

JUSSI RYTI LAHTI

SUURIEN SIGNAALINOPEUKSIEN HUOMIOINTI PIIRILEVY-  
SUUNNITTELUSSA

Insinöörityö  
Kajaanin ammattikorkeakoulu  
Tekniikan ja liikenteen ala  
Tietotekniikan koulutusohjelma  
Kevät 2005

Osasto Tekniikka ja liikenne	Koulutusohjelma Tietotekniikan koulutusohjelma
Tekijä Jussi Ryttilähti	
Työn nimi Suurien signaalinopeuksien huomiointi piirilevysuunnittelussa	
Vaihtoehtoiset ammattiopinnot Elektroniikan testaussuunnittelu	Ohjaaja Jukka Heino
Aika Kevät 2005	Sivumäärä 36+3
<p><b>Tiivistelmä</b></p> <p>Insinööriyön aiheena oli piirilevysuunnittelu suurilla signaalin nopeuksilla. Työ tehtiin osana Sunit Oy:n projektia, jossa pyrittiin siirtämään suurinopeuksista dataa valokuidussa.</p> <p>Työssä käsiteltiin ongelmia ja niiden ratkaisuja piirilevysuunnittelussa, kun siirtonopeudet kasvavat. Esiin tulivat siirtolinjailmiöt, kuten heijastuminen. Työssä heijastumisia tutkittiin laboraatiolla, jonka tuloksia tulkittiin teorian pohjalta.</p> <p>Työssä keskityttiin piirilevysuunnittelun kahteen perusasiaan, jotka on piirilevysuunnittelussa otettava huomioon suuria siirtonopeuksia käyttäviä siirtolinjoja tehtäessä. Ensimmäinen tutkituista asioista oli heijastumiseen olennaisesti liittyvän impedanssin muodostuminen piirilevyyvedoille. Toinen tutkittu asia oli elektromagneettisten häiriöiden välttäminen sekä niiden siedon lisääminen piirilevyllä.</p> <p>Laboraatioiden tuloksena saatiin esiin terminoinnin eli signaalilinjan oikeanlaisen päättämisen vaikutus heijastumisiin. Heijastumisien vaikutukset korostuivat tuloksia verrattaessa oikein päätettyyn signaalilinjaan.</p> <p>Työn tulokset sovellettiin piirilevysuunnitteluun pohtimalla niiden pohjalta normaaleja tilanteita, joissa saattaisi aiheutua käsiteltyjä ongelmia esimerkiksi heijastumisia.</p>	
Luottamuksellinen Ei	
Hakusanat Piirilevysuunnittelu, siirtolinjateoria	
Säilytyspaikka	

Faculty Faculty of Engineering	Degree programme Information Technology
Author Jussi Ryttilähti	
Title PCB Design with High Signal Speeds	
Optional professional studies Design for Testability	Instructor / Supervisor Jukka Heino
Date Spring 2005	Total number of pages 36 pages and 3 pages of appendices
<p><b>Abstract</b></p> <p>This Bachelor's thesis was part of a project made for Sunit Oy. The purpose of the project was to transfer high-speed data via optical fibre. The role of this thesis in the project was to study PCB design with high signal speeds. PCB stands for Printed Circuit Board.</p> <p>The study was made by tests in the laboratory. The basis for the tests was the transmission line theory. The function of the tests was to simulate an impedance mismatched transmission line. The results of the tests were compared to the results of an impedance matched transmission line.</p> <p>According to the results, the physical dimensions of the transmission line have an effect on a signal. Too high or low impedance at the end of the transmission line can cause reflection. Reflection causes signal distortion. This was tested by shortcutting the transmission line and by leaving it open.</p> <p>The results were collected into a set of PCB design rules. These rules are to help a designer to avoid situations where mismatches appear.</p>	
Confidential No	
Keywords High-speed PCB-design. The transmission line theory.	
Deposited at	

## Sisällys

1	JOHDANTO .....	5
2	SIIRTOLINJAN PERUSTEITA .....	6
2.1	Tehon siirtyminen siirtojohdossa .....	6
2.2	Impedanssi siirtojohdossa .....	6
2.3	Impedanssin vaikutukset siirtojohdossa.....	9
3	SIIRTOJOHDON TOIMINNAN TESTAAMINEN KÄYTÄNNÖSSÄ .....	12
3.1	Suuri kuorma, avoin siirtolinja.....	13
3.2	Pieni kuorma, oikosuljettu siirtolinja.....	19
3.3	Sovitettu kuorma, terminoitu siirtolinja .....	21
4	SUURILLA NOPEUKSILLA ILMENEVÄT ONGELMAT PIIRILEVYLLÄ.....	23
4.1	Impedanssiin vaikuttavat tekijät piirilevyllä.....	23
4.2	Häiriönsieto ja häiriöiden muodostuminen .....	24
5	SUURIEN NOPEUKSIEN HUOMIOINTI PIIRILEVYSUUNNITTELUSSA .	25
5.1	Logiikkaperheet .....	25
5.2	Heijastumisien ennakointi .....	27
5.3	Impedanssien ennakointi .....	28
5.4	Impedanssit eri johdinvetotyypeissä .....	29
5.5	Häiriönsiedon ja häiriöiden muodostumisen huomiointi piirilevysuunnittelussa .....	31
6	TULOKSET .....	33
7	YHTEENVETO .....	35
	LÄHTEET .....	36
	LIITTEET	

## LYHENNELUETTELO

CML	Current Mode Logic; differentiaalilogiikkatyyppi
ECL	Emitter Coupled Logic; differentiaalilogiikkatyyppi
EMC	Electromagnetic Compatibility = elektromagneettinen yhteensopivuus
EMI	Electromagnetic Interference = elektromagneettisen häiriö
LVDS	Low Voltage Differential Signaling; differentiaalilogiikkatyyppi
LVNECL	Low Voltage Negative Emitter Coupled Logic; differentiaalilogiikkatyyppi
LVPECL	Low Voltage Positive Emitter Coupled Logic; differentiaalilogiikkatyyppi
NECL	Negative Emitter Coupled Logic; differentiaalilogiikkatyyppi
PECL	Positive Emitter Coupled Logic; differentiaalilogiikkatyyppi
TEM	Transverse Electromagnetic; signaalityyppi, jossa on poikittaiset magneettiset sekä sähköiset kentät.

## 1 JOHDANTO

Tämä insinöörityö on tehty osana Sunit Oy:lle tehtyä projektia. Sunit Oy on kajaanilainen ajoneuvotietokoneita valmistava yritys. Yrityksen pääasiallinen tuote on ajoneuvotietokoneet sekä niiden näytöt.

Sunit Oy:n projektissa pyrittiin siirtämään suurinopeuksista dataa näytölle käyttäen optista kuitua. Optisen kuidun käytön perusteena oli EMC-häiriöiden vähentäminen, EMI-sietokyvyn parantaminen sekä siirtomatkan pidentäminen.

Insinöörityön kirjallisessa osassa käsitellään suurinopeuksisen datan siirrosta aiheutuvia ongelmia, kun siirtotienä oli piirilevy. Näitä tietoja käytettiin hyväksi työn ohessa rakennetun muunninlaitteiston piirilevysuunnittelussa. Muunninlaitteiston toimintaa työssä ei kuitenkaan käydä läpi.

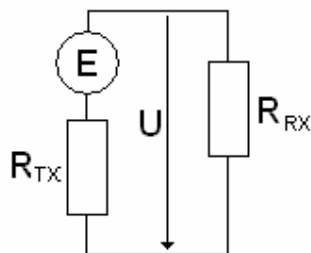
Työn aikana keskityttiin kahteen pääasiaan, signaaliin häiriötä aiheuttaviin tekijöihin sekä signaalista ulospäin suuntautuviin häiriöihin. Ulospäin suuntautuvia häiriöitä käsiteltiin vain niiltä osin, kuin piirilevysuunnittelulla niihin voidaan vaikuttaa.

## 2 SIIRTOLINJAN PERUSTEITA

Helpoin tapa lähestyä piirilevyllä tapahtuvia ilmiöitä on olettaa piirilevyllä oleva kupariveto siirtolinjana. Siirtolinjoihin sovelletaan teoriaa, jonka avulla ilmiötä voidaan käsitellä matemaattisesti. Tässä työssä käsiteltävä siirtojohtoteoria perustuu Seppo J. Halmeen kirjaan Televiestintäjärjestelmät [1, s. 59 - 69]. Siirtolinjasta käytetään lähteessä nimeä siirtojohto, joten myös tässä työssä käytetään tätä nimeä.

### 2.1 Tehon siirtyminen siirtojohtossa

Siirtojohto perustuu siihen, että teho siirtyy lähetyspäästä vastaanottopäähän. Siirtojohto täytyy siis suunnitella siten, että se palvelee tätä tarkoitusta. Teho siirtyy sähkötekniikassa siirtojohtoa pitkin sähkövirtana, mikäli virtapiiri on suljettu. Tällöin virtapiiri voidaan ajatella kuvan 1 mukaiseksi.



*Kuva 1. Perusvirtapiiri*

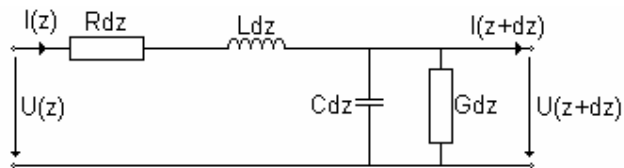
Virtapiirin tehoja tutkittaessa huomataan, että suurin teho saadaan impedanssien ollessa yhtä suuret, eli  $\frac{R_{TX}}{R_{RX}} = 1$ . Vastaanotin on siis sovitettu lähettimen kanssa.

### 2.2 Impedanssi siirtojohtossa

Tiedonsiirrossa tehonsovitus tulee todellisuudessa kuitenkin monimutkaisemmaksi, sillä käytettävä sähkö ei ole tasasähköä, vaan signaalit voivat olla sinimuotoista tai monimutkaisempia. Sinisignaalien myötä vastukset muut-

tuvat resistanssista taajuudesta riippuvaksi impedanssiksi, joka koostuu resistanssin lisäksi taajuuden mukaan muuttuvista komponenteista. Teoriassa signaalina käytetään TEM-aaltoa (Transverse Electromagnetic), joka on signaali, jonka sähkö- ja magneettikentät ovat aallon kulkusuuntaan nähden poikittaiset.

Impedanssi muodostuu siirtojohdolle kuvan 2 mukaisesti.



Kuva 2. Siirtojohtodon sijaiskytkentä

Kuvassa 2 dz kuvaa siirtojohtodon pituutta,  $U(z)$  lähetyspäässä tuotettavaa jännitettä ja  $U(z+dz)$  vastaanotettavaa jännitettä.  $Rdz$  kuvaa siirtojohtimen aiheuttamaa resistanssia ja  $Ldz$  sen induktanssia eli johtimen magneettikenttään varautunutta energiaa.  $Cdz$  on johtimen sähkökenttään varautunut energia eli kapasitanssi, ja  $G$  on vuotovirran käyttämä vuotokonduktanssi. Parametrit muodostavat siirtojohtodon ensiötekijät.

Ensiötekijöitä voidaan laskea siirtojohtodossa tietyllä tarkastelutaajuudella seuraavalla yhtälöparilla:

$$\partial U(z) = U(z + \partial z) - U(z) = -(R + j\omega \cdot L) \cdot I(z) \cdot \partial z \quad (1)$$

$$\partial I(z) = I(z + \partial z) - I(z) = -(G + j\omega \cdot C) \cdot U(z) \cdot \partial z$$

Pituuden  $\partial z$  lähentyessä nolla saadaan TEM-siirtojohtodon differentiaaliyhtälöt

$$\partial U(z) / \partial z = -(R + j\omega \cdot L) \cdot I(z) \quad (2)$$

$$\partial I(z) / \partial z = -(G + j\omega \cdot C) \cdot U(z)$$

Kaavan 2 yhtälöpari kuvaa, kuinka siirtojohtoon varautunut magneettinen energia muuttuu sähköiseksi energiaksi ja päinvastoin. Virta ja jännite ovat riippuvaisia vaihekulmasta  $\omega$ , jonka mukaan kyseisen hetken impedanssi muodostuu.

Kaavasta 2 eliminoimalla virta  $I$  saadaan niin sanottu lennätyhtälö

$$\begin{aligned}\partial^2 U(z) / \partial z^2 &= -(R + j\omega \cdot L) \cdot \partial I(z) / \partial z \\ &= (R + j\omega \cdot L) \cdot (G + j\omega \cdot C) \cdot U(z) \\ &= \gamma^2(j\omega) \cdot U(z)\end{aligned}\tag{3}$$

Lauseeseen tuli uusi tekijä, etenemiskerroin  $\gamma$ , joka voidaan esittää kompleksimuotoisena sekä olennaisilla tekijöillä

$$\begin{aligned}\gamma &= \alpha + j\beta \\ &= \sqrt{(R + j\omega \cdot L) \cdot (G + j\omega \cdot C)}\end{aligned}\tag{4}$$

Kaavassa 4 reaaliosaa  $\alpha$  sanotaan vaimennuskertoimeksi ja imaginääriosaa  $\beta$  vaihekertoimeksi.

Lennätyhtälön ratkaisut ovat ilmeisesti tyyppiä  $\exp(\pm \gamma \cdot z)$ , olkoon siis

$$U_+(z) = U_+ \cdot \exp(-\gamma \cdot z),\tag{5}$$

joka edustaa positiiviseen z-suuntaan etenevää aaltoa. Samalla tavalla voidaan myös määrittää negatiiviseen suuntaan kulkeva aalto vaihtamalla etenemiskerroin negatiiviseksi. Johtimessa kulkeva aalto saadaan siis yhdistämällä nämä kaksi vastakkaisiin suuntiin kulkevaa aaltoa

$$U(z) = U_+ \cdot \exp(-\gamma \cdot z) + U_- \cdot \exp(\gamma \cdot z),\tag{6}$$

missä  $U_+$  ja  $U_-$  ovat matemaattisesti integroimisvakioita.

Virranvoimakkuudet  $I(z)$  saadaan myös vastaavasti ratkaistua. Jännitehäviöyhtälöstä saadaan

$$\frac{\partial U_+}{\partial z} = -U_+ \cdot \gamma \cdot \exp(-\gamma \cdot z) = -(R + j\omega \cdot L) \cdot I(z), \quad (7)$$

eli positiiviseen suuntaan etenevä virta-aalto

$$I_+(z) = \frac{U_+ \cdot \gamma \cdot \exp(-\gamma \cdot z)}{(R + j\omega \cdot L)} = \frac{U_+}{Z_0} \cdot \exp(-\gamma \cdot z), \quad (8)$$

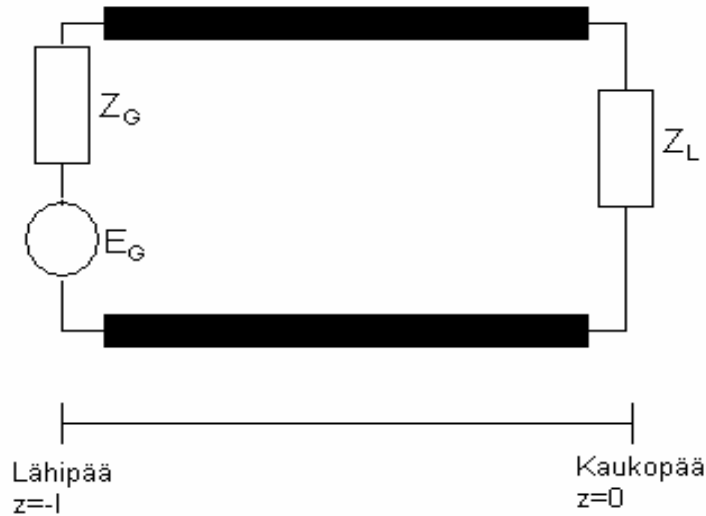
missä jännitteen ja virran suhteeksi saadaan aaltoimpedanssi  $Z_0$ .

$$Z_0 = \frac{(R + j\omega \cdot L)}{\gamma} = \sqrt{\frac{(R + j\omega \cdot L)}{(G + j\omega \cdot C)}} \quad (9)$$

Aaltoimpedanssia sanotaan vaimennus- ja vaihekertoimen tavoin siirto johdon toisiotekijöiksi. Aaltoimpedanssi kertoo etenevän aallon jännitteen ja virran suhteen. Negatiiviseen suuntaan etenevää aaltoa tutkittaessa päästään samalla yhtälöllä, mutta positiivisella etenemiskertoimella samaan kaavaan negatiivisena. Tämä kertoo, että aaltoimpedanssi on sama myös aallon takaisin kulkiessa.

### 2.3 Impedanssin vaikutukset siirto johdossa

Kuvassa 3 on kuvattu siirto johdon osat, jotta ne olisivat matemaattisten yhtälöiden yhteydessä helpompi hahmottaa.



Kuva 3. Siirtojohtdon osat [1]

Yleensä aalto kokee johtimen kaukopäässä heijastuksen impedanssien epäsovituksessa. Aallot kohtaavat kulkiessaan samassa siirtojohtimessa, mutta eri suuntiin. Etenevää aaltoa tutkiessa täytyy siis huomioida myös palaavan aallon aiheuttamat vaikutukset. Usein tunnetaan reunaehto johdon kaukopäässä  $z = \ell$ , esimerkiksi  $I = \frac{U_L}{Z_L}$ , joten ratkaisu saadaan molemmista aalloista.

$$U(\ell) = U_+ \cdot \exp(-\gamma \cdot \ell) + U_- \cdot \exp(\gamma \cdot \ell) = U_L \quad (10)$$

$$I(\ell) = I_+ \cdot \exp(-\gamma \cdot \ell) + I_- \cdot \exp(\gamma \cdot \ell) \quad (11)$$

$$= \left( \frac{U_+}{Z_0} \right) \cdot \exp(-\gamma \cdot \ell) - \left( \frac{U_-}{Z_0} \right) \cdot \exp(\gamma \cdot \ell) = I_L$$

Näistä voidaan ratkaista heijastuvan aallon  $U_-$  suuruus:

$$U_- = U_+ \cdot \left( \frac{Z_L}{Z_0} \right) \cdot \frac{\exp(-2 \cdot \gamma \cdot \ell)}{(Z_L + Z_0)} \quad (12)$$

Tämä voidaan lausua myös käyttämällä heijastuskerrointa  $\rho$ . Kuormituksen heijastuskerroin  $\rho_L$  voidaan todeta seuraavasti, kun koordinaatiston origo on asetettu kaukopäähän, jolloin  $z=0$ ,

$$\rho_L = \frac{U_-}{U_+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (13)$$

Johdon sanotaan olevan sovitettu, kun  $Z_L = Z_0$ , kuten jo tehon siirrossa todettiin. Tällöin  $\rho_L$  on 0, eikä paluusuuntaista aaltoa, eli heijastusta muodostu.

Tämä on tiedonsiirrossa haluttu tilanne, sillä heijastukset ovat enimmäkseen häiritseviä ja vahingollisia.

Heijastuskerroin muualla johdossa on

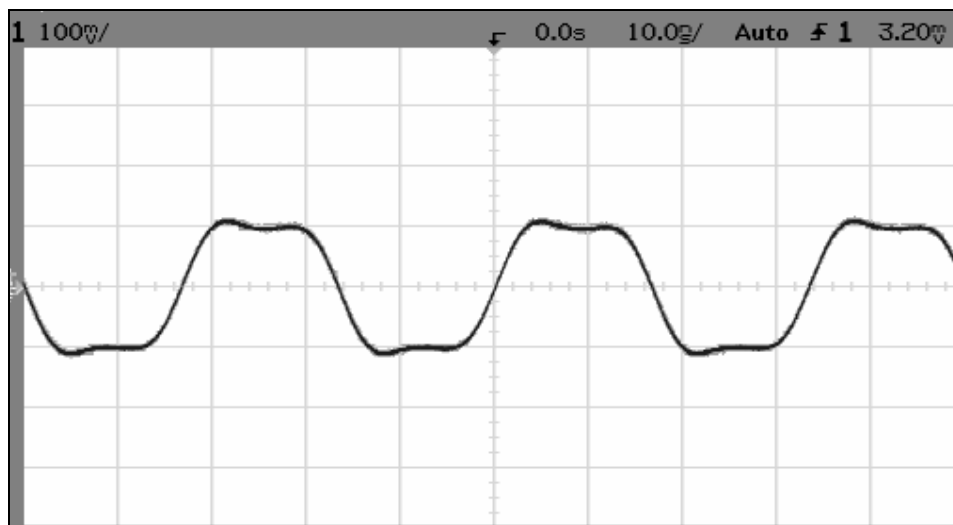
$$\rho(z) = \frac{U_-(z)}{U_+(z)} = \rho_L \cdot \exp(-2 \cdot \gamma \cdot z) \quad (14)$$

jolloin koordinaatti  $z$  on negatiivinen. Heijastuskerroin syöttöpäässä saadaan antamalla arvo  $z = -\ell$ , siis

$$\rho(-\ell) = \rho_L \cdot \exp(2 \cdot \gamma \cdot \ell). \quad (15)$$

### 3 SIIRTOJOHDON TOIMINNAN TESTAAMINEN KÄYTÄNNÖSSÄ

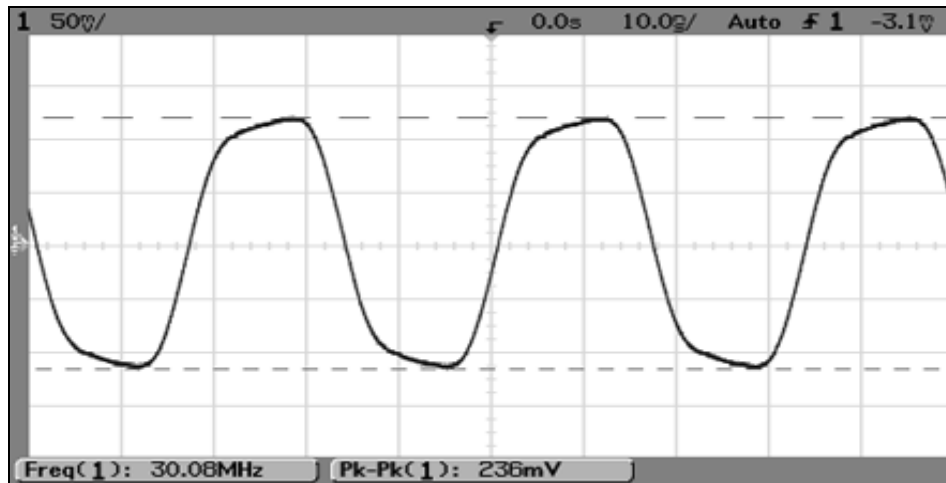
Siirtojohdon testattiin käytännössä syöttämällä signaaligeneraattorilla (Agilent 33250A) 30 MHz:n kanttiaaltoa testattavaan kohteeseen ja tutkimalla tuloksia oskilloskoopilla (Agilent 54622D). Testattava kohde oli piirilevylle jyrstetty 10 cm:n mittainen johdin veto, johon signaali vietiin ja tuotiin pois käyttäen 50  $\Omega$ :n koaksiaalikaapeleita. Tämä laitteisto on esitetty liitteessä A. Testejä tehtiin muutamia erilaisia, jotta erilaisissa tilanteissa tapahtuvat ilmiöt saatiin esiin. Testeissä käytettiin kuvan 4 mukaista signaalia.



*Kuva 4. Mittauksessa käytetty signaali*

Kuvassa 4 esitetty signaali mitattiin kytkemällä signaaligeneraattori suoraan oskilloskooppiin koaksiaalikaapelilla. Signaalissa havaittavat ylijäykset nousevan ja laskevan reunan jälkeen johtuvat oskilloskoopin etuasteesta. Etuasteen kaistanleveyttä on keinotekoisesti laajennettu, mikä aiheuttaa tämän ylijäyksen. Laajennuksen seurauksena signaaliin muodostunutta ylijäykstä sanotaan soimiseksi (Ringing). [2, s. 17.]

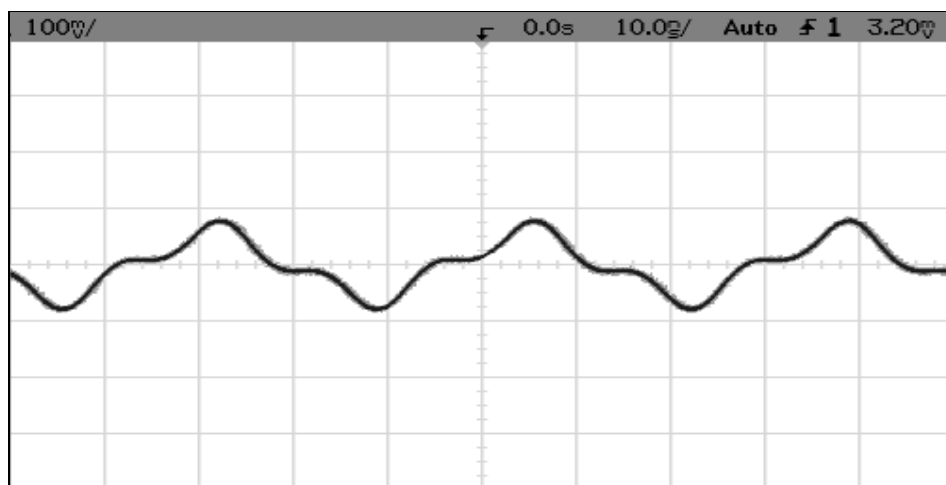
Kulkiessaan testattavan piirilevyn kautta signaali muuttui kuvan 5 mukaiseksi.



Kuva 5. Mittauksessa käytetty signaali mittauskohteen jälkeen mitattuna

### 3.1 Suuri kuorma, avoin siirtolinja

Ensimmäinen testi suoritettiin piirilevylle siten, että signaali vietiin piirilevyn sisään, mutta ulostulo jätettiin auki. Tällöin kuorma muodostui äärettömän suureksi, eli virtapiiri oli avoin. Mittaus suoritettiin piirilevyllä olevasta johdinvedosta senttimetrin välein oskilloskoopilla siten, että oskilloskoopille otettiin maapotentiaali neljästä eri paikasta. Mittauksia tehtiin yhdeksän, signaalien erojen selvittämiseksi, sekä kolme jokaista maapistettä kohti maajohdinten selvittämiseksi. Kuvassa 6 on esitetty tyypillinen piirilevyiltä mitattu tulos. Lisää tämän mittauksen tuloksia on esitetty liitteessä B.



Kuva 6. Piirilevyiltä otettu mittaustulos siirtolinjan ollessa avoin

Tuloksia tutkittaessa huomattiin kolme tapahtunutta ilmiötä; mitattavan signaalin vääristyminen, eri kohdista otettujen mittausten keskinäiset poikkeamat sekä oskilloskoopille käytetyn maapotentiaalin vaikutus mittauksiin.

Mitattavan signaalin vääristymä

Mitattavan signaalin vääristymää tutkittaessa huomattiin tapahtuneen heijastuksen aiheuttama aaltojen summutuminen. Tämä on tapahtunut teoriassa esitetyn kaavan 13 mukaisesti. Kuorman ollessa äärettömän suuri heijastuskertoimeksi muodostuu 1, eli aalto palaa takaisin siirtojohtoa myöten samantyyppisenä kuin heijastuskohtaan tullessa.

Käytetylle signaalille voidaan laskea aallonpituus ja siten signaalien risteävät kohdat. Tämä voidaan tehdä käyttämällä kaavaa 16

$$v = f \cdot \lambda \Rightarrow \lambda = \frac{v}{f} \quad (16)$$

missä  $v$  on nopeus, jossa käytetään sähkömagneettisen aaltoliikkeen nopeutta tyhjiössä, eli  $2,9979 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ . Kaavassa  $f$  on taajuus ja  $\lambda$  aallonpituus [3, s. 129]. Tällä kaavalla laskettaessa saadaan käytetylle signaalille aallonpituudeksi noin 10 m. Tällöin voidaan laskea kohtaavien signaalien vaihe-ero kaavan 19 mukaisesti,

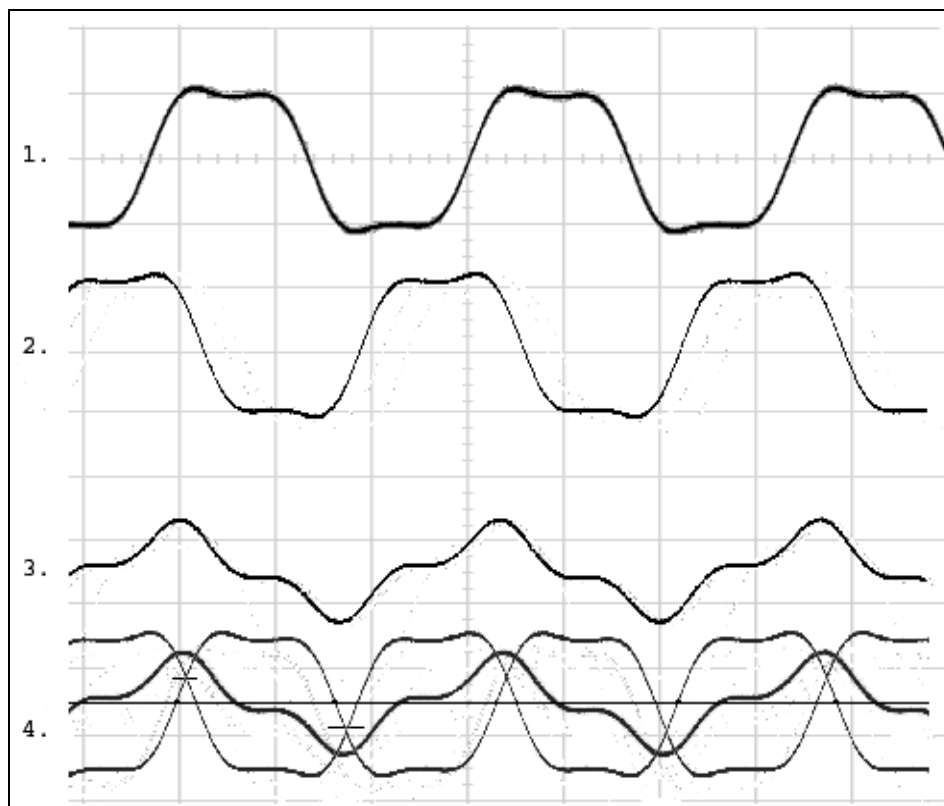
$$\varphi = \frac{\lambda_E}{\lambda} \cdot 360^\circ, \quad (17)$$

missä  $\varphi$  on signaalien vaihe-ero,  $\lambda_E$  on signaalien matkallinen ero ja  $\lambda$  on aallonpituus.

Kaavalla 17 laskettaessa saadaan, että esimerkiksi 4 cm:n kohdasta [ liite1, kuva A1 ] mitattaessa kohtaavien signaalien vaihe-eroksi noin  $75^\circ$ . Matkallinen

ero tässä tapauksessa muodostuu metrin mittaisesta kaapelista, sekä mittauspisteen ja kaapelin yhdistävästä 6 cm pitkästä piirilevystä. Näin ollen signaalien matkallinen ero on 2,12 cm, koska signaali kulkee 1,06 m matkan edestakaisin.

Kuva 7 havainnollistaa alkuperäisten signaalien summautumisella mitatun signaalin muodostumista. Kuva ei ole piirretty tarkoissa vaiheissa eikä jännitteissä, eivätkä signaalimuodotkaan eivät ole täysin todellisuutta vastaavia.

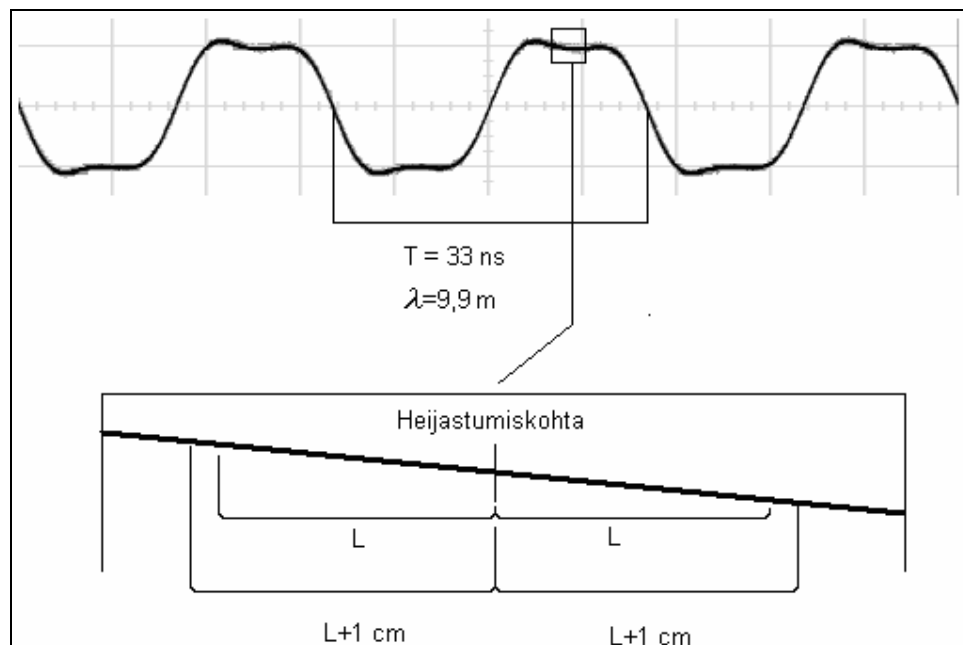


*Kuva 7. Mitatun signaalin muodostuminen avoimella kuormalla*

Kuvassa 7 kohdassa 1 on lähetetty signaali, kohdassa 2 heijastunut signaali ja kohdassa 3 on mitattu signaali. Kohdassa 4 on kaikki kuvattu samassa tilanteessa ilmiön hahmottamisen helpottamiseksi, sillä signaalien yhtäläisyydet ovat helposti nähtävissä. Kuvassa ei ole huomioitu, että heijastunut signaali on hieman vaimentunut, mistä johtuu myös mitatun signaalin jaksossa oleva epäsymmetrisyys. Epäsymmetrisyydellä tarkoitetaan huippuarvojen molemmin puolin olevien kumoutuneiden osien erilaisia tasoja keskenään.

Eri kohdista johdinta otettujen mittauksien väliset erot

Eri kohdista johdinta otettujen mittauksien välisiä eroja tutkittaessa huomataan, että signaalin amplitudi kasvaa mentäessä kohti heijastuspäätä. Ilmiönä eroavaisuudet perustuvat kohtaavien signaalien eri vaiheisiin eri kohdissa. Signaalin eri kohdat kohtaavat toisensa eri kohdista mitatuissa mittauksissa. Kuvassa 8 on havainnoitu ilmiön muodostumista.



Kuva 8. Signaalien kohtaaminen

Kuvasta 8 huomataan ilmiön syy. Esimerkiksi johtimelta 5 cm:n kohdalta mitattaessa siinä oleva potentiaali muodostuu heijastumiskohdan molemmin puolin, samalla etäisyydellä olevien potentiaalien summasta. Näiden potentiaalieron on signaalin aaltomuodosta löydettävissä, kun katsoo heijastumiskohdasta  $L$ -matkan päässä olevia kohtia.  $L$  määrittää heijastuskohdan, eli avoimeen liittimeen on matkaa mittauspisteestä 105 cm. Potentiaalieron välinen matkallinen ero on siis  $2 \cdot L$ . Mittauksessa  $2 \cdot L$  matkaksi muodostuu 210 cm.

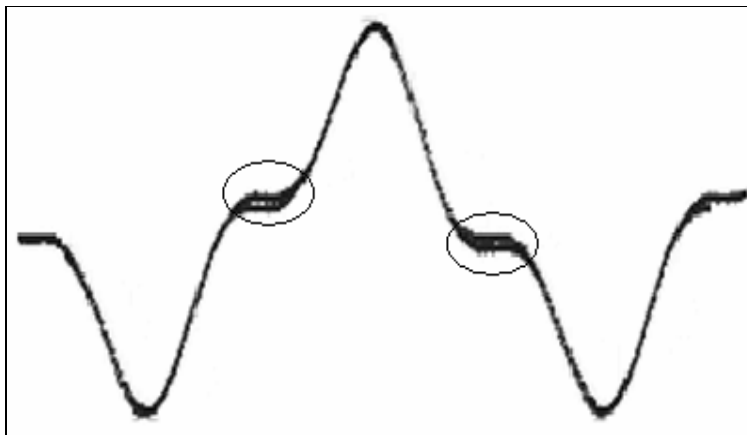
4 cm:n kohta on siis senttimetrin kauempana heijastumiskohdasta kuin 5 cm, koska matka on mitattu sisääntulopäästä (ks. liite A). Heijastumiskohta on täl-

löin avoin BNC-liitin. Näin ollen matka heijastumiskohtaan eli potentiaalien ero onkin nyt  $2 \cdot L + 1 \text{ cm}$  eli 212 cm.

Tästä johtuen eri mittapisteissä olevat jännitteet eivät voi olla koskaan samanlaisia, koska niissä kohtaavat aina hieman eri vaiheissa ja amplitudissa olevat signaalit. Esimerkiksi edellä esitetyillä matkoilla ja kaavalla 17 pystytään toteamaan 4 cm:n kohdalla vaihe-eron olevan  $76,4^\circ$ . 5 cm:n kohdalla vaihe-ero on enää  $75,7^\circ$ .

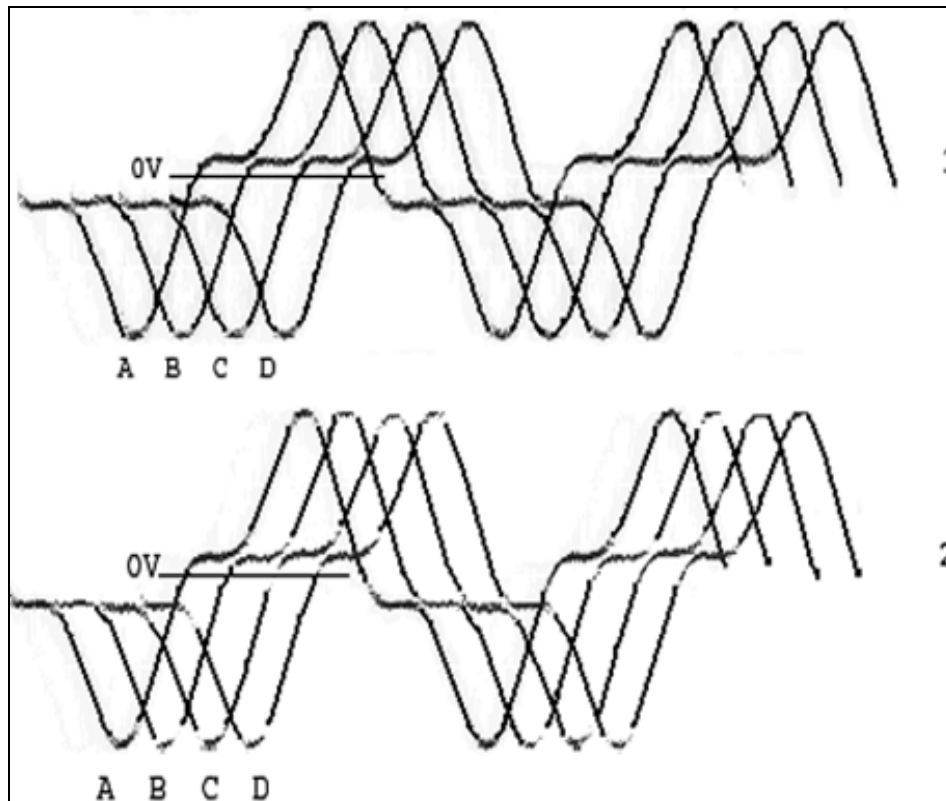
Mittalaitteelle käytetyn maapotentiaalin vaikutus mittaukseen

Mittalaitteelle käytetyn maapotentiaalin vaikutusta mitattuun tulokseen tutkittaessa huomattiin, että maapotentiaalin vaihto vaikutti mitatun signaaliin kohtaan, jossa vastakkaisvaiheiset signaalit kumoavat toisiaan. Kuvassa 9 on havainnoitu, kuinka signaalit eroavat toisistaan.



*Kuva 9. Eri maapotentiaalin aiheuttama muutos.*

Kuvassa 9 signaalit on kuvankäsittelyohjelmalla sijoitettu päällekkäin, joten eroavaisuudet tulevat ympyröidyllä alueella esiin. Signaalien amplitudit ovat samat, mutta kumoutuminen on eri maapotentiaalin vuoksi erilaista. Kuvassa 10 on havainnoitu samaa, kuin kuvassa 9, mutta hieman erillä tavoin kuvattuna.



*Kuva 10. Eri maapotentiaalien käytöstä aiheutuneet erot*

Kuvassa 10 on sijoitettu mitatut signaalit rinnakkain, jotta mittausmuutos tulee näkyviin. Tarkastelussa on käytetty kahdesta eri mittapistestä mitattua signaalia, jotka on numeroitu, 1 on 9 cm:n kohta ja 2 on 5 cm:n kohta. Maapotentiaalin ero saatiin käyttämällä neljää eri maapistettä, jotka on merkitty samoin kuin piirilevyllä, kirjaimin A:sta D:hen.

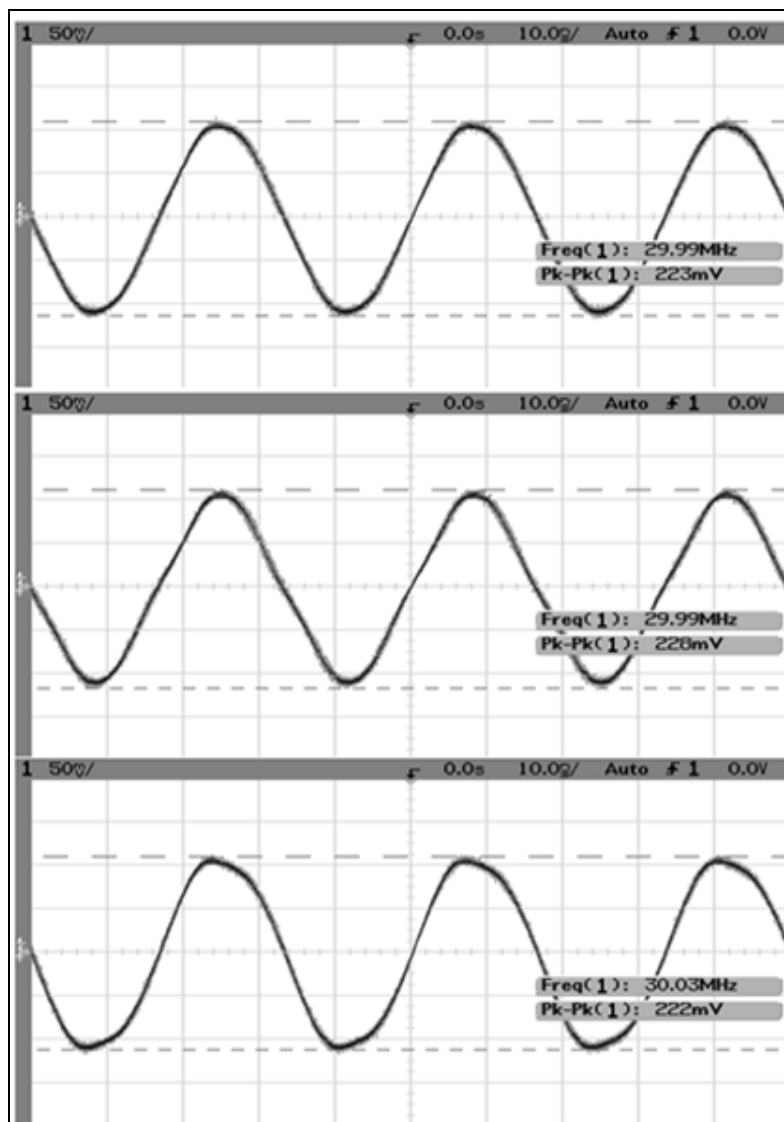
Maataso koostui kolmesta yhtenäisestä kuparialueesta. Pintakupari on alue, johon signaalimaat ovat kytkettyinä. Pohjakupari on piirilevyn toisella puolella sijaitseva koko levyn kokoinen kuparialue, joka on yhdistetty pintakupariin neljällä 0,8 mm:n läpiviennillä. Välikupari on pintakuparin kanssa samalla puolella, mutta se on yhteydessä siihen pohjakuparin kautta, johon se on yhdistetty kahdella läpiviennillä.

Tuloksista huomataan, että maapotentiaalipiste B eroaa hieman muista maapotentiaalipisteistä. Mittapiste B eroaa muista siten, että se on ainoa, joka sijait-

see välikuparilla. Tästä voidaan päätellä, että sillä oleva potentiaali johtuu piimmästä matkasta signaalilähteen maahan.

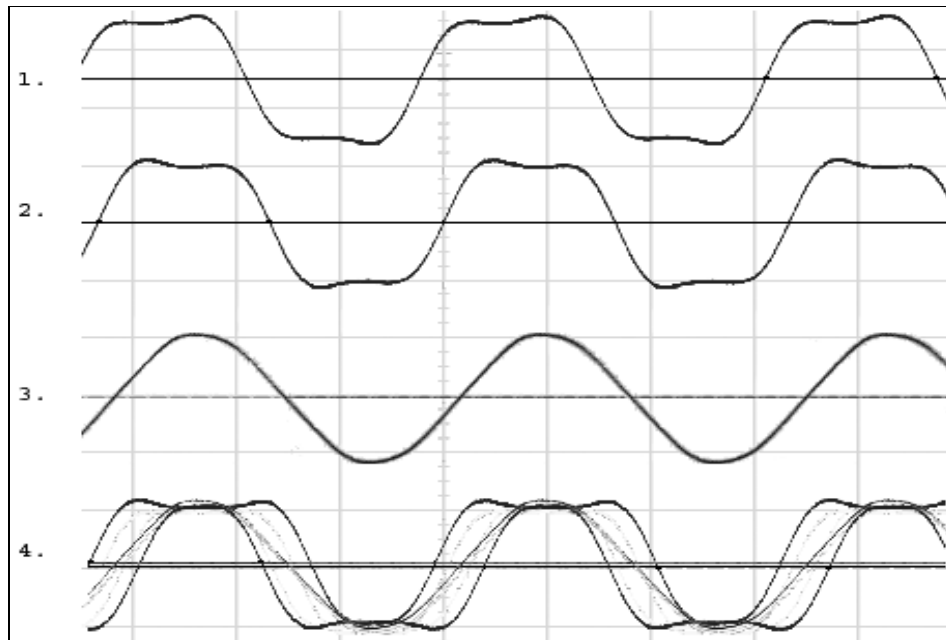
### 3.2 Pieni kuorma, oikosuljettu siirtolinja

Mittausjärjestelyt olivat samanlaiset kuin edellisessä mittauksessa, mutta edellisessä auki ollut liitin oikosuljettiin. Mittauksessa tulokset otettiin 1, 5 ja 9 cm mittapisteistä. Tulokset on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Oikosuljetusta siirtolinjasta mitatut signaalit

Teorian mukaan on tapahtunut täysi heijastuminen, kuten ensimmäisessä mittauksessa. Heijastuskerroin on kaavan 15 mukaan  $-1$ , kun kuorma on  $0$ . Tällä kertaa signaalin vaihe vaihtuu vastakkaiseksi kuin heijastuspisteeseen tultaessa. Mitattaessa signaaleja huomattiin, että käytetty kanttiaalto oli muuttunut siniaaltoa muistuttavaksi. Tätä tutkittaessa teorian pohjalta huomattiin, että tämä johtuu heijastumisen muutoksesta, eli nyt huippukohdat ovat molemmissa aalloissa kohdakkain. Näin ollen kohtaavien aaltojen piti voimistaa toistensa huippujännitteitä, mutta mittauksessa amplitudi vahvistui vain  $0,2$  mV. Tätä havainnollistetaan kuvassa 12, jossa kuvaa on käsitelty kuvankäsittely ohjelmalla samalla tavalla kuin kuvassa 7.

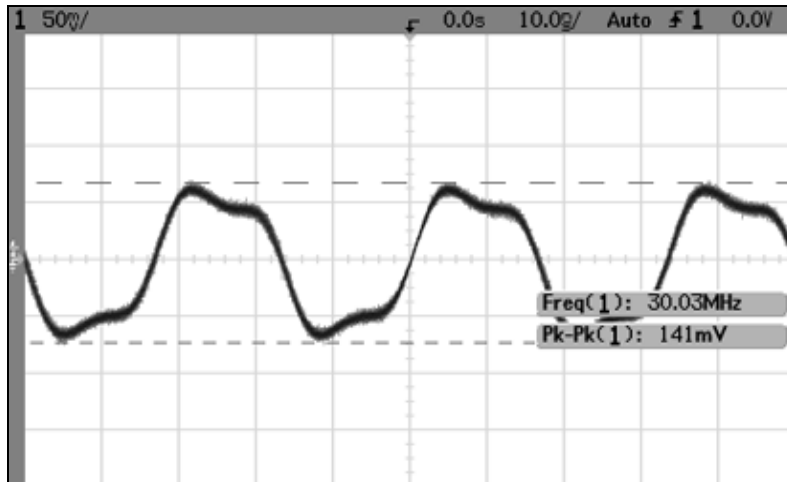


*Kuva 12 Signaalin muodostuminen oikosulku tilanteessa*

Kuvassa 12 on sama aaltomuoto kuin kuvassa 7 mutta nyt heijastuneen signaalin vaihetta on käännetty. Kuvan 12 kohdassa 4 on yhdistetty lähetetty, mitattu ja heijastunut signaali samaan kuvaan, jolloin niiden keskinäistä suhdetta on helppo havainnollistaa. Kuvassa käytetty signaalimuoto on ilman testilaitteistoa mitattu aalto, joten se ei vastaa oikeaa aaltoa.

### 3.3 Sovitettu kuorma, terminoitu siirtolinja

Seuraavassa mittauksessa mitattavalta piirilevytä lähtevä koaksiaalikaapeli päätettiin  $50\ \Omega$  terminaattorilla. Mittaukset toistettiin edellisissäkin mittauksissa käytetyllä tavalla. Yksi mittaustulos on esitetty kuvassa 13, ja loput ovat liitteessä C.



Kuva 13. Terminoidun mittauksen tulos

Mittausjärjestelyt eroavat alkuperäisen signaalin mittauksesta siirtojohtojen impedansseilla. Alkuperäisen signaalin mittauksessa signaalin kulkureitti oli seuraavanlainen:  $50\ \Omega$ :n signaaligeneraattorin lähdöstä  $50\ \Omega$ :n koaksiaalikaapeliin ja sieltä lopuksi  $50\ \Omega$ :n tuloon oskilloskooppiin. Terminoidussa mittauksessa signaalin kulkureitti oli: signaaligeneraattorista  $50\ \Omega$ :n koaksiaalikaapeliin ja puolessa välissä n.  $100\ \Omega$ :n piirilevyllä ja siitä koaksiaalikaapelin kautta  $50\ \Omega$ :n terminointivastukseen.

Terminoidusta linjasta mitattu signaali on samanlainen kuin alkuperäinen signaali. Tosin sen amplitudi on hieman alle  $100\ \text{mV}$  eli puolet pienempi kuin alkuperäinen signaali. Kuvassa 14 on alkuperäinen ja terminoitu signaali yhdistettynä niiden samankaltaisuuden toteamiseksi.



*Kuva 14 Terminoidun signaalin vertaus alkuperäiseen*

Näiden epäsovituskohtien eivät ole juuri vaikuttaneet signaaliin, sillä signaalit ovat edelleen hyvin paljon toistensa kaltaisia. Amplitudin lasku puoleen kertoo sovituksen onnistumisesta tarkasteltaessa mittaustuloksia kaavan 2 pohjalta. Tässä mittauksessa tapahtui kaavassa 2 yhteydessä todettu tapahtuma, eli suuri tehonsiirto saadaan aikaiseksi kuorman yli ollessa puolet käytetystä jännitteestä.

Eri kohdista otetuista mittauksista huomattiin, että johtimeen ei enää muodostunut seisovaa aaltoa, kuten täysheijastuksessa muodostuu. Tämä huomattiin siitä, että mittaustulokset olivat amplitudiltaan samat joka mittauskohdassa. Mittaustuloksista otetuissa kuvissa näkyy pieniä tasoeroja sekä erikoisia häiriöitä, jotka tulivat samassa tilassa testauksessa olleesta radiolähtimestä.

## 4 SUURILLA NOPEUKSILLA ILMENEVÄT ONGELMAT PIIRILEVYLLÄ

Piirilevyllä ilmenee nopeuksien ja taajuuksien kasvaessa ongelmia, joita voi olla vaikea huomata. Ongelmia voidaan välttää, kun niiden aiheuttajat tunnetaan.

### 4.1 Impedanssiin vaikuttavat tekijät piirilevyllä

Impedanssin muodostumista piirilevyllä täytyy tutkia, jotta heijastumisia voitaisiin välttää. Piirilevyä tutkittaessa kuvan 2 sijaiskytkennän perusteella voidaan tutkia kuvassa esitettyjen impedanssien muodostajia piirilevyllä.

Siirtojohtoon tuleva resistanssi  $R$  muodostuu piirilevyllä käytetystä johtimen materiaalista, joka yleensä on kupari. Tämä ominaisuus on resistanssin tekijöistä suurin, mutta lisäksi resistanssiin vaikuttavat muutamat pienemmät tekijät.

Suurilla taajuuksilla johtimissa sähkömagneettinen kenttä ei enää tunkeudu johtimen ytimeen, vaan virta ahtautuu johtimen pintaan. Pinnassa olevan, virran käyttämän tunkeutumissyvyys voidaan laskea seuraavasti

$$\delta = \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}, \quad (18)$$

missä  $\mu$  on aineen magneettinen permeabiliteetti ja  $\sigma$  sen johtavuus. Tällöin tämä ilmiö vaikuttaa myös resistanssiin, joten resistanssin kaava on silloin

$$R = R_1 \cdot \sqrt{\frac{f}{f_1}}, \quad (19)$$

Tämän lisäksi resistanssiin vaikuttaa hieman myös lämpötila, joka esimerkiksi kuparilla kasvattaa resistanssia n. 4 % yhtä lämpöastetta kohti. [1, s. 69]

Piirilevyllä suurin kapasitanssin muodostaja on vedon fyysinen sijainti muihin vetoihin nähden, kuten maatasoihin. Tämän myötä kapasitanssiin vaikuttaa myös piirilevyn valmistusmateriaali. Materiaalin suhteellinen permittiivisyys  $\epsilon_r$ ,

vaihtelee 2:n ja 5:n välillä. Myös permittiivisyyden tarkkuudet vaihtelevat eri piirilevymateriaaleilla suuresti. Esimerkiksi yleiselle epoksilasikuitulevyllä  $\epsilon_r$  on 4,1 ja 5,3 välillä ja tämän arvo voi vaihdella 10 %, samalla levyllä. [4.]

Induktanssiin suurin vaikuttava asia on virta, joten piirilevyllä induktanssiin ei voida juurikaan vaikuttaa muuten kuin vedon pituudella ja sijainnilla. Häiriötekijänä induktanssi täytyy kuitenkin ottaa huomioon, sillä virran vaihtelut virtajohtimessa aiheuttavat signaalilinjoin häiriöitä, jotka kytkeytyvät tällöin induktiivisesti.

Induktanssi pysyy samana olosuhteista riippumatta, vain taajuuden kasvaminen pienentää induktanssia virran ahtautuessa johtimen pintaan [1, s. 70].

Konduktanssin muodostavat eristehäviöt ja vuotovirrat, joita voi muodostua piirilevyn materiaalin ja suojalakkojen kautta.

#### 4.2 Häiriönsieto ja häiriöiden muodostuminen

Perinteiset, kuten TTL-signaalit aiheuttavat paljon sähköisiä häiriöitä eli EMC (Electromagnetic compatibility)-häiriöitä, jotka ovat haitallisia entistä herkemille komponenteille. TTL-signaalien suurin häiriöiden tuotto on niiden suuret jännitevaihtelut. Mitä suurempi jännitteenmuutos on, sitä suurempi on sen ympärillä tapahtuva sähkökentän muutos.

Suurten nopeuksien mukana tulevat myös signaalin fyysisien mittojen tuomat rajoitukset piirilevysuunniteluun, jottei piirilevy muutu siirtolinjasta antenniksi.

Signaalit ovat myös entistä herkempiä ulkoisille häiriötekijöille, koska signaalitasojen väliset jännitteet ovat pienempiä. Ulkoiset häiriötekijät pääsevät helposti vaikuttamaan suojaamattomiin piirilevyyvetoihin, toisin kuin esimerkiksi suojattuihin kaapeleihin.

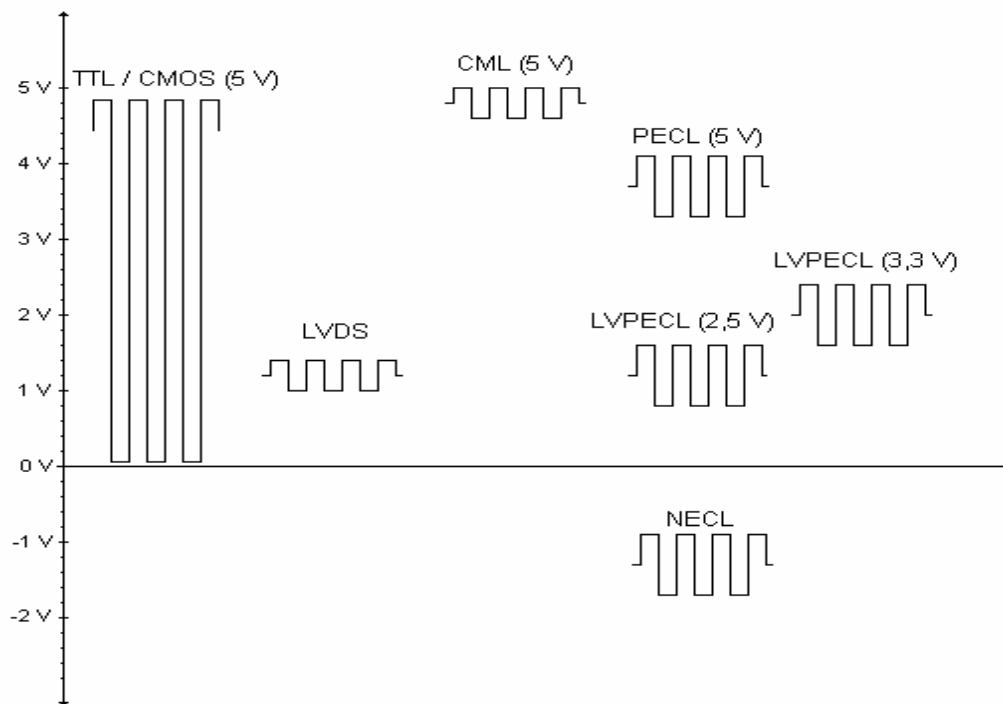
## 5 SUURIEN NOPEUKSIEN HUOMIOINTI PIIRILEVYSUUNNITTELUSSA

Tunnettaessa piirilevyn ominaisuuksien vaikutukset voidaan ennakoida niiden vaikutuksia siirrettävään signaaliin. Suurena muutoksena suurien nopeuksien myötä ovat myös nopeammat logiikat. Logiikat vaikuttavat myös hieman piirilevysuunnitteluun erikoisjärjestelyjen, kuten terminointien vuoksi. Erikoisjärjestelyiden vuoksi on hyvä tutustua myös hieman näihin logiikoihin.

### 5.1 Logiikkaperheet

Suurinopeuksiseen tiedonsiirtoon on jouduttu kehittämään erilaisia logiikkaperheitä, koska perinteinen TTL-logiikka on liian hidasta.

TTL-logiikan suurilla nopeuksilla yleensä korvaa ECL-logiikka tai sen muunnokset, LVDS- ja CML-logiikat. Kuvassa 15 on esitettyä eri logiikkojen jännite-  
tasot samassa kuvassa eron suhteuttamiseksi.



Kuva 15. Logiikkaperheiden jännitetasot

Negatiivista käyttöjännitettä käyttävää, alkuperäistä ECL-logiikkaa on seurannut kehittyneempi positiivista käyttöjännitettä käyttävä versio eli PECL-logiikka. Tätä logiikkaa on seurannut myös LVPECL-logiikka, joka toimii 3,3 V tai 2,5 V positiivisella käyttöjännitteellä.

Näiden logiikkojen käytössä piirilevysuunnittelulle tärkeintä on logiikkojen tarvitsemat terminointivastukset.

ECL-logiikka perustuu avoimeen emitteriin, jolloin jokainen ulostulo vaatii terminoinnin toimiakseen. Tämä terminointi tehdään linjoista erityiseen terminointijännitteeseen, joka on ECL-logiikalla 2 V pienempi kuin käyttöjännite.

ECL-logiikan toiminta on lineaarinen, jonka vuoksi sille on ominaista myös suurempi virrankulutus kuin TTL- tai CMOS-logiikoille. ECL-logiikan sisäiset transistorit ovat jatkuvasti toiminta-alueella, jolloin ne pystyvät nopeasti vaihtamaan tilaa [5]. Vertauksena todettakoon perinteisen TTL-logiikan transistoreiden olevan normaalisti päällä tai pois.

Loogisten tasojen välisen jännitteen pienentämisellä on myös parannettu loogisten tilojen vaihtumisnopeutta, joka on tehty lyhentämällä signaalien tasojen välistä jännite-eroa.

Suuremman virrankulutuksen vuoksi joidenkin differentiaalilogiikkojen lämmöntuotanto on myös suurempi. Esimerkiksi vanhoilla negatiivisen käyttöjännitteen ECL-logiikoilla lämmöntuotannon vuoksi piirit tarvitsivat jopa jäähdytyslementtejä.

LVDS- ja CML-logiikat ovat ECL-logiikasta kehittyneempiä versioita. LVDS-logiikassa terminointivastuksia on vain yksi, joka terminointijännitteen sijaan kytketään linjojen välille. CML-logiikassa terminointia ei tarvita enää ollenkaan.

## 5.2 Heijastumisien ennakointi

Piirilevy suunnittelussa on syytä ottaa huomioon heijastukset, sillä niiden vaikutukset ovat haitallisia siirrettävälle signaalille. Heijastuksiin kuitenkin vaikuttaa vielä piirilevyvedon pituus. Piirilevyvedo voidaan käsittää siirtolinjaksi, kun sen pituus ylittää tietyn rajan. Piirilevyvedon maksimipituus voidaan määrittää kaavan 20 mukaisesti

$$l_{MAX} = 2 \cdot \frac{t_{PD}}{t_R}, \quad (20)$$

missä  $t_{PD}$  on kulkuajaviive ja  $t_R$  on lähtöasteen nousuaika. Kulkuajaviive voidaan piirilevyvedolle seuraavasti empiirisen kaavan 21 mukaisesti

$$t_{PD} = 1,016 \sqrt{0,475 \varepsilon_r + 0,67} \text{ ns/ft} \approx 6,3 \text{ ps/mm}, \quad (21)$$

missä  $\varepsilon_r$  on piirilevyrunгон suhteellinen permittiivisyys. Kulkuajaviiveenä voidaan kuitenkin käyttää yleistä arvoa 160 ps/tuumaa, eli 6,3 ps/mm, joka on yleinen arvo 50  $\Omega$  impedanssille piirilevyvedolle [6].

### Heijastumiset käytännössä

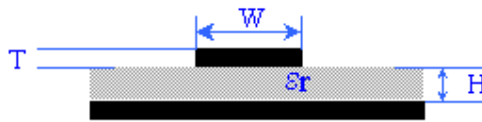
Osittaista heijastumista tapahtuu usein elektroniikassa. Lähtöasteen impedanssin ollessa korkeampi kuin linjan, silloin signaaliin tulee ”soimista”, kuten oskilloskoopin etuasteessa tapahtui, alussa tehdyissä mittauksissa. Epäsovituksen ollessa toisinpäin aiheutuu signaalin ”porras” alaspäin sointikohdan tilalle. [7]

Testilaitteistossa heijastumisen vaikutukset tulivat näkyviin kuvassa 5, jossa on porras nousevan ja laskevan reunan jälkeen. Tämä johtui piirilevyvedon lähes kaksinkertaisesta impedanssista signaaligeneraattoriin verrattuna.

### 5.3 Impedanssien ennakointi

Impedanssin muodostuminen tunnettaessa myös piirilevyvedolle voidaan laskea vetokohtainen impedanssi.

Impedanssien laskemiseen on olemassa valmiita empiirisiä kaavoja, jotka on tarkoitettu erilaisille piirilevyvetotyypeille. Kuvassa 15 on esitetty mikrostripille (microstrip) eli piirilevyn pintaan tehdyille vedolle tarkoitettuun laskukaavaan tekijät.



Kuva 15. Impedanssin laskemiseen käytettävät tekijät [6]

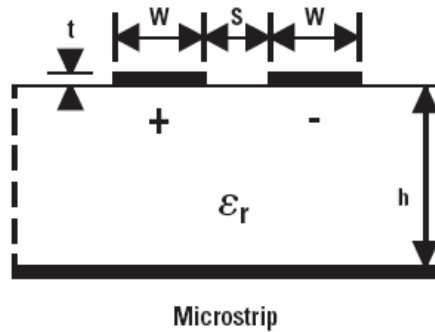
Laskukaava siis muodostuu seuraavasti kaavan 22 mukaisesti [5.]

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1,41}} \ln \left( \frac{5,98 \cdot H}{0,8 \cdot W + T} \right), \quad (22)$$

jossa  $Z_0$  on vedon impedanssi,  $\epsilon_r$  piirilevynrungon suhteellinen permittiivisyys,  $H$  piirilevyn runkomateriaalin paksuus,  $W$  piirilevyvedon leveys ja  $T$  kuparin paksuus.

Impedanssit differentiaalipareissa

Piirilevyvetojen impedanssin laskemisessa täytyy ottaa huomioon muutamia seikkoja, jos käytetään differentiaalipareja. Impedanssilaskukaavan kertoimet ovat differentiaalipareille erilaiset ja kaavaan on huomioitava myös differentiaalisuus. Kuvassa 16 on esitetty differentiaaliparien laskukaavan tekijät.



Kuva 16 Differentiaaliparin tekijät [4.]

Laskukaavat muodostuvat kaavan 23 mukaisesti [4.].

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{0,457 \cdot \epsilon_r + 0,67}} \ln \left( \frac{4 \cdot H}{0,67 (0,8 \cdot W + t)} \right) \Omega \quad (23)$$

$$Z_{DIFF} = 2 \cdot Z_0 \left( 1 - 0,48 e^{-0,96 \frac{S}{h}} \right) \Omega$$

#### 5.4 Impedanssit eri johdinvetotyypeissä

Erialaisten signaalilinjatyyppeiden huomioon ottamisen lisäksi on syytä ottaa huomioon myös käytettävä piirilevykerros. Molempien signaalilinjatyyppeiden, niin differentiaalisen kuin normaalin yksittäisen linjankin, impedanssin määräytymiset muuttuvat, kun ne siirtyvät piirilevyn välikerrokseen.

Signaalilinjojen kulkiessa kerrosten välissä niiden nimitys muuttuu mikrostripistä striplineksi (stripline). Tällaisissa piirilevyvetotyypeissä on otettava huomioon, millaisessa käytössä signaalilinjaa ympäröivät kerrokset ovat.

Pahin tilanne signaalivedolle on, että sen ympärillä on voimakasvirtaisia tai -jännitteisiä linjoja, jotka voisivat vaikuttaa signaaliin eristemateriaalin läpi. Tällaisia voisivat olla TTL-linjat tai vielä suuremmat tasoerot omaavat linjat, esimerkiksi RS-232-linjat.

Hyvät olosuhteet välikerroksien signaalijohtimille luovat ympäröivät maapotentiaaliin yhdistetyt tasot. Vastakkaisiin käyttöjännitteisiin kytkettyjen tasojen väliin signaalijohtimia ei kuitenkaan saa reitittää.

Striplineä ei saa sekoittaa sulautettuun piirilevyvetoon (embedded microstrip), joka on myös välikerroksessa kulkeva piirilevyveto. Näitä kahta erottaa maatasojen määrä, joka on striplinellä kaksi ja sulautetulla piirilevyvedolla yksi. Eli striplinellä on maapotentiaalit molemmin puolin ja sulautetulla vain toisella puolella.

Impedanssien laskeminen tapahtuu striplinelle hieman eri tavoin kuin mikrostripille. Näitä laskentayhtälöitä on esitetty kaavoissa 24 ja 25. Kaavassa 24 on esitetty National Semiconductorin suosittama laskentakaava välikerroksissa kulkeville differentiaalipareille [4].

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left( \frac{4 \cdot H}{0,67 \cdot \pi (0,8 \cdot W + t)} \right) \Omega \quad (24)$$

$$Z_{DIFF} = 2 \cdot Z_0 \left( 1 - 0,374 e^{-0,26 \frac{S}{h}} \right) \Omega$$

Kaavan 24 tekijät ovat samat kuin kaavan 23.

Yksittäisille välikerroksessa kulkeville piirilevyvedoille impedanssin kaava muodostuu kaavan 25 mukaisesti [6].

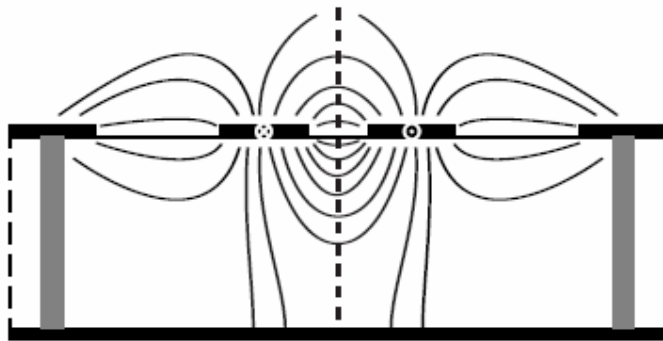
$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left( \frac{1,9 \cdot (2 \cdot H + t)}{(0,8 \cdot W + t)} \right) \Omega, \quad (25)$$

Kaavan 25 tekijät ovat samat kuin kaavan 23. Sulautetun piirilevyvedon impedanssin kaava on muuten sama kuin 25, mutta sulkulausekkeen jaettava  $1,9 \cdot (2 \cdot H + t)$  korvataan lausekkeella  $5,98 \cdot H$ . [6]

## 5.5 Häiriönsiedon ja häiriöiden muodostumisen huomiointi piirilevy-suunnittelussa

Uusilla logiikoilla on parannettu signaalin myös häiriönsietoa ja vähennetty häiriöntuotantoa. Tämä johtuu differentiaalisten linjojen käyttämisestä.

Differentiaaliset linjat perustuvat kahteen erilliseen johtimeen, joissa molemmissa kulkee sama signaali 180°:n keskinäisellä vaihe-erolla. Näin ollen ne kumoavat toistensa tuottamia, häiritseviä sähkömagneettisia kenttiä. Kuvassa 17 on kuvattu differentiaaliparien parasta säteilyn kumoutumistilannetta.

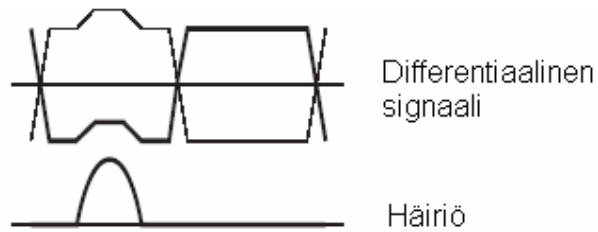


Kuva 17. Differentiaaliparien toiminta [4.]

Kuvasta on huomattavissa, että differentiaaliparit täytyy sijoittaa sopivan matkanpäähän toisistaan ja ympäröivästä maatasosta halutun hyödyn saavuttamiseksi.

LVDS-logiikkaa käyttävä valmistaja National Semiconductors suosittelee parin välistä matkaa pienemmäksi kuin vedonleveys ja matkaa maatasoon vähintään kaksinkertaiseksi parin välimatkaan verrattuna.

Differentiaalipareilla saadaan myös signaalin häiriönsietoa parannettua. Kun johtimiin kytkeytyy sähkömagneettinen häiriö, se nostaa tai laskee johdinten jännitetasoa saman verran, kun johtimet ovat lähekkäin. Näin tapahtuessa johdinten välinen jännite pysyy edelleen samansuuruisena, ja signaali pystytään edelleen tulkitsemaan oikein. Kuvassa 18 on havainnollistettu tätä tapahtumaa.



*Kuva 18. Häiriön vaikutus differentiaaliseen pariin [4]*

Piirilevysuunnittelussa täytyy suurilla nopeuksilla muistaa myös muutamia muita sääntöjä. Suorakulmia ei signaalilinjoissa saa käyttää, koska silloin piirilevyveto muuttuu helposti häiriötä säteileväksi antenniksi.

Eri puolilla piirilevyä olevat maatasot tulee olla tarpeeksi useasta kohdasta yhdistettyinä toisiinsa kuvan 10 mukaisten ongelmien välttämiseksi. Maatasojen vieni komponenteille täytyy olla yhtäläillä leveytillä samasta syystä.

## 6 TULOKSET

Työssä tehtyjen mittausten ja tutkimusten tuloksia voidaan soveltaa piirilevy suunnittelun säännöissä:

Heijastumisien välttämiseksi piirilevyllä täytyy ottaa impedanssisovitukset huomioon aina, kun vedon pituus ylittää sallitun rajan.

Terminoimattomia piirilevyvetoja ei piirilevyllä saa jäädä, esimerkiksi komponenttien jäädessä latomattomiksi. Tällaiset terminoimattomat johtimet aiheuttavat samanlaisen tilanteen kuin ensimmäisessä mittauksessa. Päättämättömät vedot voivat toimia myös antennina häiriölle, mikä on myös syy välttää niitä.

Signaali johtimia tulisi välttää reitittämästä piirilevyn läpi, varsinkin paksuista levyistä pienillä läpiviennillä. Läpiviennit muodostavat yleensä suorankulman piirilevyyn nähden ja nämä eivät ole hyväksi signaalille.

Differentiaalisille pareille suositellaan maatasojen symmetrisyyttä epäsovituksen välttämiseksi. Vain toisen johtimen läheisyydessä oleva maataso aiheuttaa parin välille epäsovituksen. [4.]

Välikerroksiin reitityksissä täytyy ottaa huomioon ympäröivien kerrosten potentiaalit ja signaali johtimet. Signaali johtimien sijoituksessa tulisi välttää sijoittamasta signaalilinjoja käyttöjännitteiden välisiin kerroksiin tai paljon häiriötä tuottavien signaalilinjojen läheisyyteen.

Signaali johtimet tulisi pitää samanpituuisina varsinkin differentiaalisissa pareissa, mutta myös samoihin paikkoihin menevien normaalien signaalilinjojen on syytä olla samanpituiset. Tällä tavoin vältetään erilaisilta kulkuaikaviiveiltä.

Johtimien liittynät piirilevyllä täytyisi pitää mahdollisimman suojattuina, eli signaalia suojaavaa potentiaalia ei saa poistaa signaali johtimelta turhaan. Täällaisesta on esimerkkinä liitteen A kuvassa A2 havainnollistettu koaksiaalikaapelin liitäntä piirilevyllä.

Piirien riittävän virran saannin varmistamiseksi on huomioitava seuraavanlaisia asioita.

- Käyttöjännite- ja maapotentiaaleille tulisi varata omat piirilevy kerrokset, joissa kaikki ylimääräinen tila on kuparoitu.
- Käyttöjännite- ja maavedot tulee tehdä riittävän leveillä piirilevyvedoilla (>1 mm).
- Piireillä täytyy olla sopivat bypass-kondensaattorit.

Kaikki tasajännitteiset linjat tulee varustaa bypass-kondensaattoreilla tarpeeksi useista kohdista vaihtosähkökomponenttien maahan johtamiseksi.

## 7 YHTEENVETO

Työssä onnistuttiin laboraatiolla saamaan esiin haluttu ilmiö eli heijastumisten vaikutukset signaaleihin. Päättämättömät siirtolinjat ovat elektroniikka-suunnittelussa yleisiä, mutta niitä otetaan harvoin huomioon ennen ongelmien esiintymistä.

Työn yhteydessä tehdyn muunninlaitteiston testauksessa huomattiin, kuinka herkkiä suuritaajuiset signaalit ovat ulkoisille häiriöille. Esimerkiksi käyttäjännitteen välittämänä häiriö voi olla vaikea ongelma herkille piireille.

Esimerkkinä terminoimattomasta siirtolinjasta voi olla näytön liittimen valinnainen sijoittaminen piirilevyllä. Noin 20 cm:n piirilevyn eri laidoille voidaan sijoittaa vaihtoehtoiset paikat näytön liittimelle, esimerkiksi kun laitetta halutaan valmistaa erilaisina variaatioina. Jos tyhjäksi jääneen liittimen suuritaajuisia signaalilinjoja ei terminoida, niin avoimet linjat voivat pilata liittimelle menevien signaalilinjojen datan.

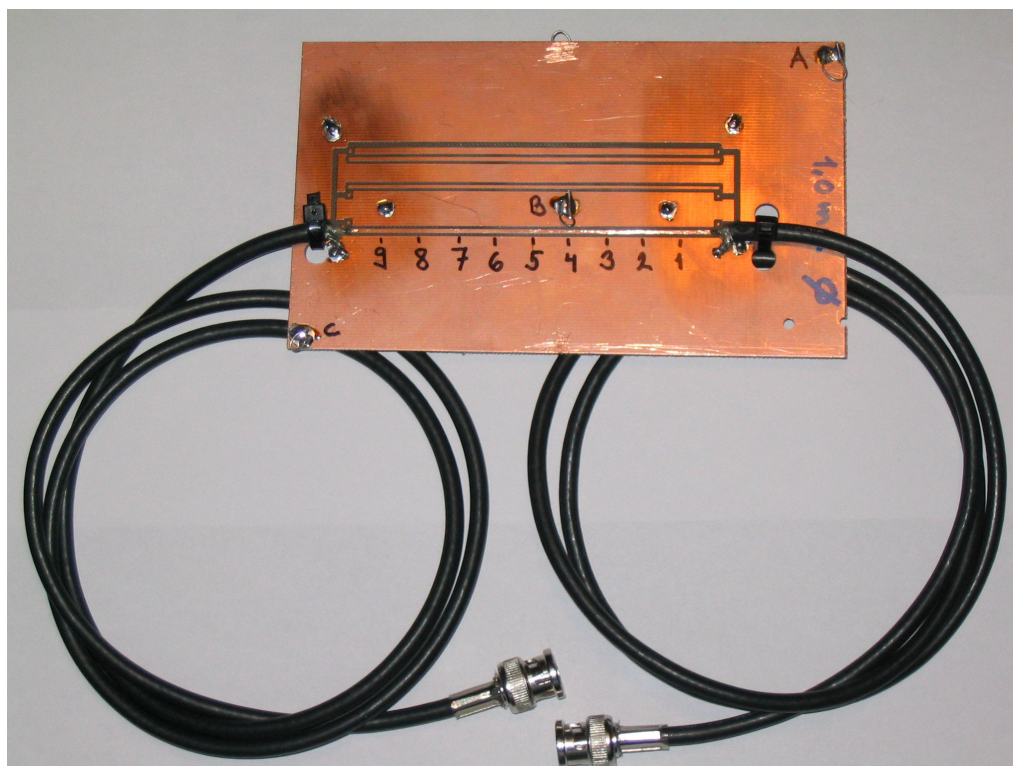
## LÄHTEET

- 1 Seppo J. Halme, Televiestintäjärjestelmät, 4. korjattu ja tarkastettu painos, 894 Otatieto Oy 1992, ISBN 951-672-238-5
- 2 Jukka Heino, Pulssitekniikan luentokalvoja, versio 1, 2003
- 3 M. Mäkelä, L. Soininen, S. Tuomola ja J. Öistämö, Tekniikan kaavasto, 3.painos, Tammertekniikka 2000, ISBN 951-9004-74-2
- 4 National Semiconductor; "LVDS Owner's Manual, Low-Voltage Differential Signaling" 3. versio, kevät 2004, luettu 29.11.2004 [WWW-dokumentti] <http://www.national.com/appinfo/lvds/files/ownersmanual.pdf>
- 5 Rudolf F. Graf, Modern Dictionary of Electronics, 6.korjattu ja tarkistettu painos, Butterworth-Heinemann 1997, ISBN 0-7506-9870-5
- 6 Douglas Brooks; "PCB Impedance control, Formulas and Resources", 1998 UltraCAD Desing, Inc, luettu 13.12.2004 [WWW-dokumentti] <http://www.ultracad.com/formula.pdf>
- 7 Mike Magdaluyo; "AN246:Transmission lines and terminations with Philips Advanced Logic families", Philips 1998, luettu 16.12.2004 [WWW-dokumentti] [http://www.semiconductors.philips.com/acrobat\\_download/application-notes/AN246.pdf](http://www.semiconductors.philips.com/acrobat_download/application-notes/AN246.pdf)

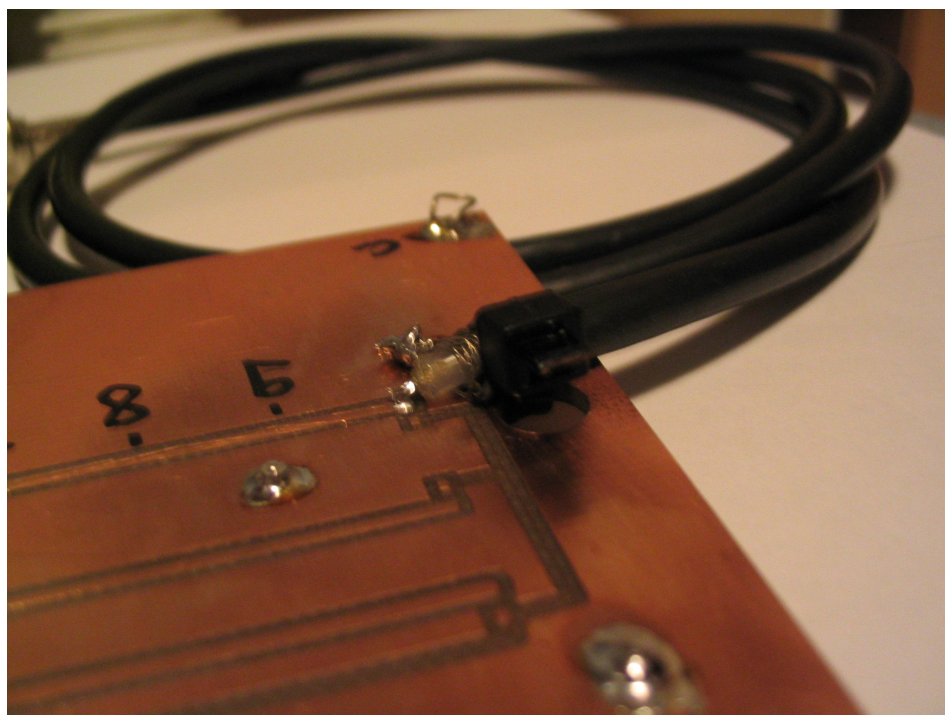
## LIITTEET

- A. Mittauksessa käytetty laitteisto
- B. Avoimesta siirtolinjasta mitattujen mittauksien tulokset
- C. Terminoidusta siirtolinjasta mitatut mittaustulokset

LAITTEISTO, JOTA KÄYTETTIIN SIIRTOJOHDON  
ILMIÖIDEN TESTAAMISEEN KÄYTÄNNÖSSÄ.

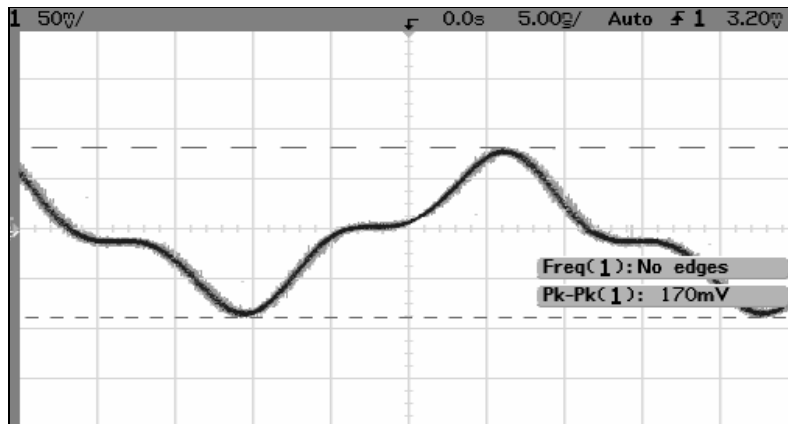


Kuva A1 Testilaitteisto

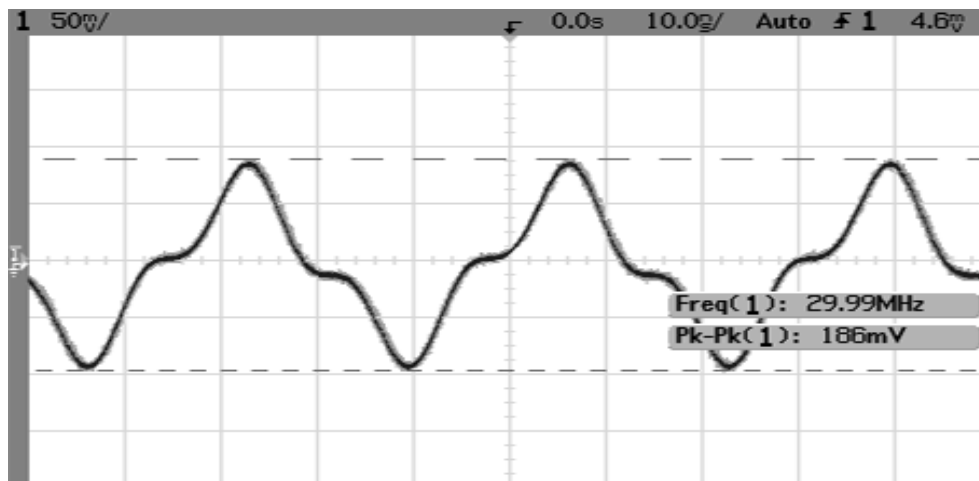


Kuva A2. Signaalijohtimen liittyminen piirilevylle

## MITTAUSTEN TULOKSET: AVOIN SIIRTOLINJA

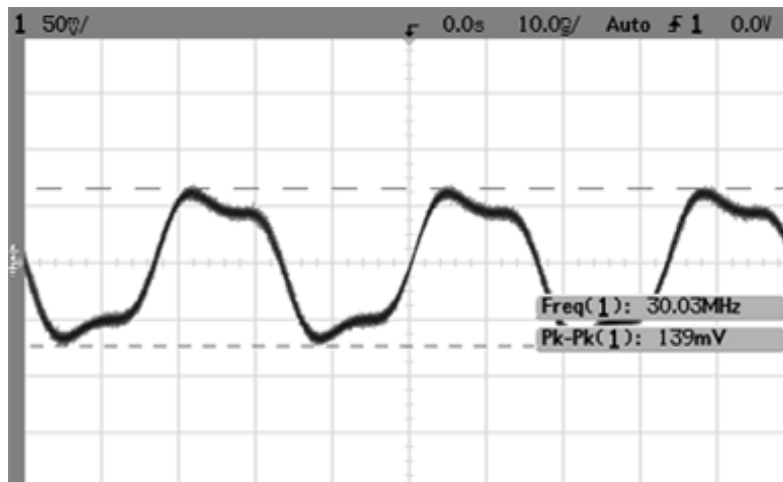


Kuva B1 Signaali piirilevyllä 2 cm päässä liittynästä, maapotentiaalin ollessa lähellä mittauspistettä.

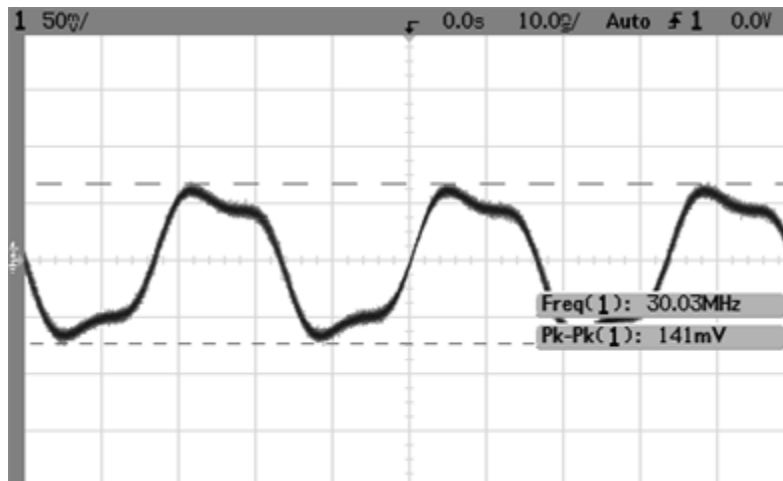


Kuva B2 Signaali piirilevyllä 7 cm päässä liittynästä, maapotentiaalin ollessa lähellä mittauspistettä.

## MITTAUSTULOKSET: TERMINOITU MITTAUS



Kuva C1 Terminoidusta linjasta 2 cm kohdalta mitattu signaali.



Kuva C2 Terminoidusta linjasta 9 cm kohdalta mitattu signaali.