurastuminen sen ikääntyessä. Kontakti potilaaseen voi syntyä myös pienen halkeaman kautta.

Potilasmittauksissa suojausten tärkeys kasvaa, koska potilas ei aina kykene kertomaan sähköiskun aiheuttamasta kivusta ja pienenkin virran aiheuttama vahinko voi kasvaa isoksi. Lisäksi kuiva iho on erinomainen eriste ja yleensä se suojaa ihmisiä. Lääkintämittalaite saattaa kuitenkin olla kytketty tiukasti potilaaseen, jolloin pienikin jännite saattaa aiheuttaa potilaan kudoksiin vaarallisen suuren virran. Mittalaite voi olla jopa ihon alla, jolloin sähköinen kontakti potilaan verenkiertoon ja sydämeen on erikoisen hyvä. Ihon eristävyyttä on helppo havainnollistaa tavallisella yhdeksän voltin paristolla. Kuivin käsin sähköiskua ei tunne lainkaan, mutta koskettaessa pariston molempia napoja yhtä aikaa kielellä sähköisku tuntuu jo epämiellyttävältä. Kielessä iho on ohuempi ja kosteampi kuin esimerkiksi käsissä.

Suojaerotus parantaa myös mittaustarkkuutta, koska se poistaa kaikki maavirtalenkit, jotka kulkisivat suojaerotuksen kautta. Maavirta syntyy, kun kahden eri maatason välillä on jännite ja ne kytketään toisiinsa. Jännite-ero aiheuttaa virran nollajohtimeen ja virta yhdessä johtimen resistanssin kanssa aiheuttaa jännitteen.

Maatasojen jännite-erot näkyvät mittauksissa suoraan virheenä, jos maatasoa käytetään myös vertailutasona. Maavirrasta saattaa myös indusoitua virhettä mittaukseen. Jos lähistöllä olevat laitteet kuluttavat paljon virtaa tai mittauksissa käytettävät johtimet ovat erityisen pitkiä, maavirta saattaa kasvaa palovaarallisen suureksi. Tästä syystä teollisuuden kenttäväylät ovat yleensä suojaerotettuja. Lisäksi kelluvien väylien suojaaminen isoilta yhteismuotoisilta jännitepiikeiltä on helpompaa, koska suojauksen liipaisujännite voidaan jättää paljon korkeammaksi.

Suojaerotukselle oleellimmat hyvyyden mittarit on jännitekestoisuus, vuotovirta ja tietenkin kytkennän luotettava toiminta. Jännitekestoisuus määrittelee suurimman jännitteen erotettujen puolien välille, jolla vuotovirta pysyy määritellyissä rajoissa. Jännitteen kasvaessa läpilyönnin todennäköisyys kasvaa. Jännitekestoisuus määräytyy suojaerotuksen toteuttavien komponenttien eristeistä ja erotettujen puolien fyysisestä etäisyydestä. Lisäksi likaisella ja kostealla pinnalla läpilyönti tapahtuu matalammalla jännitteellä kuin kuivan ilman läpi. Vuotovirta kulkee myös suojaerotettujen puolien välillä olevan kapasitanssin kautta. Yleensä suojaerotuskytkentöjen kapasitanssi pyritään minimoimaan.

3.2 Suojaerotuksen vaatimukset sairaalaympäristössä

Sähkökäyttöisten lääkintälaitteiden yleiset turvallisuusvaatimukset on määritelty IEC 60601-1 standardissa [16]. Potilaaseen kytkettäviltä mittalaitteilta vaaditaan tavanomaisen peruseristyksen lisäksi lisäeristys tai kaksoiseristys. Peruseristyksen vikaantuessa lisäeristys on vielä toiminnallinen. Tämä on linjassa lääkintälaitteilta vaadittavan yhden vian säännön kanssa. Yksi vika tai viallinen komponentti ei saa vaarantaa potilasta tai muita henkilöitä.

Eristykseltä vaadittava jännitekestoisuus määräytyy laitteen korkeimman käyttöjännitteen mukaan. 230 V verkkovirralla toimivien laitteiden eristyksen jännitekestoisuuden pitää olla vähintään 4 kV_{RMS} . Suojaerotuksen yhteydessä eristys on suojaerotettujen puolien välissä. Tällöin se estää vaarallisen jännitteen kytkeytymisen yhden vian tapauksessa varsinaiseen mittauskytkentään.

Läpilyöntien ehkäisemiseksi käytettävien komponenttien jännitekestoisuuden lisäksi kytkentää tehdessä pitää huolehtia, että suojaerotettujen puolien väliin jää

kaikkialla riittävä etäisyys. Verkkovirralla toimivan ja suojaerotetun kytkennän väliin pitää jäädä vähintään 8 mm pintaväli ja 5 mm ilmaväli. Pintaväli tarkoittaa komponentin tai piirilevyn pintaa pitkin mitattua suojaerotettujen puolien etäisyyttä. Ilmaväli on puolestaan suorin mahdollinen reitti tällä välillä. Suojaerotuksen rajapinta pyritään yleensä tekemään mahdollisimman suoraksi, jotta ilma- ja pintavälin tuoma kytkennän fyysisen koon kasvu pysyisi mahdollisimman pienenä. Pintaväliä käytetään piirilevyn suunnittelussa. Jos riittävää pintaväliä ei pystytä jostain syystä toteuttamaan, voidaan pintaväliä kasvattaa tekemällä piirilevyn aukko. Aukon kohdalla pintavälin mittauksessa käytettävä reitti pitenee. Ilmavälin on tällöin jäätävä riittäväksi.

3.3 Väylien suojaerotus

Väylä on tietokoneiden komponenttien tai oheislaitteiden väliseen tiedonsiirtoon tarkoitettu yhteys. Tietokoneen sisäisten komponenttien välillä ei yleensä tarvita suojaerotusta. Usein väyliin lasketaan kuuluvaksi mukaan myös virran syöttö.

Väylien suojaerotus eroaa yksittäisten signaalien suojaerotuksesta siinä, että väylässä tieto liikkuu yleensä molempiin suuntiin. Lisäksi väylä saattaa koostua suures-takin määrästä signaaleja. Nykyisin suuntauksena on käyttää joko yhtä half-duplex -signaalia tai kahta erillistä simplex -signaalia, jolloin kaikki informaatio liikkuu sarjamuotoisesti. Nykyisellä tekniikalla on usein edullisempaa toteuttaa yksi nopea signaalitie kuin monta rinnakkaista hitaampaa. Lisäksi vähemmän johtimia sisältävä väylä on usein luotettavampi, koska liittimissä on vähemmän kontakteja. Nykyisin useimmissa väylissä käytetään eromuotoisia signaaleja. Ne kestävät paremmin ulkoisia häiriöitä yhteismuotoisiin signaaleihin verrattuna. Lisäksi eromuotoiset signaalit tuottavat yleensä vähemmän sähkömagneettisia häiriöitä.

3.4 Suojaerotuskomponentit

Suojaerotus voidaan toteuttaa kolmella tavalla: muuntajalla, optoerottimilla tai kapasitanssilla. Teoriassa myös muilla tavoilla voidaan siirtää energiaa ja informaatiota suojaerotuksen yli, esimerkiksi ääni tai muu mekaaninen värähtely voisi tulla kyseeseen. Käytännön asteelle muita tekniikoita ei ole vielä tuotu.

3.4.1 Muuntaja

Muuntaja on näistä vaihtoehtoista monipuolisin. Se soveltuu laajalle taajuuskaistalle ja suurelle tehoalueelle. Muuntajan läpi voidaan siirtää energiaa ja informaatiota molempiin suuntiin. Nykyisin korkein kaupallisesti käytössä oleva Ethernet-nopeus on 10 Gb/s, johon on valmiita kaupallisia muuntajia suojaerotukseen. Muuntaja soveltuu huonosti matalilla taajuuksille, sillä muuntajan kokoa täytyy kasvattaa siirrettävän taajuuden laskiessa. Tasavirralla muuntaja ei toimi ollenkaan. Muunta- ja erotetuissa käyttösähkönsyötöissä käytetäänkin yleensä hakkurikytkentää, jolloin muuntajan yli siirrettävä taajuus voidaan nostaa kymmeneen tai satoihin kilohertzeihin. Muuntajan ensiöpuolen virran muutos aiheuttaa muuntajan sydämeen magneettivuon. Muuttuva magneettivuo puolestaan aiheuttaa toisiokäämiin sähkömotorisen voiman, eli suljetun virtapiirin tapauksessa virran. Ensiö- ja toisiopuolen välistä kytkentää kuvataan keskinäisinduktanssilla. Keskinäisinduktanssiin vaikuttaa käämien geometria ja magneettivuota välittävä sydän.

3.4.2 Optoerotin

Optoerotin on komponentti, joka muuttaa sähköisen signaalin ensin valoksi, joka kulkee suojaerotuksen yli. Erotuksen toisella puolella valoilmaisin palauttaa sähköisen signaalin. Sähköisesti komponentissa on kaksi puolta - toisella puolella on sähkö-valo-muunnos ja toisella puolella on valo-sähkö-muunnos ja välissä on eriste. Yleensä optoerotin valolähteenä on loistediodi, LED, (light emitting diode) ja vastaanottimenä valoherkkä transistori tai diodi. Tieto kulkee optoerotin läpi vain yhteen suuntaan. Tieto saadaan kulkemaan molempiin suuntiin vain, kun käytetään kahta erillistä optoerotinta. Half-duplex -signaalien tapauksessa kytkentä ei ole aivan näin yksinkertainen, sillä rinnakkain eri päin kytketyt optoerotimet muodostavat bistabiilin lukkokytkennän. Half-duplex -signaalien suojaerottaminen yksisuuntaisilla erottimilla vaatii aina jonkilaisen suunnanpäättelylogiikan.

3.4.3 Kondensaattori

Kondensaattorin napojen välillä ei ole galvaanista yhteyttä. Toisin sanoen signaali- ja maaajohtimiin laitetut sarjakondensaattorit toimivat myös suojaerotuksena, mutta vain erittäin matalilla taajuuksilla. Kondensaattorin reaktanssia kuvataan kaavalla $X_c = \frac{1}{2\pi fC}$, missä f on signaalin taajuus ja C kapasitanssi. Kapasitiivisessa suojaerotuksessa kondensaattorin kapasitanssi pyritään minimoimaan, jotta vuotovirrat pysyisivät pieninä. Tällöin hyötysignaalin pitää olla korkeataajuuksinen, ettei se vaimene liikaa sarjakondensaattorin reaktanssin takia. Käytännössä kapasitiiviset suojaerotukset tehdään siten, että korkeataajuuksinen signaali moduloidaan hyötysignaalilla ja tämä signaali viedään suojaerotuksen yli. Saman kondensaattorin yli voidaan kuljettaa useita signaaleja moduloimalla signaalit eri taajuuksille. Myös pienitehoinen käyttösähkö voidaan kuljettaa näin [17]. Kapasitiivisen suojaerotuksen etu muihin tekniikoihin verrattuna on sen koko. Pienen kapasitanssin aikaansaamiseksi tarvitaan pieni pinta-ala.

Teoriassa kondensaattorisuojaerotus on mahdollista toteuttaa myös ilman modulointia sellaiseen yhteyteen, jonka vastaanottimen impedanssi on todella korkea. Korkea impedanssi rajoittuu kuitenkin vain vastaanottimen lähelle, koska johtimessa on aina rajallinen impedanssi. Tämä yksinkertainen tekniikka soveltuu käytännössä vain yksisuuntaiseen liikenteeseen tai vain joidenkin millimetrien etäisyyksille. Käytännön sovelluksia ei ole toteutettu tällä tekniikalla, mutta tulevaisuudessa tätä voidaan ehkä soveltaa.

3.4.4 Optiset kuidut

Optisten kuitujen käyttö on yleistynyt nopeasti erityisesti pitkien matkojen tiedonsiirrossa. Kuituyhteyttä käytettäessä datatien suojaerotus on aina olemassa. Optisten lähetinvastaanottimien korkea hinta on vielä toistaiseksi rajannut kuitujen käytön vähemmän hintaherkkiin kohteisiin. Eniten kuituyhteyksiä käytetään Ethernet-tekniikan kanssa. Teollisuudessa käytetään myös laitteiden sisäisiä optisia kaapelointeja. Nämä on mahdollista toteuttaa edullisesti esimerkiksi erilliskomponentein. Yksisuuntaisen yhteyden rakentamiseen tarvitaan yksinkertaisimmillaan sopivasti muotoillut LED ja valoherkkä transistori sekä niiden väliin sopiva valojohde tai -

kaapeli. Rakenne on siis sama kuin optoerottimessa. Optiset kaapelit poistavat samalla sähkömagneettista yhteensopivuutta (EMC) heikentävän rajapinnan, koska optinen kuitu ei säteile eikä siihen myöskään kytkeydy sähkömagneettiset aallot.

3.5 Yhteenveto

Tässä luvussa esiteltiin perustelut suojaerotuksen tarpeellisuudelle sekä sairaalaympäristön sille asettamat erityisvaatimukset. Suojaerotus lisää potilasturvallisuutta erityisesti laitteen vikaantuessa. Lisäksi lueteltiin erilaiset suojaerotuksen toteuttavat komponentit ja kuvattiin niiden toiminta. Muuntajan läpi dataa voidaan siirtää molempiin suuntiin, mutta sillä on aina alarajataajuus, mitä matalampia taajuuksia sen läpi ei saa siirrettyä. Optoerotin on aina yksisuuntainen komponentti, mikä tekee half-duplex-väylän suojaerotuksesta monimutkaisemman. Kondensaattorisuojaerotus on käytännössä toteutettava moduloidulla signaalilla. Modulointi tekee myös siitä yksisuuntaisen. Optisilla kuiduilla toteutetut väylät ovat datansiirron osalta aina suojaerotettuja. Niiden korkea hinta on kuitenkin toistaiseksi estänyt niiden yleistymisen tietokoneiden oheislaitteiden kytkemisessä.

Seuraavassa luvussa vertaillaan eri komponenttien soveltuvuutta USB-väylän suojaerottamiseen. Myös kaupallisesti tarjolla olevien USB-suojaerotuslaitteiden ja -komponenttien tarjontaan tutustutaan.

4. TOTEUTUSVAIHTOEHDOT

USB-väylää suunniteltaessa ei erityisesti otettu huomioon, että sitä käytettäisiin sairaala- tai teollisuusympäristössä. Se suunniteltiin kotitietokoneen oheislaitteväyläksi. Jos väylää suunniteltaessa olisi otettu huomioon suojaerotus, niin suojaerotuksen toteuttaminen olisi voitu tehdä helpommaksi. Nyt väylässä on yhdistelty erilaisia signalointitapoja siinä määrin, että suojaerotuksen toteuttaminen on hankalaa. Samoissa johtimissa kulkee molempiin suuntiin (half-duplex) sekä yhteis- että eromuotoisia signaaleja.

4.1 Tarjolla olevat kaupalliset USB:n suojaerotusratkaisut

B&B Electronicsilla (<http://www.bb-europe.com/>) on tarjolla USB keskitin, jonka ylävirran portti on optisesti erotettu 2,5 kV jännitekestoisuudella. Tuotteen malli on UISOHUB4. Alavirran portit, 4 kappaletta, toimivat keskenään samassa maapotentiaalissa. Kyseinen laite soveltuu tavanomaisten PC-oheislaitteiden tuomiseen teollisuusympäristöön. Potilasmittauksissa vaaditaan kuitenkin 4 kV jännitekestoisuus. Lisäksi alavirran portit pitää olla erotettu toisistaan, jos mittalaitteiden halutaan olevan toisistaan riippumattomia. B&B Electronicsilla on myös yksiporttinen USB:n suojaerotusmoduuli UH401. Tämän luvataan täyttävän standardin EN60601 Medical electrical equipment vaatimukset, eli se kelpaa sellaisenaan potilasmittalaitteiden suojaerotukseksi. Tuotteen hinta on 101,30 €[18]. Valmistaja ei kerro kuinka laite on toteutettu. Todennäköisesti modulin sisällä on USB keskitin, josta on käytössä vain yksi alavirran portti. Tämän voi päätellä laitteen tarjoamasta käyttösjähköstä, joka on 100 mA, kun laite on kytketty keskittimeen tai isäntään, joka tarjoaa enemmän kuin 100 mA. Laite itse ottaa oman käyttösjähkonsä ylävirrasta. USB 2.0 määrittelyn mukaan väylältä käyttösjähkonsä ottava keskitin voi tarjota alavirran portteihin ainoastaan 100 mA. Keskitin, jolla on erillinen sähkönsyöttö, voi tarjota

alavirran portteihin maksimissaan 500 mA. Tuettuna on vain full-speed nopeus, eli 12 Mb/s.

IF tools -niminen yritys tarjoaa vastaavaa laitetta (<https://iftools.com/isousb/index.en.php>) hintaan 198 €, hinta ilman arvonlisäveroa. Erona on tuki myös low-speed-nopeudelle 1,5 Mb/s ja laitteen erotus on mitä ilmeisemmin tehty ilman keskittintä. USB-johtimien suurimmaksi pituudeksi ilmoitetaan 2 metriä. USB-määrittelyn mukaan johdon maksimipituus laitteen ja keskittimien välillä on 5 metriä. Muutoin signaalin etenemisviive kasvaa liian suureksi [2, kappale 7.1.14.1] [2]. Ylä- ja alavirran johtimien lisäksi IF toolsin laitteen suojaerotus aiheuttaa viivettä.

Joitakin muita valmiita suojaerotuksia USB-väylään löytyy. Internetistä saatujen tietojen perusteella ne ovat hyvin samankaltaisia B&B Electronicsin ja IF toolsin tuotteiden kanssa.

Valmiiden laitteiden lisäksi Analog Devices tarjoaa integroitua piiriä USB-väylän suojaerotukseen [19]. Valmistajan mukaan suojaerotus on lääkintälaitteikäyttöön riittävä, kun käyttöjännite on alle 125 Vac. Piiri tukee low- ja full-speed nopeuksia ja se voidaan kytkeä hyvin yksinkertaisesti laitteen sisälle USB-väylän datajohtimiin. Sisäisesti piirissä on käytetty muuntajia suojaerotuksessa. Aktiivisten puskureiden (vahvistimien) suunta päätellään aina paketin alkaessa. Väylän ollessa lepotilassa (symboli J) ylä- ja alavirran vahvistimet ovat korkeaimpedanssisessa tilassa. Kun jommalla kummalla puolella tapahtuu tilanmuutos (symboli K), päätellään se puoli lähettäjäksi ja samaan suuntaan ajavat vahvistimet aktivoidaan. Piirin arvioitu hinta on 5,53 USAn dollaria 100-500 kappaleen erissä ostettaessa.

4.2 Muuntajasuojaerotus

Muuntaja soveltuu symmetristen eromuotoisten signaalien suojaerotukseen erinomaisesti. Esimerkiksi perinteisissä puhelinverkoissa käytetyt E1-linjat on aina suojaerotettu muuntajilla. E1-linjalla käytetään kaksinapaista HDB3 koodausta [20, kappale 9.1]. Epäsymmetriset koodaukset aiheuttavat muuntajan läpi tasavirtaa. Tasavirtakomponentti ei siirry muuntajan käämistä toiseen. Lisäksi liian suuri tasavirta häiritsee muuntajan toimintaa, kun muuntajissa yleisesti käytetty metallisydän satureituu. USB-väylän koodaus ei ole symmetrinen, mikä vaikeuttaa yksinkertai-

sen muuntajakytkennän käyttöä suojaerotuksena. Epäsymmetrisesti koodattu informaatio voidaan siirtää muuntajan yli, kun varmistutaan että muuntajan sydän ei saturoidu merkittävästi käytettävillä virroilla. Epäsymmetria voidaan myös poistaa laittamalla muuntajan kanssa sarjaan kondensaattori. Kondensaattori tasapainottaa koodauksen. Samoin muuntajan toisiopuolelle syntyy tasapainoisesti koodattu datavirta. Alkuperäinen epäsymmetria on mahdollista palauttaa biasoimalla ulostulo diodeja hyväksi käyttämällä, siten että väylän jännite asettuu maan ja käyttöjännitteen välille. Myös vahvistimien avulla voidaan palauttaa alkuperäiset jännitetasot suojaerotuksen jälkeen. USB-väylän osalta on kuitenkin huomioitava, että silloin menetetään muuntajien kaksisuuntaisuuden tuoma hyöty, koska vahvistimet ovat aina yksisuuntaisia. Vahvistimien toimintaa on siis ohjattava sen mukaan kumpaan suuntaan data kulloinkin liikkuu. Yksimuotoisten signaalien muuntajasuojaerotuksessa muuntajan toinen johdin kytketään maahan. Yksimuotoinen signaali on aina vahvasti epäsymmetrinen, ellei käytetä sekä positiivisia että negatiivisia jännitteitä.

4.2.1 Erillinen suojaerotusmuuntaja

Suojaerotusmuuntaja on muuntaja, jonka muuntosuhde on 1 ja se kytketään erotettavan laitteen ja pistorasian väliin galvaanisen erotuksen saamiseksi. Suojaerotusmuuntajia käytetään yleisesti laboratorioissa ja sairaaloissa turvallisuuden parantamiseksi.

Suojaerotusmuuntajan avulla myös tavallisesta henkilökohtaisesta tietokoneesta saadaan riittävän turvallinen laite potilasympäristöön. Tällöin tietokoneen täytyy täyttää vain tietoteknisen laitteen turvallisuusmääräykset. Länsimaissa nämä määräykset noudattavat standardia IEC 60950 tai sen maakohtaisia vastineita [21]. Lisäksi on estettävä suojaerottamattomien laitteiden kytkeminen käytettävään tietokoneeseen, muutoin tietokone saatetaan maadoittaa vahingossa esimerkiksi tietoliikenneportin kautta.

Useat potilaaseen kytkettävät mittalaitteet kytkeytyvät kiinni suoraan potilaaseen. Tällaiset mittalaitteet on erotettava verkkovirran lisäksi myös toisistaan. Suojaerotus ei siis ole riittävän turvallinen mittalaitteiden yhteydessä.

4.3 Optinen suojaerotus

Optoerottimet soveltuvat hyvin myös epäsymmetrisille koodauksille. Niitä voidaan käyttää sekä eromuotoisten, että yksimuotoisten signaalien erottamiseen. Optoerottimet sisältävät aina jonkinlaisen vahvistimen, joten ne eivät kykene itsessään kaksisuuntaiseen liikenteeseen. Kappaleessa 4.5 kerrotaan kuinka Half-duplex-väylä voidaan suojaerottaa yksisuuntaisilla komponenteilla. Optoerottimet soveltuvat low- ja full-speed -väylien suojaerottamiseen, mutta high-speed-väylän erottamiseen niiden nopeus jää liian alhaiseksi. Nopeatkin optoerottimet pystyvät vain 20-30 Mb/s datanopeuksiin. Esimerkiksi Fairchild Semiconductor valmistajan lupaama datanopeus nopeimmalle optoerottimelle FOD8001 on 25 Mb/s [22].

4.4 Kapasitiivinen suojaerotus

Kaupallisia kapasitiivisia suojaerotuspiirejä käytettäessä USB-väylän suojaerotukseen toteutus ja ongelmat on samoja kuin optoerottimia käytettäessä. Piirit ovat käytön kannalta samanlaisia, molemmissa on sisäänmeno ja siitä suojaerotettu ulostulo. Sisäisesti kapasitiiviset suojaerotuspiirit moduloivat sisääntulevan signaalin ensin korkeammalle taajuudelle, jotta tieto voidaan välittää riittävän pienen kapasitanssin yli. Kaupallisia piirejä on saatavilla 150 Mb/s datanopeuksille asti [23], joka riittää vain low- ja full-speed -väylille. Potilasmittauksien pääasialliseen suojaerotukseen kyseinen piiri ei sovellu, koska suojaerotuksen jännitekesto on vain 1500 V.

Kapasitiivisen suojaerotuksen ja moduloinnin mielenkiintoinen erikoistapaus on käyttää langattoman yhteyden muodostamiseen tarkoitettuja komponentteja siten, että antenni on korvattu kapasitiivisella suojaerotuksella ja koaksiaalijohtimella [17]. Myös langaton USB soveltuu suojaerotettavaksi ja välitettäväksi koaksiaalijohtimella, varsinkin jos tyydytään käyttämään vain määrittelyn alemman puolikkaan taajuuksia. Sigma Designs niminen yritys markkinoi omaa UWB-piiriään datan välittämiseen koteihin asennetun antenniverkon kautta [24]. Kyseinen piiri toteuttaa langattoman USB-väylän fyysisen linkkitason, joten langattoman USB:n toteuttaminen kyseisen piirin kanssa on suoraviivaista. Myös tämän ratkaisun heikkous löytyy suojaerotuksen jännitekestoisuudesta. Koska tämä sovellus on uusi, kondensaattori-

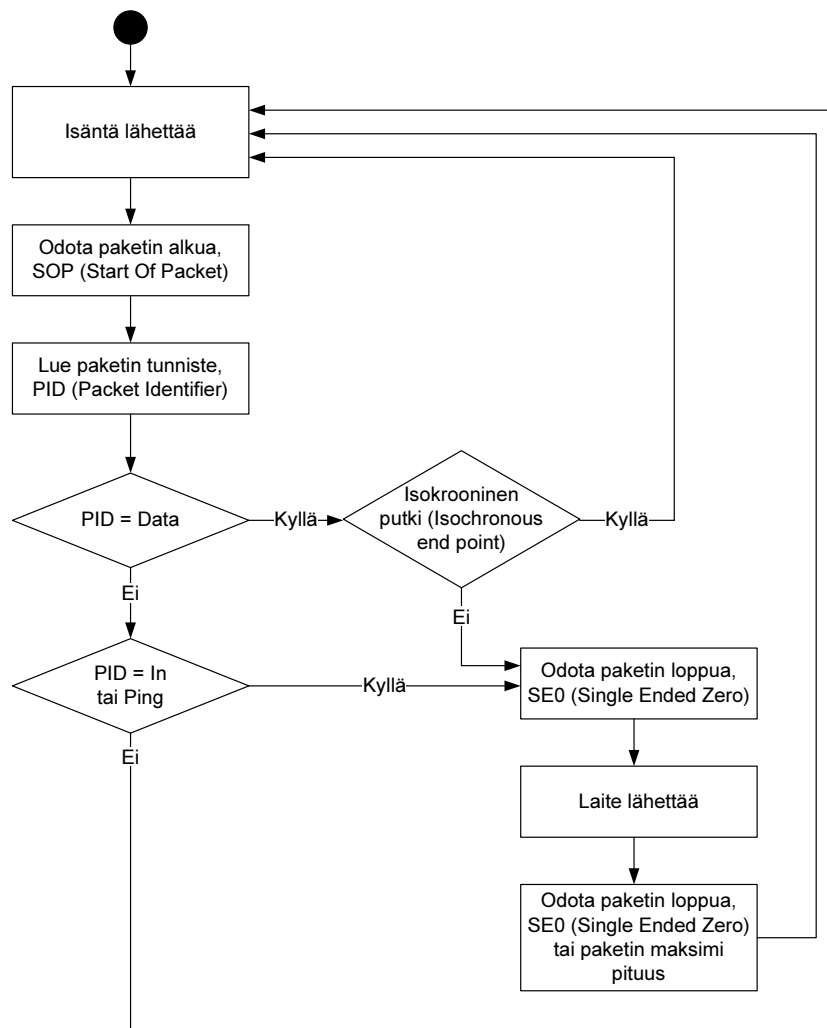
valmistajat eivät ole ehtineet tehdä suojaerotukseen soveltuvia kondensaattoreita.

4.5 Vahvistimien suunnan päättely

Half-duplex-väyliin on mahdollista tehdä suojaerotus vahvistimia sisältävillä komponenteilla kytkemällä erilliset suojaerotuskomponentit vastakkaisiin suuntiin ja pitämällä niiden lähdöt korkeaimpedanssisessa tilassa aina, kun kyseiseen suuntaan ei haluta lähettää dataa. USB-väylän tapauksessa oikean suunnan päättely vaatii monimutkaisen logiikan väylän liikenteen seuraamiseen. Toinen tapa lähes yhtä hyvään tulokseen pääsemiseksi on valita suunta sen mukaan, millä puolella tapahtuu ensin muutos, kuten Analog Devices:n USB-suojaerotuskomponenttissa on tehty. Vaikka Analog Devices käyttääkin itse suojaerotukseen muuntajia, piirissä käytettyjen vahvistimien osalta ongelmat ovat samat kuin optoerottimien yhteydessä. Tämä menetelmä aiheuttaa kuitenkin viivettä ensimmäisen bitin ensimmäiseen reunaan. Low- ja Full-speed -väylillä viivettä voidaan pitää merkityksettömänä, kun yhden bitin jaksonaika on yli 80 nanosekuntia. High-speed-väylän suojaerotusta ei ole vielä toteutettu tällä tavalla, mutta teknisesti sen pitäisi olla mahdollista. Ensimmäisen bitin viiveen voisi jättää huomiotta, koska high-speed väylällä käytetään 32 bitin pituista synkronointikuviota. High-speed-väylällä yksi bitti kestää hieman yli 2 nanosekuntia. Kun otetaan huomioon että keskittimet saavat määrittelyn mukaan hukata enintään 4 synkronointi-bittiä, voidaan suunnanpäättelyssä vääristynyt bitti kompensoida rajoittamalla peräkkäisten keskittimien määrä neljään alkuperäisen viiden sijaan.

Täydellisesti toimiva suunnanpäättelylogiikka vaatii USB-väylällä liikkuvan datan aktiivista kuuntelua. USB 2.0 -väylä on isäntäkeskeinen, eli kaikki liikenne on isännästä alavirtaan päin, paitsi jos isäntä erikseen komentaa laitteen siirtämään dataa isännälle päin. Yksinkertaistettuna kaiken datan voidaan olettaa kulkevan isännältä alavirtaan päin, paitsi jos edellinen paketti oli lukukäsky laitteelle (paketin tunniste on out). Kuvassa 4.1 on esitetty tiedonsiirron suunnan päättely. Tilakaaviota ei kuitenkaan ole testattu käytännössä tämän työn puitteissa.

Esitetty tilakaavio antaa suunnan päättelystä todellista yksinkertaisemmän kuvan. Hyväksymiskuittausta (acknowledgement) ei aina lähetetä riippuen käytössä



Kuva 4.1: Yksinkertaistettu tilakaavioesitys USB-väylän tiedonsiirron suunnasta. Suojaerotuskytkennän on vaikea tunnistaa, minkä tyyppinen tiedonsiirtoputki milläkin laitteella on käytössä, koska tätä tietoa ei ole mukana paketissa. Paketin alussa kerrotaan vain käytettävän putken numero. Eri putkien alustuksessa (paketin tunniste on setup) määrätään kunkin putkin tyyppi. Toimiakseen tämän tilakoneen pitäisi muistaa kaikkien alustettujen putkien tyypit.

olevista tiedonsiirtoasetuksista. Kuvassa tämä ehto on $PID = Data$ ja lisäehto on isokrooninen putki. Suojaerotuksen pitäisi kuunnella ja tulkita laitteen alustusmennot tietääkseen, mitä asetuksia kulloinkin käytetään. Lisäksi tiedonsiirtovirheiden vaikutukset hyväksymiskuittauksiin on jätetty huomiotta. Niiden täydellinen huomioiminen on mahdotonta, koska suojaerotuskytkentä ei voi ennustaa täydellisesti, mitkä paketit näkyvät virheellisinä laitteelle.

4.6 Suojaerotus USB-väyläohjaimen ja mittauskytkennän välillä

Suoraviivaisin ratkaisu USB-väylään liitettävän mittalaitteen suojaerottamiseen on tehdä suojaerotus USB-laitetoiminnallisuuden ja varsinaisen mittauskytkennän väliin. Tässä ratkaisussa USB-laitteena toimiva mikrokontrolleri tai väyläohjain on siis suojaerottamaton. Suojaerotuksen läpi kulkevat signaalit on mahdollista suunnitella vapaasti, jolloin vältetään kaikki USB-väylän suojaerottamiseen liittyvät haasteet. Ratkaisu soveltuu hyvin suhteellisen yksinkertaisiin mittauskytkentöihin. Monissa sulautettuihin järjestelmiin tarkoitetuissa suorittimissa on sisäänrakennettuna USB-väyläohjain. Tällöin edellä kuvattu suojaerotusmalli ei ole edullinen eikä välttämättä yksinkertaisin toteuttaa.

4.7 USB 3.0 signaalien suojaerotus

USB 3.0 määrittelyn mukaisessa super-speed tiedonsiirrossa käytetään erillisiä lähetykseen ja vastaanottoon tarkoitettuja johtimia. Määrittely tukee vain kierretyssä parikaapelissa kulkevaa signalointia. Muissa vastaavan nopeuksisissa väylissä käytetään usein myös optisia kuituja ja lähetinvastaanottimia, esimerkiksi SONET sekä gigabitin ja 10 gigabitin Ethernetit. Näin ollen suojaerotus on helpointa toteuttaa optisella kaapelilla ja lähetinvastaanottimella, jolle valmistaja lupaa vähintään 5 Gb/s datanopeuden. Laitteen tunnistus päätevastuksesta ei kuitenkaan toimi optisen kaapelin yli. Laitteen päähän sisäisesti tehtynä tällainen suojaerotus mahdollistaa täysin määrittelyn mukaisen toiminnan, jos laitteelta saadaan erillinen päätevastuksien kytkennän ohjaus esimerkiksi optoerottimien kautta. Samoin isännän terminoinnin tunnistus täytyy tehdä optoerottimien kautta. USB 3.0 määrittelyn lepotilanaikainen tiedonsiirto tapahtuu 10-50 MHz taajuudella. Lähetinvastaanottimien toimintaa ei yleensä ole määritelty valmistajan toimesta näin matalille taajuuksille. Useimpien toimintataajuuden alaraja määräytyy sähköisten signaalien AC-kytkennästä. 10 MHz taajuudella toiminta voidaan kuitenkin varmistaa kokeilemalla. Tällä tavalla toteutettuna suojaerotus on kallis, satoja euroja pienissä erissä. Toisaalta potilasmittaukset, joissa tarvitaan yli 400 Mb/s datanopeuksia, ovat vielä

harvinaisia ja siksi suojaerotuksen korkea hinta on mahdollisesti hyväksyttävissä.

Tulevaisuudessa optisten kaapeleiden käyttö saatetaan lisätä myös USB-määrittelyyn. Intelin edustajat ehtivät jopa esitellä optista USB-tiedonsiirtoa 5 Gb/s nopeudella ennen USB 3.0 -määrittelyn valmistumista. Toistaiseksi optista siirtotietä ei ole kuitenkaan lisätty määrittelyyn. Optisen siirtotien tukeminen määrittelyn tasolla laskisi varmasti kustannuksia verrattuna erikseen toteutettuun suojaerotukseen. Tällöin erillinen suojaerotus tarvittaisiin vain USB 2.0 -määrittelyn mukaisille signaaleille, olettaen että optisen siirtotien määrittely vaatii kyseisiä signaaleja.

4.8 Käyttöjännitteen suojaerotus

Jos laitteella on oma virtalähteensä, täytyy myös sen toteuttaa lääkintälaitteelta vaadittava suojaerotus. USB-väylästä sähkönsä ottava laite täytyy myös suojaerottaa. Tämä käy kätevästi pienellä hakkurivirtalähteellä, joka hoitaa suojaerotuksen. Hakkurin hukkaama teho on kuitenkin huomioitava laitteen ohjelmistossa, koska väylältä sähkönsä saavan laitteen pitää aina kertoa väylän isännälle kuluttamansa virta. Laitteen kuluttamana virtana pitää siis ilmoittaa laitteen oma virrankulutus jaettuna suojaerotushakkurin hyötysuhteella. Osaltaan tämän takia mille tahansa väylän kautta tehonsa saavalle laitteelle suojaerotusta ei voida toteuttaa - laitteen sulautettuun ohjelmistoon (laitekuvaimeen) on tehtävä muutoksia tai laitteelle on syötettävä käyttö sähkö ulkopuolelta. Myös sellaiset laitteet, jotka kuluttavat itsessään USB-määrittelyn mukaisen suurimman sallitun virran, vaativat suurempia muutoksia hakkurikytkennän hukkaaman tehon takia.

Laitteen kuluttaessa tavanomaisen käytön aikana yli 100 mA, hakkurikytkennässä on otettava huomioon myös USB-väylän asettama rajoitus alustamista edeltävälle virrankulutukselle. Ennen kuin isäntä on suorittanut laitteen alustuksen ja antanut luvan virrankulutuksen kasvattamiseen, laitteen suurin sallittu virta on 100 mA. Käytännössä tämä vaikuttaa hakkurin suunnitteluun siten, että siltä vaaditaan korkea hyötysuhde laajalla tehoalueella.

4.9 Yhteenveto

Tässä luvussa esiteltiin teoreettisesti USB-väylän eri versioiden suojaerotus eri tyyppisillä komponenteilla toteutettuna. USB 2.0 -määrittelyn kaikilla nopeuksilla toimiva suojaerotus on mahdollista toteuttaa muuntajalla tai kapasitiivisesti raadio- taajuista modulaatiota käyttäen. Näistä toteutusvaihtoehdoista muuntajaan perustuva suojaerotus on selvästi yksinkertaisempi. USB 3.0 -määrittelyn SuperSpeed-nopeutta tukevalle väylälle esiteltiin yksi mahdollinen suojaerotustapa. Sen toteutus todettiin kalliiksi. Lisäksi tässä luvussa on kerrottu suojaerotuksesta aiheutuvat vaatimukset USB-väylän sähkönsyötölle.

Seuraavassa luvussa kerrotaan USB-väylän muuntajasuojaerotuksen yksityiskohdat ja komponenttimitoitus. Luvussa kuvataan myös toteutettu full-speed-nopeutta tukeva USB-väylän suojaerotuskytkentä.

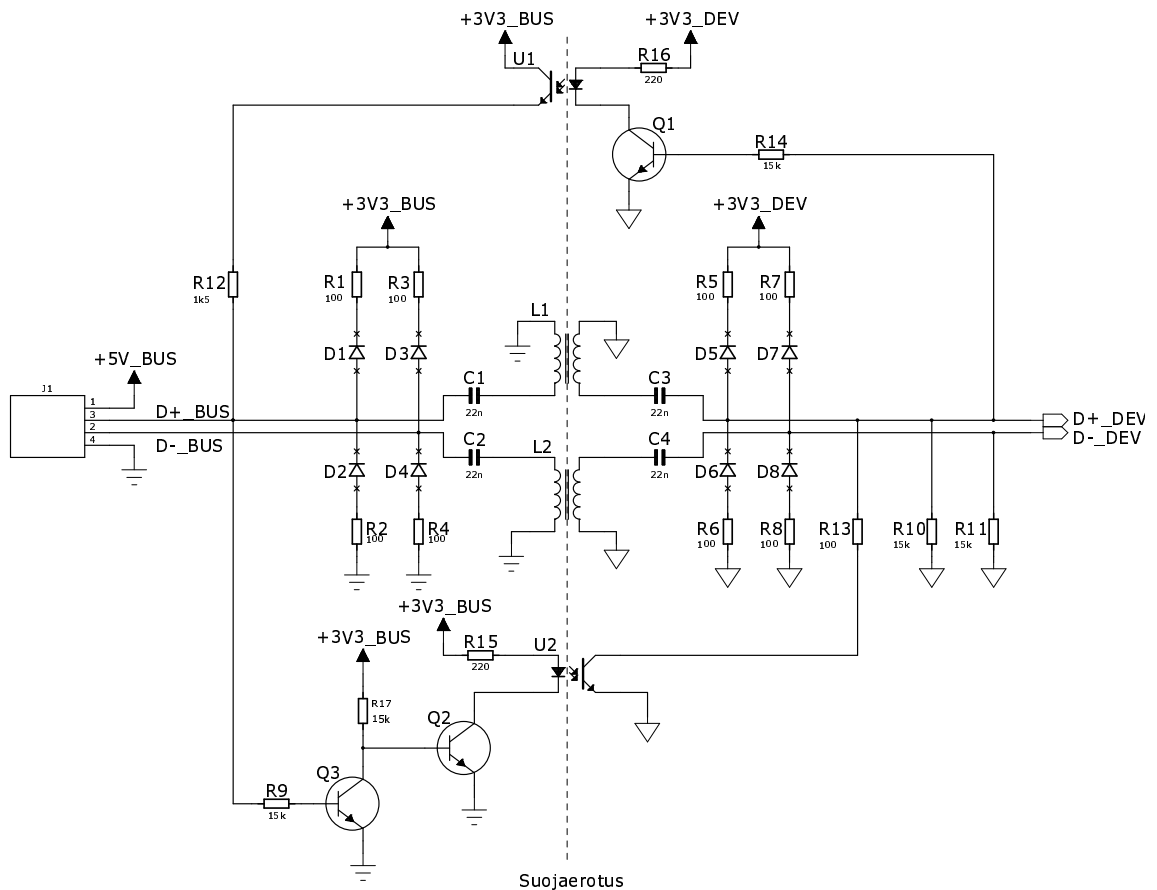
5. PROTOTYYPPIKYTKENTÄ

USB-väylää halutaan käyttää potilasympäristössä osin siksi, että se on edullinen. Väylän suojaerottaminen ei saa nostaa sen hintaa kohtuuttomasti. Tärkeä vertailuperuste suojaerotuksen toteutusten välillä on hinta. Tietenkin väylän pitää suojaerotuksesta riippumatta toimia virheettää ja suojaerotuksen jännitekestoisuus pitää olla vähintään 4 kV_{RMS} .

5.1 Yleiskäyttöinen passiivinen muuntajasuojaerotuskytkentä

Datalinjojen suojaerotuksessa päädyttiin passiivikomponenttien käyttöön, koska se on yksinkertaisinta. Suunnan päättelyyn tarvittavaa logiikkaa ei tarvita. Pelkästään passiivikomponenteilla ei kytkennästä kuitenkaan selvitä. Laitteen tunnistamisen välittämiseen suojaerotuksen tarvitaan kaksi optoerotinta. Kuvassa 5.1 on esitetty suunniteltu kytkentä. Yksinkertaisuuden vuoksi kytkennästä on jätetty pois tuki low-speed-nopeudelle. Low-speed-tuen lisäämistä käsitellään kohdassa 5.1.4. Komponenttien mitoituksessa otetaan kuitenkin huomioon low-speed-nopeudet myös tässä kappaleessa.

Datalinjat on AC-kytketty kondensaattoreiden läpi muuntajille. D+ ja D- -linjoissa on erilliset muuntajat maata vasten. Näin myös datapaketin loppumerkki SE0 kulkee muuntajien yli näppärästi. Datalinjojen biasointiin on diodit D1-D8. Diodit tarvitsevat lisäksi sarjavastukset R1-R8, koska muutoin diodien kapasitanssi kuormittaisi väylää turhaan. Optoerotin U1 välittää R9:n kautta laitteen kytkemistiedon. U1:n ohjauksessa transistori Q1 toimii vahvistimena ja sen ohjaus tulee laitteen puoleisesta D+ linjasta. Kytkentää testattaessa havaittiin, että väylän alustuksessa käytettävä millisekuntien mittainen väylän SE0 -tila ei välity suojaerotuksen yli. Ongelma ratkesi lisäämällä kytkentään optoerotin U2 välittämään SE0 -signaalitila. U2:ta ohjataan isännän puoleisella D+ -linjalla. USB-määrittelyn mukaan isännän puolella



Kuva 5.1: Suunniteltu muuntajiin perustuva USB-väylän suojaerotuskytkentä. Muuntajat L1 ja L2 välittävät normaalin dataliikenteen suojaerotuksen yli. Optoerotin U1 välittää laitteen kytkemistiedon vastuksen R12 kautta suojaerotuksen isännän puoleiselle väylän osalle. U2 välittää väylän alustuksessa käytettävän yli 10 ms pitkän yksimuotoisen nollan.

datalinjoissa on aina 15 k Ω alasetovastukset. Suojaerotuksen ja laitteen välisellä väylällä näitä vastuksia vastaavat R10 ja R11.

5.1.1 High-speed-väylän erityispiirteet

Kytettä toimii periaatteessa myös high-speed-väylällä datan siirrossa. Molempien linjojen DC-taso asettuu luonnostaan heti 0 V yläpuolelle biasointidiodien ansiosista, sillä full-speed-laitteen tunnistuksessa käytetty ylös vetovastus on kytketty pois käytöstä high-speed-tilan aikana. High-speed-väylän tunnistus ei kuitenkaan toimi. Chirp K- ja J-tilat täytyy siirtää erikseen suojaerotuksen yli esimerkiksi optoerottimilla, koska näin hitaat signaalit suodattuvat jo ennen muuntajia AC-kytkennässä.

Optoerotuksen yhteydessä tarvitaan kuitenkin logiikkaa datan etenemissuunnan päättelyyn. Yleensä tällaisiin hitaisiin signaaleihin soveltuu hyvin muutoksen havaitsemiseen perustuva suunnan valinta, mutta edellä kuvattu muuntajakytkentä tekee sen vaikeaksi tai mahdottomaksi. Chirp-signaalin alkureuna kytkeytyy muuntajan kautta suojaerotuksen toiselle puolelle hyvin pienellä viiveellä, jolloin molemmat puolet havaitsevat muutoksen samaan aikaan ja aktivoivat oman datasuuntansa. Chirp-signaalien kytkeminen suojarerotuksen yli vaatii siis monimutkaisempaa logiikkaa. Onneksi signalointi on yksinkertainen, ensin laite lähettää chirp J:tä, minkä jälkeen vain isäntä ajaa chirp-signaaleja. Toimivaan kytkentään tarvitaan siis komparaattorit tunnistamaan chirp-signaalit, referenssijännite komparaattoreille, pieni ohjelmoitava piiri tai suoritin, sekä optoerottimet välittämään chirp-signaalit suojaerotuksen yli. Vaihtoehtoisesti SE0-tilan aikana tapahtuva signalointi voidaan toteuttaa myös törmäyksen tunnistavalla vahvistimien ohjauksella. Tällöin vahvistimen lähtö pidetään aktiivisena, kunnes havaitaan, että väylän vastakkainen puoli ajaa virtaa samaan väylään. Tunnistus voidaan tehdä vahvistimen ulostuloon kytketyn sarjavastuksen yli olevasta jännitteestä. Vahvistimien sisäänmeno määräytyy optoerotuksen toisella puolella olevien komparaattoreiden perusteella.

Väylän ollessa käyttämättömänä (idle-tilassa) väylän DC-taso pysyy oikeana ylös ja alasvetovastusten ansiosta. Matalimpien taajuuksien osalta muuntajien pitää siis pystyä pitämään väylän tila vakaana K-tilassa. Pisin yhtäjaksoinen K-tila on kuusi bittiä, bittien täydennyksen estäessä pidemmät sarjat. Low-speed-nopeudella tämä on 4 μ s. Taajuuskaistan yläpäässä riittää hieman yli datanopeuden menevä taajuus. Muuntajan pitäisi siis toimia vähintään taajuuskaistalla 100 kHz - 640 MHz. Ylävirtaan eli laitteelta isännälle suunnassa pitkään jatkuva K-tila ei ole ongelma, koska laitteen tunnistukseen liittyvä optoerotin irrottaa ylösvetovastuksen oman etenemsviiveensä jälkeen. Alavirtaan puolestaan SE0-signaloinin varmistava U2 tuo helpotusta pitkiin K-tiloihin ajamalla laitteen puolelta ylösvedetyn signaalin aktiivisesti nolaksi. Toisen datalinjan osalta matalataajuuksiset signaalit eivät ole ongelma korkean impedanssin vuoksi. Laitteen päässä impedanssi määräytyy lähetinvastanottimen sisääntuloimpedanssista.

5.1.2 Muuntajien toiminnalliset vaatimukset

Muuntajilta vaadittavaa kaistanleveyttä voidaan kaventaa rajaamalla kytkentä tiettyyn nopeuteen. Tämä on mahdollista, jos suojaerotusta ollaan toteuttamassa laitteen päähän. Keskittimen yhteyteen tai johtimeen tehtävän suojaerotuksen pitäisi teoriassa toimia kaikilla nopeuksilla. Laitteen yhteydessä suojaerotukselta vaaditaan joko low-speed- tai full-speed-väylänopeuden tuki. High-speed-nopeutta tukeville laitteille vaaditaan lisäksi full-speed-tukea. Low-speed-laitteen suojaerotuksen muuntajien minimi kaistanleveys on 100 kHz - 2 MHz, full-speed-laitteella vastaava kaistanleveys on 800 kHz - 17 MHz. High-speed-laitteella kaistanleveysvaatimus on 800 kHz - 640 MHz. High-speed-laitteiden osalta muuntajalta vaadittavaa kaistanleveyttä on mahdollista kaventaa kytkemällä datalinjojen väliin eromuotoisesti toimiva kolmas muuntaja. Kolmas muuntaja kytketään myös sarjakondensaattoreiden kautta. Kolmas muuntaja on erityisen hyödyllinen, kun halutaan tukea kaikkia kolmea taajuutta, koska yksittäiseltä muuntajalta vaaditaan selvästi pienempi kaistanleveys. Muuntajalta vaadittavan kaistanleveyden lisäksi high-speed-väylän suojaerotuksessa on erityisesti otettava huomioon signaalin siirtotien impedanssi.

Käytännössä muuntajien taajuusvasteen ei tarvitse olla suora määriteltujen taajuuksien ylärajoille asti. High-speed-signaaleille USB 2.0 määrittelystä löytyy vaadittava silmäkuvio, johon sopii hyvin signaali jonka datanopeuden ylittävät taajuuskomponentit ovat vaimentuneet voimakkaasti. Low- ja full-speed laitteille on määritelty vain jännitetasot ja nousunopeudet. Valmiita muuntajia ei ole saatavana sopivalle taajuuskaistalle. Gigabitin Ethernet -muuntajat toimisivat ainakin taajuuskaistan yläpäässä, mutta Ethernet-muuntajiin on yleensä sisäänrakennettu yhteismuotoisten signaalien vaimennukseen tarkoitettu kuristin. USB-väylän yksimuotoisten signaalien takia yhteismuotoisten signaalien kuristinta ei voi käyttää.

5.1.3 Komponenttien mitoitus

Varta vasten tarkoitukseen valmistettavan muuntajan mitoitus aloitetaan materiaalin valinnalla. Materiaali valitaan siten, että halutun taajuuskaistan korkeimmat taajuudet on mahdollista saavuttaa. Ferriittimateriaaleja löytyy helposti jopa gigahertsin taajuuksiin asti. Materiaalin valinnassa on otettava lisäksi huomioon per-

meabiliteetti. Mitä suurempi permeabiliteetti, sitä vähemmän muuntajaan tarvitaan kierroksia. Liian suuri muuntajan kierrosmäärä kasvattaa käämin kierrosten väliin muodostuvaa kapasitanssia, mikä puolestaan vaimentaa korkeita taajuuksia.

Seuraavaksi arvioidaan muuntajan käämiin tarvittavien kierrosten määrä. Käämissä kulkeva virta pyritään pitämään niin pienenä, että signaalilähde jaksaa ajaa muuntajaa vaivatta. Peukalosääntönä voidaan pitää, että muuntajan yksittäisen käämin induktiivisen reaktanssin pitää olla vähintään neljä kertaa lähteen lähtöimpedanssi, mikä USB:n tapauksessa on noin 45Ω . Mitoitus tehdään päästökaistan matalimpien taajuuksien mukaan. Muuntajasydämille ilmoitetaan yleensä induktanssi tietyllä kierrosmäärällä A_L . Induktanssi voidaan laskea myös suhteellisen permeabiliteetin ja kelan sydämen perusteella, mutta valmiiksi ilmoitettusta induktanssista on helpompi laskea induktanssi millä tahansa kierrosmäärällä. Induktanssi on neliöön verrannollinen kierrosmäärään nähden, eli induktanssi N :llä kierroksella on $L = \frac{A_L}{X^2} * N^2$, missä X on ilmoitetun A_L :n kierrosluku. Induktanssista saadaan reaktanssi kaavalla $X_L = 2 * \pi * f * L$, missä f on käytettävä taajuus ja L on induktanssi. Edellä kuvatuista kaavoista yhdistämällä saadaan $X_L = 2 * \pi * f * \frac{A_L}{X^2} * N^2$, josta ratkaisemalla N saadaan $N = \sqrt{\frac{X_L * X^2}{2 * \pi * f * A_L}}$, missä X_L on muuntajan haluttu induktiivinen reaktanssi. USB:n tapauksessa reaktanssin pitäisi olla 180Ω tai enemmän.

Kaikki USB 2.0:n nopeudet kattava muuntajasydän olisi esimerkiksi Amidon Associates Inc:n FT-23-67 [25]. Sen luvataan toimivan gigahertsin taajuuksiin asti ja A_L on $7,8 \mu\text{H}$ 1000 kierroksella. Sijoittamalla arvot edellä kuvattuun kaavaan saadaan tarvittava kierrosmäärä $N = \sqrt{\frac{180 * 1000^2}{2 * \pi * 100000 * 0,0078}} \approx 192$. 192 kierrosta on todella paljon muuntajalle, jonka läpi pitäisi mennä yli 500 MHz:n signaaleja. Käämien välinen kapasitanssi ja pitkistä käämistä syntyvä hajainduktanssi heikentävät muuntajan toimintaa. Näiden ilmiöiden ennakoiminen on vaikeaa, siksi muuntajaa pitäisi ehdottomasti kokeilla ennen kuin voidaan sanoa sen toimivan. Vertailuun kannattaisi valita hieman kapeamman kaistan omaava sydänmateriaali, joka tarjoaisi samalla korkeamman permeabiliteetin myötä selvästi pienemmän käämien kierrosmäärän. Amidonin verkkosivuilla on myös FT-37-64. Mallin saatavuus on kuitenkin epävarma, koska verkkokaupasta sitä ei saanut. Kyseisen materiaalin luvataan toimivan 500 MHz taajuuteen asti. Permeabiliteetti on 6,25-kertainen edellä esitettyyn ma-

teriaaliin verrattuna. Kun valitaan vielä hieman isompi malli, saadaan kierrosmääräksi: $N = \sqrt{\frac{180 \cdot 1000^2}{2 \cdot \pi \cdot 100000 \cdot 0,123}} \approx 48$. Tämäkin on vielä paljon kierroksia, mutta ei välttämättä mahdollisesti.

Sarjakapasitanssin mitoituksessa voidaan käyttää yksinkertaisesti ylipäästösuodattimen mitoitusta $f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$, missä f_c on suodattimen puolitehon taajuus, eli niin sanottu -3 dB piste. Kun kaavasta ratkaistaan C saadaan selville sarjakapasitanssin arvo. Kun R :ksi valitaan USB-väylän nimellisimpedanssi 45Ω :ia ja rajataajuudeksi edellä mainittu 100 kHz, saadaan $C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 45 \cdot 100000} \approx 18 \text{ nF}$. Käytännössä valitaan seuraava yleinen arvo, esimerkiksi E6 sarjan 22 nF.

5.1.4 Low-speed-laitteen nopeustiedon välittäminen suojaerotuksen yli

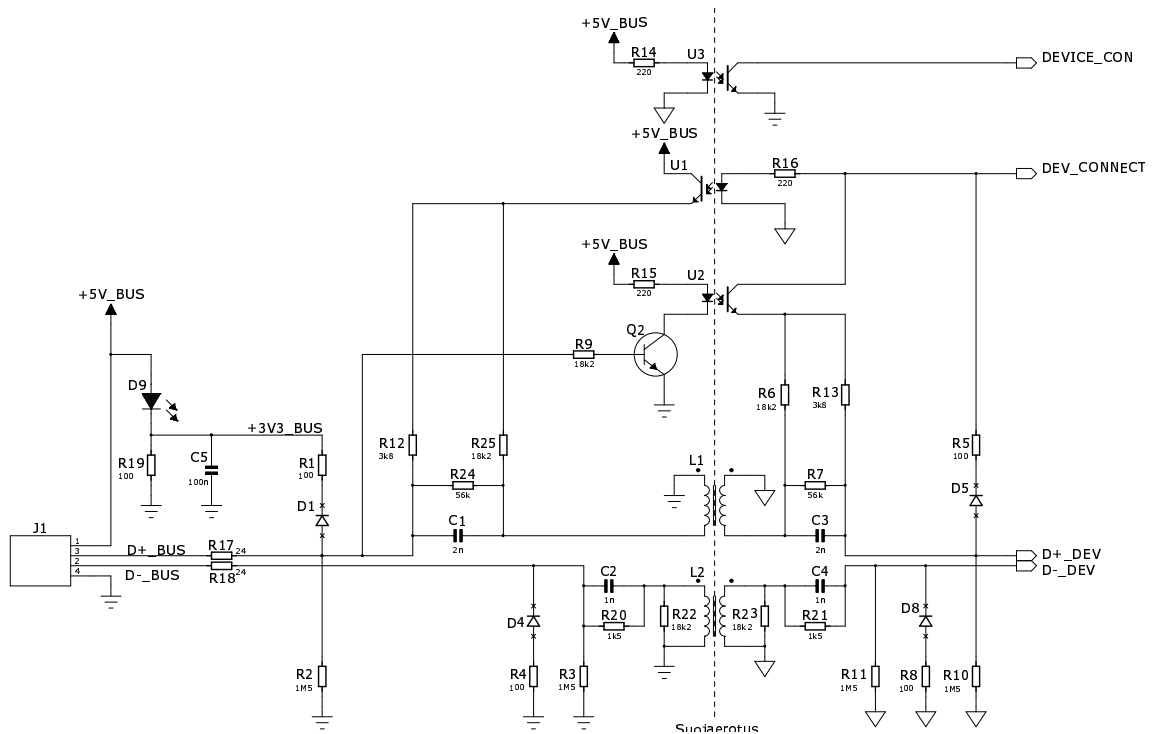
Edellä kuvattu kytkentä mahdollistaa myös low-speed-nopeudet väylällä kun huomioidaan muuntajan kaistanleveysvaatimukset. Lisäksi laitteen nopeuden tunnistukseen liittyvä ylösvetovastuksen kytkentä samoin kuin väylän alustuksessa käytetyn SE0-signaalin vuoksi kytkennässä oleva optoerotin U2 kytkentä pitää toteuttaa myös D- -linjaan.

5.2 Mittauksissa käytetyn prototyypin kytkentä

Mittauksissa käytetty suojaerotuskytkentä on esitetty kuvassa 5.2. Tärkein toiminnallinen ero edellä kuvattuun kytkentään on optoerotin U3. Laitteelle tarvitsee kertoa väylän kytkennästä, koska laite ei ottanut USB-väylältä käyttösähköään vaan sillä oli erillinen virtalähde. Väylältä käyttösähkönsä ottavat laitteet eivät tarvitse kyseistä optoerotinta, koska sen korvaa suojaerotettu virtalähde. Lisäksi kytkennässä on tehty LED:n D9 ja vastuksen R10 avulla biasoinnin apujännite +5 V käyttöjännitteestä. Koska punaisen LEDin kynnysjännite on 1,6 - 1,7 V on apujännite noin 3,3 V. Vastukset R3, R6-7, R10-11, R20-25 lisättiin kytkentään testausvaiheessa, kun muuntajan toimintaa pyrittiin ymmärtämään paremmin. Kytkennän toiminnan kannalta ne ovat merkityksettömiä.

Kytkentää testattiin Datex-Ohmedalle (nykyisin GE Healthcare Finland Oy) kehitetyn USB-SUPI datankeruukortin kanssa [26]. Kortti toimii full-speed-nopeudella.

Kortin USB-väyläliityntä on toteutettu Lucentin USS-820 USB-mikro-ohjaimella. Testausympäristö oli avoin ja siihen pystyttiin tekemään muutoksia tarpeen mukaan. Edellä kuvattua kytkentää saatiin yksinkertaistettua U1:n ohjauksen osalta, koska USB-ohjaimelta oli saatavissa laitteen tunnistuksen ylösvetovastuksen ohjaus. Kyseisellä pinnillä ohjattiin suoraan U1:tä ja sen mukana myös suojaerotuksen yläpuolista ylösvetovastusta.



Kuva 5.2: USB-väylän suojaerotuskytkennän prototyypin kytkentäkaavio. Muuntajat L1 ja L2 välittävät dataliikenteen suojaerotuksen yli. Optoerotin U1 välittää laitteen kytkemistiedon vastuksen R12 kautta suojaerotuksen isännän puoleiselle väylän osalle. U2 välittää väylän alustuksessa käytettävän yli 10 ms pitkän yksimuotoisen nollan poistamalla laitteen puoleisen ylösvetovastuksen R13 käytöstä. Optoerotin U3 välittää laitteelle tiedon USB-johdon kytkemisestä.

Muuntajat toteutettiin Amidon Associates Inc:n FT-50A-77 rengassydämellä. Sydämen taajuuskaista ulottuu 30 MHz:iin asti. A_L -luku 1000 kierroksella on 1200 mH. Tarvittava kierrosluku on $N = \sqrt{\frac{180 \cdot 1000^2}{2 \cdot \pi \cdot 100000 \cdot 0,12}} \approx 49$. Käämi toteutettiin kuitenkin 90:llä kierroksella. Tarpeettoman suureen kierrosmäärään päädyttiin hakoille joutuneen vianetsinnän seurauksena. Prototyypin ensimmäisessä versiossa ei ollut optoerotinta U2, joka välittää alustuksessa käytettävän SE0-tilan isännältä laitteelle. Kierrosluvun lisääminen toi muuntajan taajuuskaistan alapään 1600 Hz:n

tuntumaan, eli alustussignaalista välittyi läpi alle 1 ms. U2:n lisääminen toimi lopullisena ratkaisuna. Muuntajan kierrosmääräksi jäi kuitenkin 90. Kääminä käytettiin lääkitälaitteisiin tarkoitettua johdinta, jonka kuorelle on määritetty 4 kV jännitekestoisuus. Myös optoerottimiksi pitää valita mallit, joiden jännitekestoisuus on vähintään 4 kV.

5.2.1 Kytkennän hinta

Kytkennän hinnasta suurin osa tulee optoerottimista ja muuntajasta. Optoerottimet maksavat 0,25 € kappaleelta tai vähemmän. Esimerkiksi Vishay 4N35 maksaa 0,23 € kappaleelta 25 kappaleen erissä ostettuna Farnell Oy:stä. Muuntajan sydän, malliltaan Amidon FT-50A-77, maksaa valmistajan omilla verkkosivuilla 0,89 USD kappaleelta. Lisäksi muuntaja pitää käämiä, joka prototyypin tapauksessa tehtiin itse käsin. Komponenttilistaus hintatietoineen on esitetty taulukossa 5.1. Muuntajan sydäntä lukuun ottamatta hinnat perustuvat Farnell Oy:n hintoihin pienissä erissä.

Komponentti	Tunniste	Kpl	Hinta
Muuntajan sydän Amidon FT-50A-77	L1-2	2	0,65 €
Optoerotin NEC PS2561AL2-1	U1-3	3	0,38 €
Transistori BC547A	Q2	1	0,15 €
USB-liitin Samtec USBR-B-S-S-O-TH	J1	1	1,72 €
Diodi NXP 1N4148	D1, D4-5, D8	4	0,02 €
Vastus 24 Ω	R17-18	2	0,01 €
Vastus 1,5 k Ω	R20-21	2	0,01 €
Vastus 220 Ω	R14, R15, R16	3	0,01 €
Vastus 1,5 M Ω	R2-R3, R10-11	4	0,01 €
Vastus 18,2 k Ω	R6, R9, R22-23, R25	5	0,01 €
Vastus 3,8 k Ω	R12-13	2	0,01 €
Vastus 56 k Ω	R7, R24	2	0,01 €
Vastus 100 Ω	R1, R4-5, R8, R19	5	0,01 €
Kondensaattori 1 nF	C2, C4	2	0,02 €
Kondensaattori 2 nF	C1, C3	2	0,02 €
Kondensaattori 100 nF	C5	1	0,02 €
Valodiodi VCC VAOL-5GAE4	D9	1	0,17 €

Taulukko 5.1: Prototyypissä käytetyt komponentit, niiden käyttötarkoitus ja hinta-arviot

Piirilevy tehtiin valottamalla valmiiksi valoherkällä lakalla päällystetty piirilevyaihio. Valmistuksen epätarkkuudesta sekä piirilevykerrosten rajoittumisesta kahteen johtuen piirilevyllä ei ole mahdollista säilyttää signaalijohtimien impedanssia, mikä

saattaa aiheuttaa signaaliin heijastuksia. Impedanssiepäjatkuvuuden merkitystä on analysoitu kappaleessa 6.2.

Prototyypikytkenän kokonaishinnaksi muodostui 4,76 €. Hinnasta puuttuu muuntajan kääminä käytetty johdin, piirilevy ja työn osuus. Sarjatuotannossa komponenttien hinnat ovat huomattavasti edullisempia, joten kytkennän kokonaishinnaksi voidaan arvioida alle 10 €:a. Varsinaiseen myyntihintaan tulee tietenkin lisäksi tuotekehityskulut, laitteen lääkintäkäyttöön hyväksyttämistä syntyvät kulut sekä valmistajan kate.

5.2.2 Kytkennän fyysinen koko

Prototyypilaitteisto rakennettiin 5 cm x 7 cm kokoiselle piirilevyille. Piirilevyn johdotuskuva ja komponenttien sijoittelukuvat ovat liitteinä LIITE 4, LIITE 5 ja LIITE 6. Piirilevy on tarkoituksella väljä, jotta sen kanssa on helppo tehdä mittauksia. Lisäksi isoon piirilevyyn on tarvittaessa helpompi tehdä muutoksia kuin hyvin ahtaaseen piirilevyyn. Käytännössä kondensaattoreita jouduttiinkin vaihtamaan useaan otteeseen niiden mitoituksessa tehtyjen virheiden johdosta.

Teollisessa tuotannossa isot komponentit, muuntajat, optoerottimet ja liittimet yhdessä vaaditun suojaetäisyyden kanssa ratkaisevat käytännössä kytkennän koon. Kondensaattorit, vastukset ja diodit voidaan sijoitella melko vapaasti ilman että ne vaikuttavat merkittävästi kytkennän kokoon. Samoin piirilevyjohdotukset jäävät pinta-alaltaan merkityksettömiksi, koska kytkennässä kulkevat virrat ovat pieniä.

Muuntajien keskinäinen kytkentä, keskinäisinduktanssi, rajoittaa niiden sijoittelua toisiinsa nähden. Testeissä tämä ei aiheuttanut ongelmaa, joten voidaan päätellä että 1 cm kelojen välissä on riittävä etäisyys käytettäessä vastaavia keloja kuin prototyypilaitteistossa. Muuntajat on asennettu pystyyn. Tällöin molemmat kelat vievät leveysuunnassa noin 6 mm ja kun niiden väliin jätetään myös 10 mm, niin kelat tarvitsevat 22 mm leveän kaistaleen suojaerotuksen yli.

Käytetyt optoerottimet ovat 6 mm leveitä ja niitä kytkennässä on 3 kappaletta. Tällöin ne puolestaan vievät leveysuunnassa tilaa 18 mm. Yhteensä kytkennän leveys on vähintään 40 mm. Leveydestä voidaan tinkiä, jos optoerottimet sijoitetaan muuntajien väliin. Tällöin päästään 30 mm leveyteen.

Syvyyttä kytkennälle tulee muuntajien lisäksi USB-liittimestä. USB-määrittely [2, sivu 84, kuva 6-8] vaatii, että johtimessa olevalle liittimelle on tilaa painua 8,88 mm laitteen liittimeen. Täten tavallinen B-tyyppin USB-liitin on vähintään 10 mm syvä. Kytkennän kokonaissyvyys on siis aina vähintään 20 mm.

Muuntaja on kytkennän korkein komponentti. Rengassydämen halkaisija on 0,5 tuumaa, eli 12,7 mm. Tämän päälle tulee vielä arviolta yksi millimetri käämin paksuudesta johtuen. Piirilevyn paksuus juotoksineen on noin 2 mm. Kokonaiskorkeutta arvioitaessa pitää lisäksi ottaa huomioon suojaerotuksen pintaväli vaatimus. Jos 8 mm pintaväli vaatimusta ei voida toteuttaa ilman piirilevyn avauksia, on myös kotelolon oltava riittävän etäällä suojaerotuksesta. Muuntajien yläpuolella vastaavaa tilaa ei tarvita, koska pintaväli vaatimus pitää täyttää jo muuntajan sydämen ympärillä, sillä sydänmateriaali on itsessään johde. Toinen vaihtoehto on käyttää pinnaltaan eristettyä sydäntä. Muuntajan korkeus ehkäisee kuitenkin pintaväli ongelmat kotelolon yläpinnan osalta.

5.3 Yhteenveto

Tässä luvussa kuvattiin USB 2.0 -määrittelyn mukaisen suojaerotuskytkennän toteutus. Käytännön esimerkkinä toteutettiin full-speed-nopeutta tukeva kytkentä. Esimerkkikytkennälle esitettiin myös hinta-arvio, joka on alle 10 €:a.

Seuraavassa luvussa esitellään esimerkkikytkennälle tehdyt mittaukset sekä niiden perusteella päätellyt kytkennän ongelmat.

6. TULOKSET

USB-väylän suojaerotuksen prototyyppi saatiin toimimaan luotettavasti full-speed (12 Mb/s) nopeudella, kun rajoitettiin USB-johtimen pituus 3 m:in. Suojaerotuksen jännitekestoisuutta ei mitattu, mutta komponenttivalintojen perusteella sen voidaan olettaa täyttävän potilasmittalaitteilta vaadittavan 4 kV tason.

Prototyyppiä testattaessa pyrittiin ensin saamaan tiedonsiirto toimivaksi. Tämän jälkeen varmistettiin vielä oskilloskoopin avulla data-signaalien silmäkuviot.

6.1 Testausjärjestelyt

Testilaitteisto muodostui seuraavista laitteista:

- Tavallinen PC-tietokone Microsoft Windows 98 -käyttöjärjestelmällä. Tietokone toimi USB-väylän isäntänä.
- USB-SUPI -kortti. Kortista oli hyvä dokumentaatio ja riittävästi liitäntöjä että sen kytkeminen suojaerotusmoduuliin oli helppoa. Lisäksi laitteen ohjelmointi oli mahdollista, jolloin vikatilanteiden analysointi oli helpompaa. [26]
- Hitachi H8 -emulaattori USB-SUPI -kortin ajonaikaisten tulostusten seuraamiseen ja laitteen ohjelmointiin sekä toinen PC-tietokone emulaattorin käyttöön.
- USB-suojaerotusmodulin prototyyppi.
- Mittaukset tehtiin Lecroy LC334AM -merkkisellä digitaalisella oskilloskoopilla.

Testauksen suurin ongelma oli isäntänä toimineen tietokoneen epävakaus. Aina kun suojaerotus tai laitepään ohjelmisto aiheutti virheitä protokollatasolle, isäntätietokone jumiutui tai kaatui. Ongelma oli käyttöjärjestelmän USB-ajureissa. Myö-

hemmissä Microsoft Windows -käyttöjärjestelmissä USB-ajureita ja käyttöjärjestelmän ytimen suojausta on parannettu ja kyseinen ongelma on lähes hävinnyt.

6.2 Signaalimuotojen mittaukset

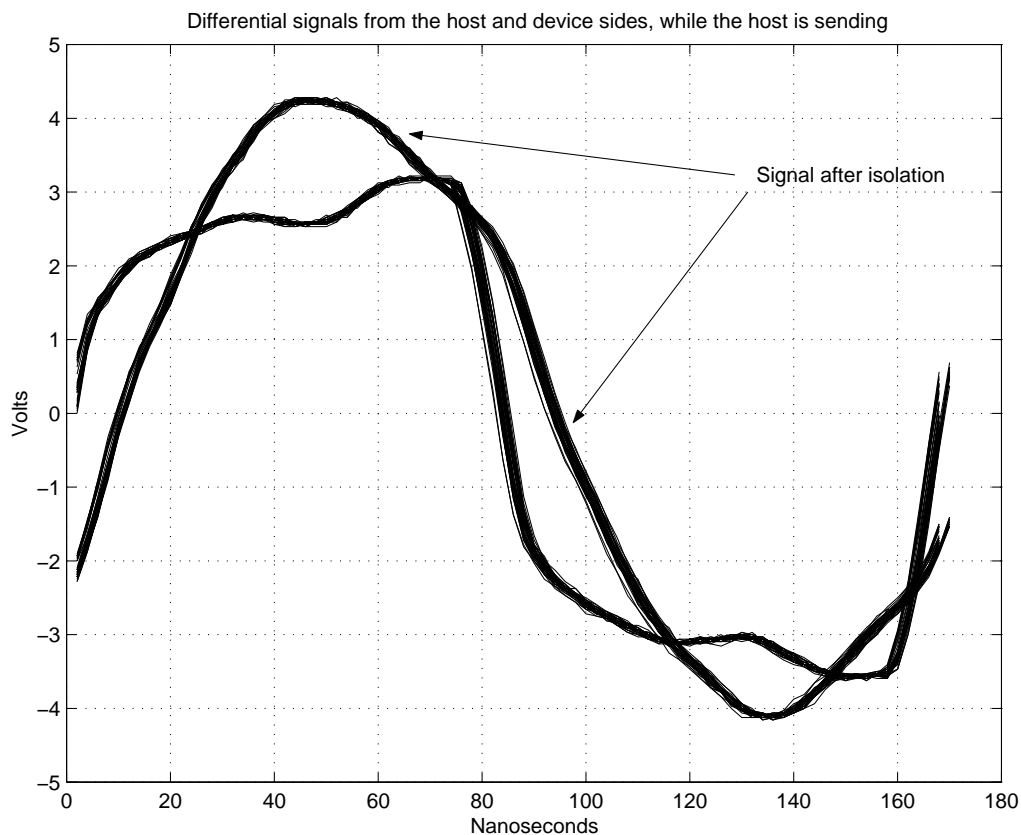
Mittausten perusteella signaalissa tapahtui vääristymistä. Toteutettu suojaeristys aiheutti USB-väylälle impedanssiepäjatkuvuuskohdan. Kytkeä oli toteutettu sellaiselle piirilevyille, jolla ei ollut mahdollista säilyttää 45Ω :n ominaisimpedanssia maahan nähden. Liian korkea impedanssi aiheuttaa signaaliin piikitystä, kun signaali heijastuu takaisin päin impedanssiepäjatkuvuuskohdasta. Tätä ilmiötä on mahdollista pienentää paremmalla piirilevy-suunnittelulla, eli käyttämällä impedanssisovitettuja piirilevyvetoja ja sijoittamalla muuntajat niin, että D+ ja D- -johtimien väliin jää mahdollisimman pieni pinta-ala. Jos tämäkään ei vielä riitä, voidaan piirilevyille tehdä RC-päätökytkentä, kytkeä vastus ja pieni kondensaattori datalinjasta maatasoon. Prototyypikytkennän osalta tyydyttiin jo tehtyyn piirilevyyn, koska datasiinaalien piikitys pysyi kohtuullisissa rajoissa ja high-speed-datanopeuksia ei ollut tarkoitus testata.

Johtimen pituus rajoittui lyhyemmäksi kuin standardin määräämä maksimipituus 5m. Testeissä vielä toimivaksi johdoksi osoittautuivat alle kahden metrin mittaiset johdot. 5 metrin mittaisella johdolla USB-väylän liikenteessä oli niin paljon virheitä, ettei edes laitteen tunnistaminen onnistunut. Häiriöisen signaalin mittaaminen osoittautui vaikeaksi, koska väylän isäntänä toiminut tietokone jumittui lähes aina väylään kytkettäessä suojaerotusyksikkö pitkän johdon avulla. Virheiden laatu on kuitenkin mahdollista arvioida ekstrapoloimalla lyhyemmällä johtimella tehdyistä mittauksista.

USB-väylän siirtoprotokolla havaitsee kaikki yhden ja kahden bitin virheet ja lopuistakin virheistä havaitaan suurin osa. Jäljelle jäävistä virheistä suurin osa aiheuttaisi testilaitteistossa poikkeavan toiminnon. Tällaisia virheitä ei havaittu, paitsi isäntätietokoneen kaatumiset pitkällä johdolla testattaessa. Huomaamatta jääneet virheet ovat hyvin epätodennäköisiä.

1,5 metrin USB-johdolla kytketyn isännän lähettämä eromuotoinen signaali ennen ja jälkeen suojaerotuksen on esitetty kuvassa 6.1. Signaalin korkeampien taa-

juuskomponenttien vaimeneminen, pyöristyminen, on tapahtunut lähinnä johdossa. Hieman pidemmän jakson mittaus on nähtävissä liitteestä LIITE 1. Suojaerotuksen jälkeen signaali on selvästi alipäästösuodattunut, joten aaltomuoto muistuttaa enemmän siniaaltoa kuin kanttiaaltoa. Tämä johtuu muuntajan hajainduktanssista, joka yhdessä suojaerotuksen ja laitteen välisen impedanssin kanssa muodostaa alipäästösuotimen. Pidemmän jakson mittaus on nähtävissä liitteestä LIITE 2.

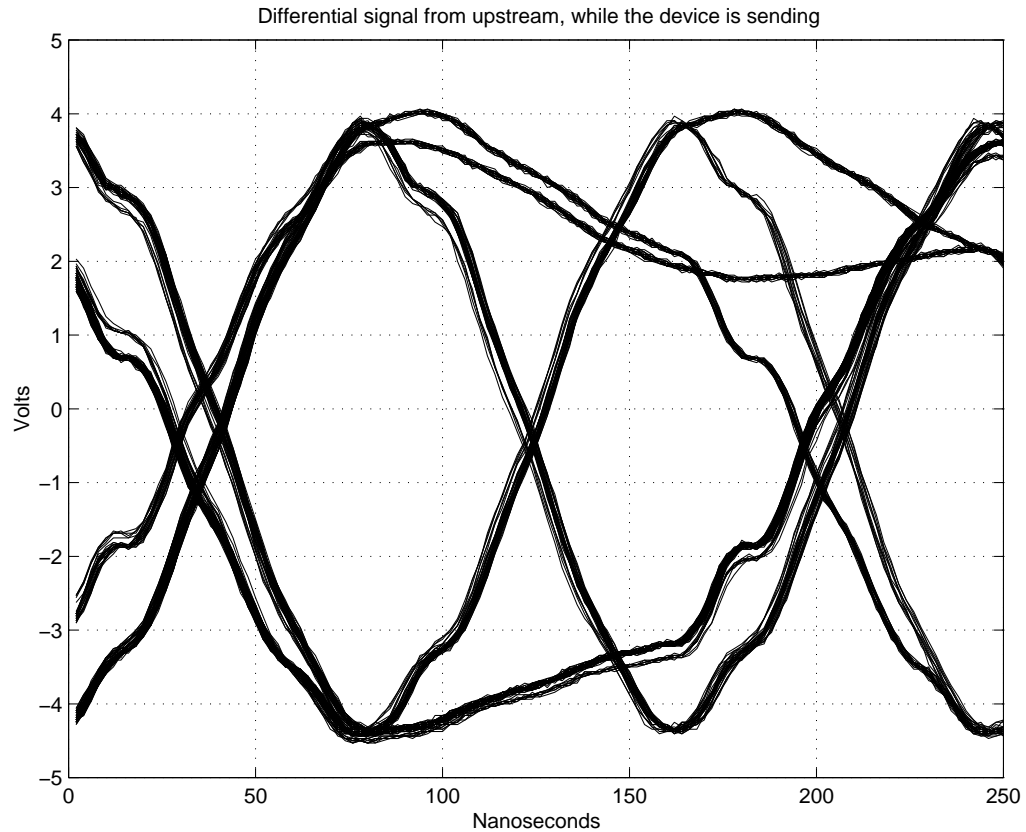


Kuva 6.1: Isännän ajaman eromuotoisen signaalin aaltomuoto ennen ja jälkeen suojaerotuksen

Kuvasta 6.1 voidaan päätellä myös kytkennän aiheuttama etenemisviive, joka on noin 11 ns. Liitteen LIITE 2 kuvasta nähdään paremmin signaalin nousu- ja las-
kunopeus, koska siinä erottuu selvemmin signaalin normaalit jännitetasot. USB-määrittelyssä käytetään nousunopeuden määrittelyä 10 %:sta 90 %:iin, joka tarkoittaa liitteen kuvassa -2,4 V - +2.0 V muutosta. Muutos kestää kuvan mukaan noin 25 ns ja on sama myös positiivisesta jännitteestä negatiiviseen siirryttäessä. USB 2.0 -määrittely rajaa low-speed- ja full-speed-laitteiden nousuajan 4-20 ns:iin.

Ylävirtaan laitteelta isännälle signaalimuoto vääristyy enemmän. Laitteen ajama

signaali ennen suojaerotusta on melko puhdas kanttiaalto. Se on nähtävissä liitteessä LIITE 3. Suojaerotuksen jälkeen signaalin aaltomuoto on kuvan 6.2 mukainen. Piikitys ja korkeiden taajuuksien vaimeneminen on selvästi havaittavissa. Lisäksi nollakohdan ylitys vaihtelee pahimmillaan yli 10 ns, mikä johtuu epäsymmetrian aiheuttamasta biasoinnin muuttumisesta. Nousuaika on venynyt jo noin 30 ns:in.



Kuva 6.2: Laitteen ajaman eromuotoisen signaalin aaltomuoto suojaerotuksen jälkeen

Määrittelyn mukaan väylän pisin yhtäjaksoinen vakaa tila ilman muutosta on 6 kellojaksoa. Pidemmät jaksot on estetty lisäämällä aina kuuden '1'-bitin jälkeen nolla (bit-stuffing). Myös 6 jaksonajan vakaana pysyvät signaalit kulkivat suojaerotuksen läpi virheettää. Väylän virheteriheyttä ei mitattu erikseen, koska valmiin laitteen kanssa virheitä ei havaittu käytettäessä 1,5 m pituista USB-johdinta. Standardin sallimalla maksimimittaisella 5 m:n johtimella virheitä tuli jatkuvasti. Virheiden laadun mittaus osoittautui vaikeaksi, koska isäntätietokone kaatui aina kun suojaerotettu laite kytkettiin 5 m johtimella. Pisimmäksi toimivaksi johdoksi osoittautui 3 m pituinen USB-johdin.

6.3 Yhteenveto

Tässä luvussa esiteltiin esimerkikykennälle tehdyt mittaukset sekä niiden perusteella pääteltyt kytkennän ongelmat. Kytkeä toimii käytännön testeissä, kun USB-johdon pituus rajataan korkeintaan 3 metriin. Oscilloskooppimittausten perusteella datasiinaalit ovat vääristyneet. Vääristymisen arvellaan johtuvan huonosta impedanssisoviutuksesta sekä muuntajan liian suuresta kierrosmäärästä.

Seuraavassa luvussa kerrotaan työn pohjalta tehtävät johtopäätökset ja pohditaan mahdollisia parannusehdotuksia toteutettuun kytkentään.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

USB 2.0 full-speed -määrittelyn mukaiseen toimintaan ei prototyypillä päästy. Määrittelyn vaatima 5 m johdin ei toimi. Lisäksi signaalien nousu- ja laskuajat ylittivät määrittelyn raja-arvot. Käytännön kokeilu kuitenkin osoitti suojaerotuskytkennän toimivaksi alle 3 m johdoilla.

USB OTG -määrittelyn mukaisesti roolia vaihtavan laitteen suojaerotukseen edellä esitetty kytkentä soveltuu myös hyvin. Jos käytössä on USB-SUPI-kortin tapaan erillinen laitteen tunnistukseen tarkoitettun ylösvetovastuksen ohjaus, pitää ylösvetovastus poistaa käytöstä laitteen ollessa isännän roolissa. Ylösvetovastuksen ohjaukseen voidaan käyttää myös mikro-AB-liittimen viidettä nastaa. Myös johtimeen tehty suojaerotus on mahdollinen, koska johdin itsessään pitää aina kytkeä samoin päin suhteessa aktiiviseen isäntään ja laitteeseen. Johtimen suojaerotus ei kuitenkaan toimi, jos laitteiden rooleja vaihdetaan HNP -protokollalla ilman että johdinta käännetään.

USB 2.0 -määrittelyn mukaiselle suojaerotukselle on tarvetta vielä pitkälle tulevaisuuteen, koska viimeisin USB 3.0 -määrittely edellyttää USB 2.0 -tukea. Työssä esiteltiin kaikilla USB 2.0 -määrittelyn nopeuksilla toimivan suojaerotuksen suuntaviivat ja toteutusvaihtoehdot. 12 Mb/s siirtävän full-speed USB:n suojaerotuksesta esiteltiin toimiva prototyypikytkentä. Kytkentä soveltuu pienillä muutoksilla käytettäväksi myös muilla nopeuksilla. Kytkennän arvioitu hinta on alle 10 €:a, joka on kilpailevia tuotteita edullisempi. Kytkennän pohjalta kirjoitettiin yksi konferenssijulkaisu [27].

USB 3.0:n superSpeed-väylälle esiteltiin yksi tapa toteuttaa suojaerotus. Toteutus on havaittu epäkäytännöllisen kalliiksi.

7.1 Pohdinta

Työn tuloksena syntynyt prototyypikytkentä ei saavuttanut kaikkia sille asetettuja tavoitteita, koska kytkentä ei ole täysin USB 2.0 -määrittelyn mukainen. Ideatasolla kytkentä on kuitenkin todistettu toimivaksi ja pienillä muutoksilla työn alkuperäiset tavoitteet olisi mahdollista saavuttaa ja ylittää.

Ensimmäinen korjattava asia toteutuksessa on liikojen kierrosten purkaminen muuntajasta. Tällä saadaan pienennettyä merkittävästi muuntajan hajainduktanssia ja samalla saadaan korkeat taajuudet kulkemaan paremmin muuntajan läpi. Tämän muutoksen pitäisi mahdollistaa kytkennän toimiminen USB 2.0 full-speed -määrittelyn mukaisesti.

Muita kehityskohteita olisi U1:n ohjauksen muuttaminen väylän D+ -linjasta toimivaksi. Tällöin kytkentä ei olisi riippuvainen USB-SUPI-kortin USB-ohjaimesta. Low-speed-tuen lisääminen vaatii melko paljon uusia komponentteja ja olemassa olevista laitteista low-speed-nopeutta tarvitsevat lähinnä vain hiiret ja näppäimistöt, joten siksi sitä ei voi pitää kiinnostavana lisäyksenä.

Kiinnostavin jatkokehityskohde olisi USB 2.0 high-speed -tuen lisäys. Työmäärällisesti se on merkittävämpi kuin muut kehitysehdotukset, mutta tarjoaisi kytkennälle huomattavasti laajemman käyttöalueen.

7.2 Tulevaisuuden kehityssuunta

Hintaherkissä sovelluksissa kapasitiivinen suojaerotus tulee yleistymään. Samoin se soveltuu hyvin myös suurille datanopeuksille. Lisäksi se mahdollistaa fyysisesti pienemmät kytkennät kuin muuntajatoteutus. Full-duplex-väylissä muuntajasuojaerotus tulee säilyttämään asemansa yksinkertaisuutensa ansiosta. Myös muuntajien fyysinen koko pienenee datanopeuden kasvaessa. Pidemmällä aikavälillä väylien suojaerotustarve tulee vähenemään optisten kaapeleiden käytön yleistyessä. Osaltaan myös langattomien tekniikoiden kehitys tulee vähentämään suojaerotuskytkentöjen tarvetta.

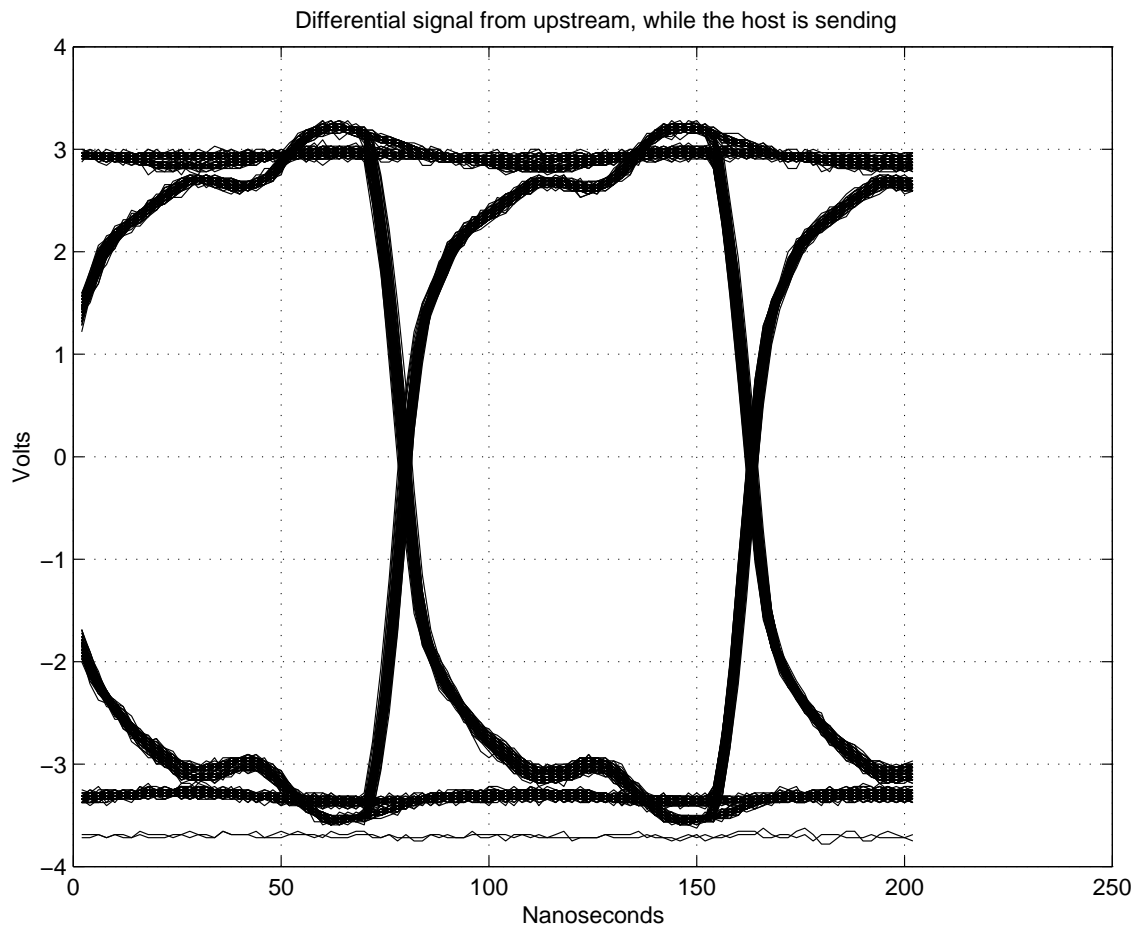
LÄHTEET

- [1] USB Implementers Forum, Universal Serial Bus 3.0 Specification. 12.11.2008. Saatavissa (20.2.2010): <http://www.usb.org/developers/docs/>. 482 s.
- [2] USB Implementers Forum, Universal Serial Bus 2.0 Specification. 12.11.2000. Saatavissa (20.2.2010): <http://www.usb.org/developers/docs/>. 482 s.
- [3] USB Implementers Forum, Getting a Vendor ID [WWW]. Saatavissa (20.2.2010): <http://www.usb.org/developers/vendor/>
- [4] Linux kernel 2.6.31 Release Notes. 9.9.2009. Saatavissa (21.2.2010): http://kernelnewbies.org/Linux_2_6_31 USB 3 support
- [5] USB Implementers Forum, First Certified SuperSpeed USB Consumer Products Announced, Press release. 5.1.2010. Saatavissa (21.2.2010): http://www.usb.org/press/SuperSpeed_USB_Consumer_Cert_FINAL_2_.pdf
- [6] USB Implementers Forum, On-The-Go and Embedded Host Supplement to the USB Revision 2.0 Specification. 08.05.2009. Saatavissa (20.2.2010): <http://www.usb.org/developers/docs/>, 70 s.
- [7] IEEE:n standardi 1394-2008, IEEE Standard for a High-Performance Serial Bus. 21.10.2008.
- [8] Apple Inc, Firewire tuotemerkin lisensointiehdot. 3.2001. Saatavissa (2.3.2010): <http://developer.apple.com/softwarelicensing/agreements/firewire.html>
- [9] Standardi IEEE 802.3-2008. IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements Part 3: Carrier Sense Multiple Access With Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications
- [10] Bluetooth specification version 4.0. 17.12.2009. Saatavissa (22.2.2010): <http://www.bluetooth.com/Bluetooth/Technology/Building/Specifications/Default.htm>

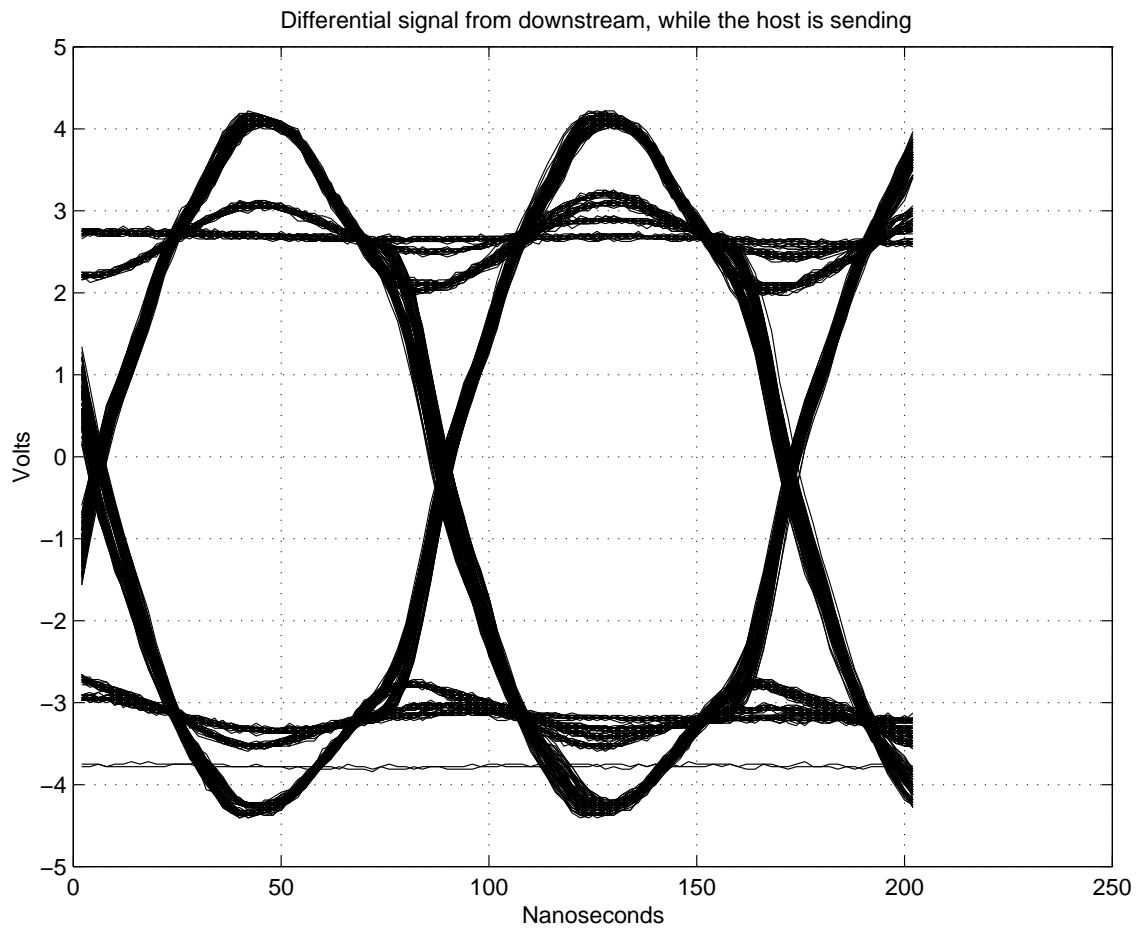
- [11] USB Implementers Forum, Wireless Universal Serial Bus Specification Revision 1.0. 12.05.2005. Saatavissa (20.2.2010): <http://www.usb.org/developers/wusb/docs/>, 303 s.
- [12] WiMedian Alliance, Distributed Medium Access Control (MAC) for Wireless Networks, MAC Specification, Release 1.5. 1.12.2009. Saatavissa (21.2.2010): <http://www.wimedia.org/en/index.asp>
- [13] WiMedian Alliance, Multiband OFDM Physical Layer Specification, PHY Specification: Final deliverable 1.5. 11.8.2009. Saatavissa (21.2.2010): <http://www.wimedia.org/en/index.asp>
- [14] S. Junnila ja J. Niittylahti, "Use of Bluetooth in Medical Systems", in Proc. 19th IASTED Int Conf on Applied Informatics (AI'2001), Innsbruck, Austria, Feb 19-22, 2001, pp. 488-494.
- [15] IEEE:n standardi 802.11-2007, IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange Between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 12.6.2007
- [16] Standardi SFS-EN 60601-1, Medical Electrical Equipment - Part 1: General Requirements for Safety. 5.3.2007
- [17] K.V.T. Piipponen, R. Sepponen, P. Eskelinen, "A Biosignal Instrumentation System Using Capacitive Coupling for Power and Signal Isolation", Biomedical Engineering, IEEE Transactions on, vol.54, no.10, pp. 1822-1828, 10.2007
- [18] B&B electronics, UH401 Series datalehti. Saatavissa (22.2.2010): http://www.bb-europe.com/product_family.asp?FamilyId=651 tai <http://www.bb-europe.com/>
- [19] Analog Devices, ADuM4160 -piirin datalehti. 9.20009. Saatavissa (22.2.2010): <http://www.analog.com/en/interface/digital-isolators/adum4160/products/product.html>

- [20] Standardi ITU-T Recommendation G.703, Physical/electrical characteristics of hierarchical digital interfaces. 11.2001
- [21] Standardi SFS-EN 60950-1, Tietotekniikan laitteet. Turvallisuus. Osa 1: Yleiset vaatimukset. 20.5.2002
- [22] Fairchild Semiconductor, FOD8001 -piirin datalehti. 3.2009. Saatavissa (22.2.2010): <http://www.fairchildsemi.com/pf/FO/FOD8001.html> tai <http://www.fairchildsemi.com/products/opto/>
- [23] Texas Instruments, ISO721M-EP -piirin datalehti. 6.2008. Saatavissa (22.2.2010): <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/iso721m-ep.html>
- [24] Sigma Designs Inc., UWB over Coax, White Paper. Saatavissa (21.2.2010): http://www.sigmadesigns.com/Support/pdf_files/uwb_over_coax.pdf
- [25] Amidon Associates Inc:n muuntajien sydämien datalehdet. Saatavissa (22.2.2010) <https://www.amidoncorp.com/pages/specifications>
- [26] S. Junnila, Potilasvalvonnan mittausjärjestelmän liittäminen USB-väylään, Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 4.5.1999
- [27] S. Junnila, J. Ruoho ja J. Niittylahti, "Medical Isolation of Universal Serial Bus Data Signals", in Proc. 9th IEEE Int Conf on Electronics, Circuits and Systems (ICECS'2002), Dubrovnik, Croatia, Sep 15-18, 2002, pp. 1215-1218.

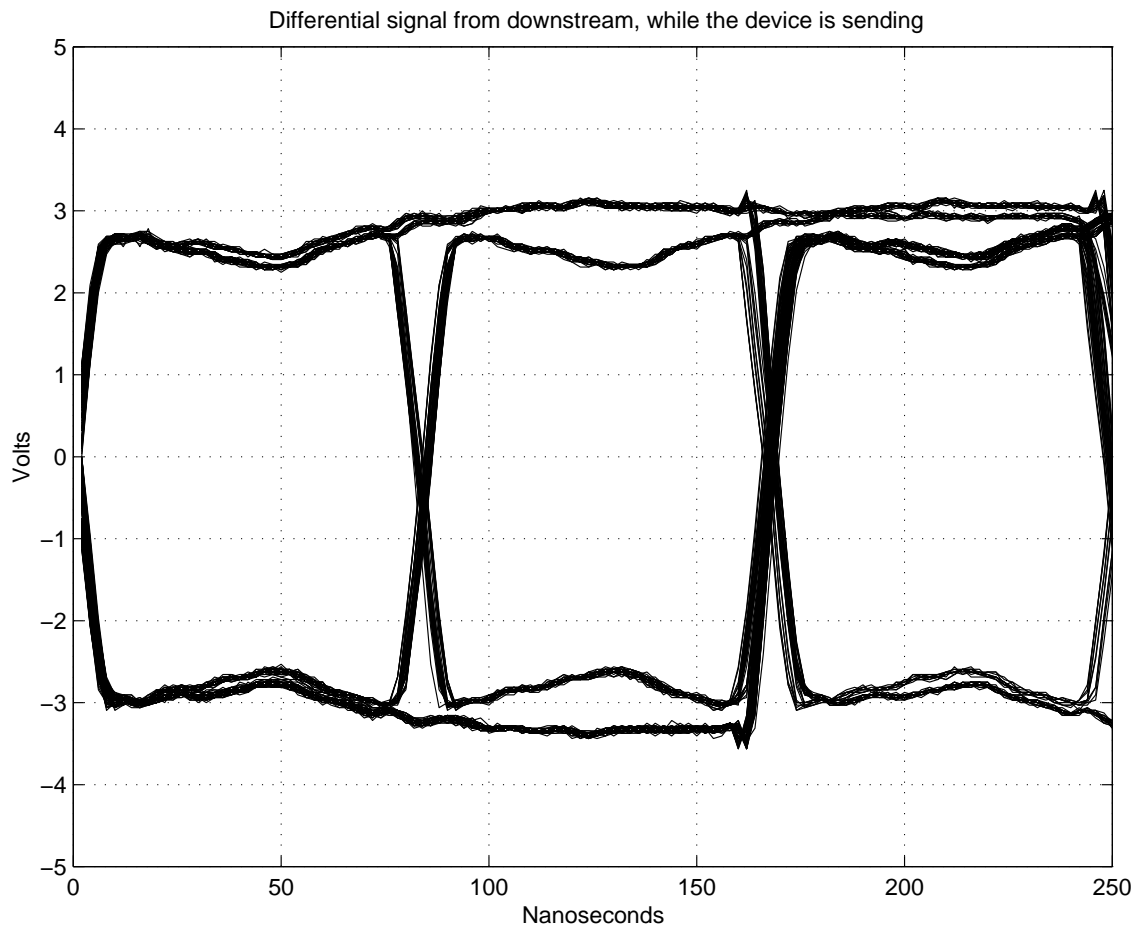
LIITE 1: EROMUOTOINEN ISÄNNÄN AJAMA SIGNAALI ENNEN SUOJAEROTUSTA



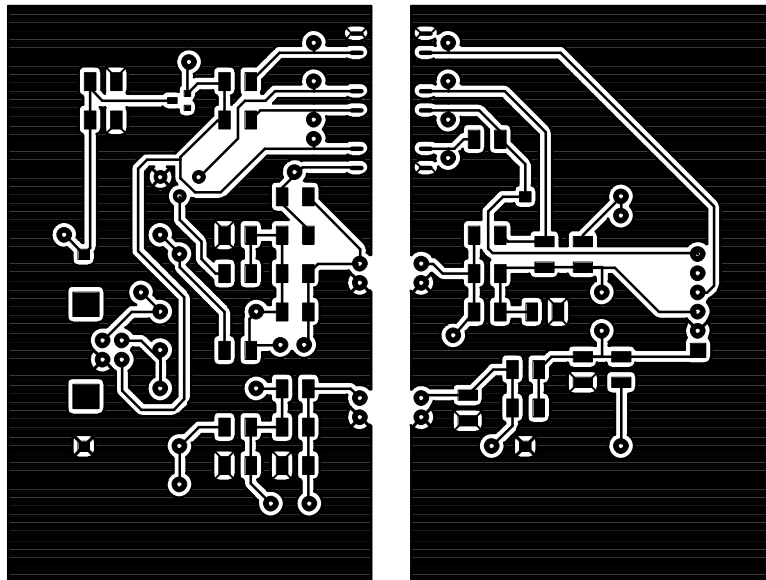
LIITE 2: EROMUOTOINEN ISÄNNÄN AJAMA SIGNAALI SUOJAEROTUKSEN JÄLKEEN



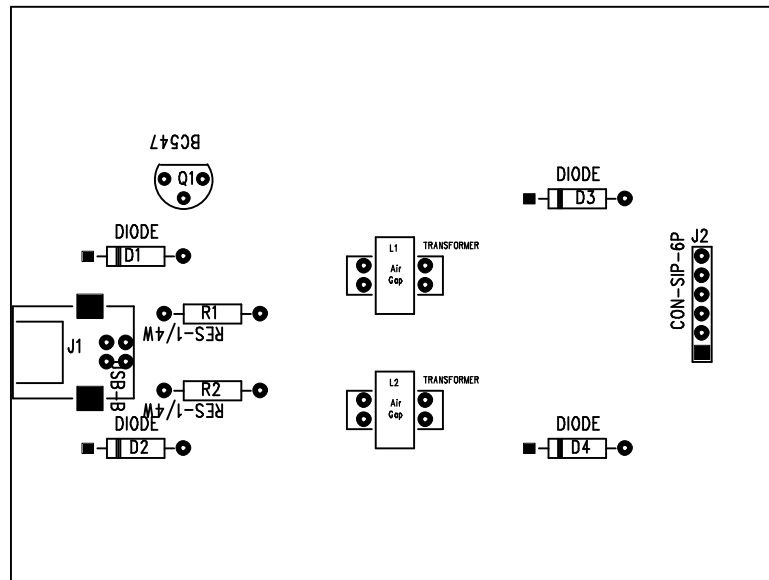
LIITE 3: EROMUOTOINEN LAITTEEN AJAMA SIGNAALI ENNEN SUOJAEROTUSTA



LIITE 4: SUOJAEROTUSKYTKENNÄN PIIRILEVYN KUPAROINTI



LIITE 5: SUOJAEROTUSKYTKENNÄN OSASIJOTTELUKAAVIO YLÄPUOLELTA



LIITE 6: SUOJAEROTUSKYTKENNÄN OSASIJOTTIELUKAAVIO ALAPUOLELTA

