



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Hannu Hartikainen

Symmetrinen mittasovitin moottorikaapeleille

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkövoimatekniikka

Insinöörityö

22.04.2020

| | |
|--|---|
| Tekijä Otsikko | Hannu Hartikainen Symmetrinen mittasovitin moottorikaapeleille |
| Sivumäärä Aika | 29 sivua 22.04.2020 |
| Tutkinto | insinööri (AMK) |
| Tutkinto-ohjelma | sähkö- ja automaatiotekniikka |
| Ammatillinen pääaine | sähkövoimatekniikka |
| Ohjaajat | yliopettaja Heikki Valmu suunnittelija Ville Forsström |
| <p>Opinnäytetyö tehdään ABB Oy:lle tutkimuksena. Työn tavoite oli selvittää, onko helppoa tapaa kytkeä ja mitata laajaa skaalaa eri poikkipinnoilla olevia moottorikaapeleita symmetrisesti. Työssä myös tutustutaan vektoripiirianalysaattoriin ja piiriparametreihin.</p> <p>Moottorikaapeli vaikuttaa merkittävästi taajuusmuuttajan johtuviin emissioihin. Kaapeleista ei ole tällä hetkellä hyviä simulointikirjastoja, joiden avulla voidaan simuloida taajuusmuuttajien emissio ominaisuuksia. Simuloimalla emissioita pystytään säästämään laitteiden tuotekehityksen, testaus ja uudelleensuunnittelu kustannuksissa.</p> <p>Opinnäytetyössä on tarkoitus suunnitella, tuottaa ja verifioida mittasovitinkonsepti moottorikaapelien mittaukseen. Työssä verrataan suunnitellun symmetrisen mittasovittimen mitattuja arvoja vanhan epäsymmetrisen mittasovittimen kanssa tehtyihin mittauksiin.</p> <p>Opinnäytetyössä todistettiin mittasovitinkonsepti toimivaksi. Konseptia voidaan tulevaisuudessa muokata erikokoisille ja erityyppisille kaapeleille. Työssä saaduista mittatuloksista pystytään rakentamaan skaalattava mallikirjasto kolmijohtimisista moottorikaapeleista.</p> | |
| Avainsanat | Sirontaparametri, Vektoripiirianalysaattori, Moottorikaapeli |

| | |
|--|--|
| Author Title | Hannu Hartikainen Symmetrical Motor Cable Fixture |
| Number of Pages Date | 29 pages 22 April 2020 |
| Degree | Bachelor of Engineering |
| Degree Program | Electrical and Automation Engineering |
| Professional Major | Electrical Power Engineering |
| Instructors | Heikki Valmu, Principal Lecturer Ville Forsström, Design Engineer |
| <p>This study was commissioned by ABB Ltd. The main goal of this thesis work was to find a way to measure a variety of different sizes and types of cables with adjustable symmetrical cable fixtures.</p> <p>Motor cable has one of the highest influences on variable frequency drives conducted emissions. Currently, there are no good libraries for simulating motor cables. By simulating emission performance on the designing stage of the device it is possible to minimize later redesign costs.</p> <p>In this thesis work, the goal was to design and verify a fixture concept for measuring motor cables. The study compared new symmetrical and old asymmetric fixture's performance.</p> <p>In this study, the concept proved working as intended. It is possible to scale the fixture for bigger cables and modify it so that it is possible to measure cables that have more inner wires. With the measurement data, it is possible to build a good library for three-phase motor cables.</p> | |
| Keywords | S-parameter, VNA, Motor cable |

Sisällys

Lyhenteet

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Piiriparametrit | 2 |
| 2.1 | Sirontaparametri | 2 |
| 2.2 | Impedanssi- ja admittansiparametrit | 4 |
| 3 | Mittasovitin moottorikaapeleille | 5 |
| 3.1 | Moottorikaapelin simuloiminen | 5 |
| 3.2 | Symmetrisen mittasovittimen tarve | 6 |
| 4 | Vektoripiirianalysaattori | 9 |
| 4.1 | Piirianalysaattorin historia | 9 |
| 4.2 | Toimintaperiaate | 10 |
| 4.3 | Kalibrointi | 12 |
| 4.4 | Mittaaminen | 13 |
| 5 | Suunnittelu | 14 |
| 5.1 | Konsepti | 14 |
| 5.2 | Kytkenäkaavio | 15 |
| 5.3 | Piirilevy | 16 |
| 6 | Verifiointi | 19 |
| 6.1 | Mittaukset | 19 |
| 6.2 | Mittatulosten käsittely | 23 |
| 6.3 | Vanhan ja uuden mittasovittimen vertailu | 25 |
| 6.4 | Tulosten oikeellisuus | 26 |
| 7 | Yhteenveto | 27 |
| | Lähteet | 29 |

Lyhenteet

| | |
|--------|---|
| ABB | <i>Asea Brown Boveri.</i> |
| ADC | <i>Analog to digital conversion.</i> Analogia-digitaalimuunnos. |
| DSP | <i>Digital signal processing.</i> Digitaalinen signaalinkäsittely. |
| EMC | <i>Electromagnetic compatibility.</i> Sähkömagneettinen yhteensopivuus. |
| EMI | <i>Electromagnetic interference.</i> Elektromagneettinen häiriö. |
| HP | Hewlett Packard. |
| IF | <i>Intermediate frequency.</i> Välitaajuus. |
| LO | <i>Local oscillator.</i> Paikallisoskillaattori. |
| p.u.l. | <i>Per unit length.</i> Yksikköpituutta kohden. |
| RF | <i>Radio frequency.</i> Radiotaajuus. |
| S | Sirontaparametri. |
| SOLT | <i>Shor open load though.</i> Oikosulku avoin kuorma siirtolinja. |
| VNA | <i>Vector network analyzer.</i> Vektoripiirianalysaattori. |
| Y | Admittanssiparametri. |
| Z | Impedanssiparametri. |

1 Johdanto

Sähkömoottoreita käytetään useissa eri sovelluksissa, kuten paperi- ja kemianteollisuudessa. Sähkömoottorit jakautuvat kahteen pääryhmään tasa- ja vaihtovirtamoottoreihin. Tasavirtamoottorin nopeudensäätö tapahtuu jännitteen suuruutta muuttamalla, jonka voi tehdä yksinkertaisimmillaan säätövastuksella. Vaihtovirtamoottorin nopeudensäätö tapahtuu jännitteen suuruutta ja sen taajuutta muuttamalla, joka tehdään taajuusmuuttajalla.

Aikaisemmin käytettiin tasavirtamoottoreita niiden yksinkertaisen nopeudensäädön takia. Tehoelektroniikan ja mikrokontrollereiden kehittymisen myötä taajuusmuuttajat ja vaihtovirtamoottorit ovat aloittaneet korvaamaan tasavirtamoottoreita. Tehoelektroniikan nopeiden kytkentöjen takia aiheutuu nopeita jännitteen- ja virranmuutoksia. Nämä jännitteen ja virran nopeat muutokset aiheuttavat elektromagneettista häiriötä. Standardiin IEC 61800-3:2018:n on määritetty, rajat paljonko taajuusmuuttaja saa tuottaa tätä korkeataajuisia häiriötä. Häiriöntuotto-ominaisuuksia on mahdollista simuloida jo tuotteen suunnitteluvaiheessa, jolloin on mahdollista säästää tuotteen uudelleensuunnittelukustannuksissa. Simulointia varten tarvitaan muun muassa matemaattinen malli kaapelista, jonka mittaaminen oli osa minun opinnäytetyötäni.

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella ja testata symmetrinen mittasovitin ABB Oy:lle, jolla voidaan kytkeä erikokoisia moottorikaapeleita vektoripiirianalysaattoriin. Työssä myös perehdytään piiriparametreihin, piirianalysaattorin toimintaan ja miten suunnitellaan impedanssisovitettu piirikortti.

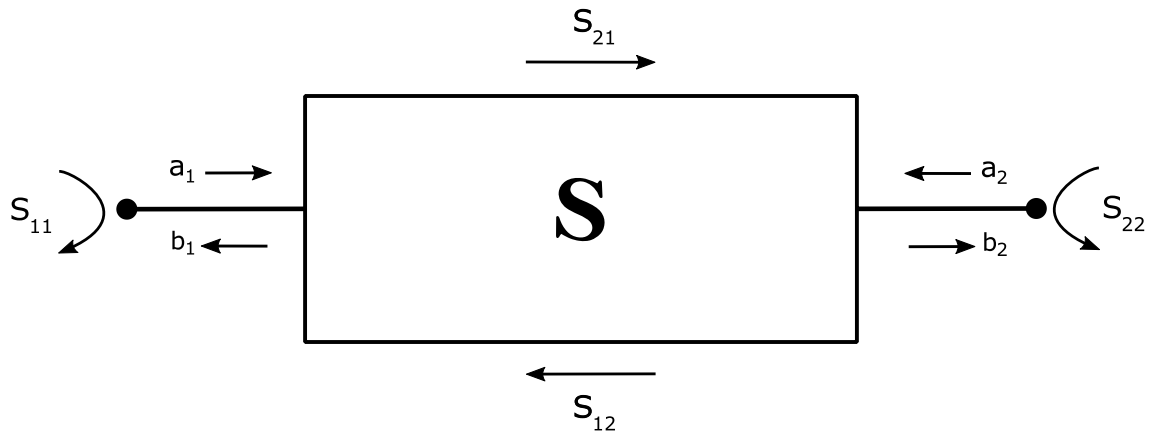
2 Piiriparametrit

Piiriparametrit ovat osa piirianalyysia. Piirianalyysin tarkoitus on tehdä piiristä käyttäytymismalli. Käyttäytymismallilla yksinkertaistetaan piiri porteiksi, joka sisältää yhden tai useamman elementin. Tämän hyvä puoli on, että monimutkainen piiri pystytään mallintamaan yksinkertaisesti. Huono puoli on se, että piirin topologia ei ole enää tiedossa ja sitä ei voi muokata. [1.]

Piiriparametrejä on useita erilaisia, joista jokaisella on oma käyttötarkoitus. Tutuin näistä parametreistä on impedanssiparametri (Z-parametri) piiriteoriasta. Z-parametrin käänteisparametri on admittanssiparametri (Y-parametri). Y-parametri on monelle vähemmän tunnettu, vaikka sen pystyy ajattelemaan intuitiivisemmin. Impedanssi kertoo paljonko jokin komponentti vastustaa virran kulkua, kun taas admittanssi kertoo kuinka hyvin se johtaa virtaa. ABCD-parametrit ovat virta ja jännite hybridi parametreja, jotka on suunniteltu simulointiin ja sarjaan kytkemistä varten. Näiden kolmen edeltävän parametrin määrittämisessä käytetään virtaa ja jännitettä. Siirontaparametrit (S-parametri) kuvaavat piiriä heijastuneen ja tulevan aallon suhteella. Siirtoparametri (T-parametri) on S-parametrien sarjaan kytkettävä muoto. [1.]

2.1 Siirontaparametri

S-parametreja käytetään kuvaamaan radiotaajuus (RF) ja mikroaaltopiirien toimintaa. S-parametrit poikkeavat muista käytetyistä parametreistä, kuten Z- ja Y-parametreistä. Z- ja Y-parametrien määrittäminen perustuu virtaan ja jännitteeseen, kun taas S-parametrit määritetään referenssi aallon ja mitatun aallon suhteella. S-parametreja määritettäessä on käytettävä joko $50\ \Omega$:n tai $75\ \Omega$:n referenssi-impedanssia. $75\ \Omega$:n referenssiä on käytetty televisioiden antennissa, mutta nykyään yleisin käytetty referenssi-impedanssi on $50\ \Omega$. Yleisimmät tavat esittää S-parametrit, ovat desibeleinä ja kulmana, paljaana lukuna magnitudin ja kulman avulla tai kompleksisena summana.



Kuva 1. Kaksiporttisen S-parametrien mittausspiiri [3; 5].

S-parametrin tunnus on S, sen alaindeksit kertovat mikä signaali on kyseessä. Ensimmäinen numero kertoo missä se on mitattu ja toinen mikä on sen lähde. Esimerkiksi S_{21} tarkoittaa sitä, että portista yksi on lähetetty signaali ja se on mitattu portissa kaksi [4.]. S-matriisin koko määräytyy mitattavien porttien määrästä. Mikäli tilanne on kuvan 1 mukainen kaksiporttimittaus, silloin siitä muodostuu kaavan 1 mukainen S-matriisi ja kaavan 2 mukainen matriisiyhtälö.

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Kaavan 1 S-parametreille muodostetaan yhtälöt 3–6, jotka ovat S-parametrien viralliset määritelmät. Muodostaessa parametrejä S_{11} ja S_{21} portti kaksi pitää terminoida, jotta voidaan olettaa a_2 olevan nolla. Parametrien S_{22} ja S_{12} kanssa tulee portin yksi olla terminoitu, jotta a_1 on nolla. [4.]

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \mid a_2 = 0 \quad (3)$$

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \mid a_1 = 0 \quad (4)$$

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \mid a_1 = 0 \quad (5)$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \mid a_2 = 0 \quad (6)$$

S-parametrit eivät rajoitu vain kaksiporttiseksi, vaan niistä voi tehdä N-porttisen (N on jokin positiivinen kokonaisluku) järjestelmän. N-porttinen järjestelmä muodostaa kaavan 7 mukaisen S-matriisin, jonka koko on N x N.

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & \cdots & S_{NN} \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.2 Impedanssi- ja admittanssiparametrit

Z- ja Y-parametrien määrittämiseen käytetään virtaa ja jännitettä. Nämä parametrit ovat toistensa käänteisparametrejä. Z-parametrien jännite on riippuvainen virrasta (8), kun taas Y-parametrien virta on riippuvainen jännitteestä (9). [1; 2.]

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Määritettäessä kaksiporttisen järjestelmän Z-parametrejä toisen portin tulee olla avoinpiiri. Täysin avoimen piirin luominen on käytännössä mahdotonta etenkin korkeilla taajuuksilla, jonka takia järkevämpää on määrittää S-parametrit ja muuttaa nämä Z-parametreiksi. [2.]

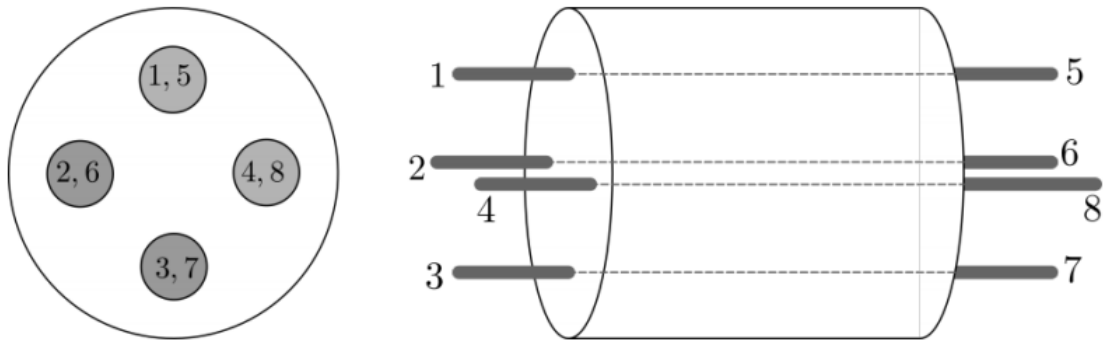
3 Mittasovitin moottorikaapeleille

3.1 Moottorikaapelin simuloiminen

Tehoelektroniikka on nykyään laajalti käytössä monessa sovelluksessa. Nopeat jännitteiden ja virran muutokset ovat suuri lähde elektromagneettiselle häiriölle (EMI). Häiriöt johtuvat tyypillisesti matalaimpedanssisten reittien kautta. Tarkkoja matemaattisia malleja hyödyntäen komponenteista ja laitteista on mahdollista jo suunnittelu vaiheessa ennen prototyyppilaitteiden testaamista arvioida sen EMI-ominaisuuksia. Simuloinnin tarkoituksena on laskea tulevia testaus ja uudelleen suunnittelu kustannuksia. [3.]

Tyypillinen tapa esittää kaapeli on sen yksikköpituutta kohden (p.u.l.) ja lennätinyhtälöiden RLCG (R on resistanssi, L on induktanssi, C on kapasitanssi, G on konduktanssi) sijaiskytkennän avulla. Kaapelin p.u.l.-parametrit saadaan joko mittaamalla, analyttisillä kaavoilla tai sähkömagneettisella simuloinnilla. P.u.l.-arvojen mittaaminen on vaikeaa ja mitattujen arvojen tarkkuus korkeilla taajuuksilla ei ollut riittävän suuri simulointia varten. Analyttisiä yhtälöitä ei ole kuin rajatulle määrälle poikkileikkausgeometrioita. Poikkileikkauksen numeerista laskentaa varten tarvitaan tarkat lähtöarvot johtimien- ja eristeiden materiaalista ja kaapelin muodosta, joita ei ole luotettavasti saatavilla. [3.]

Mikroaaltosuunnittelussa käytetään erilaisia menetelmiä taajuusriippuvaan mallintamiseen, kuten simuloituja p.u.l.-arvoja, mitattuja- tai simuloituja porttiparametrejä. Porttiparametrit ovat yleensä joko S- tai Y-matriiseja taajuuden funktiona. Kolmijohdinkaapelin kaikki Y-parametrit voi ryhmittää neljään eri ryhmään symmetrian perusteella: johtimesta itseensä heijastuva-, johtimen läpijohtuva-, johtimesta viereiseen eri päässä kaapelia johtuva- ja johtimesta viereiseen samassa päässä kaapelia johtuva signaali. Nelijohdinkaapelissa on kuusi eri ryhmää, joista neljä on samoja kuin kolmijohdin kaapelissa. Kaksi uutta ryhmää ovat: samassa päädyssä kaapelia vastakkainen johdin ja eri päädyssä kaapelia vastakkainen johdin. Kaapelin symmetrian ansiosta jokaisen tietyn ryhmän parametrit taajuuden funktiona tulisi olla yhtä suuret. [3.]

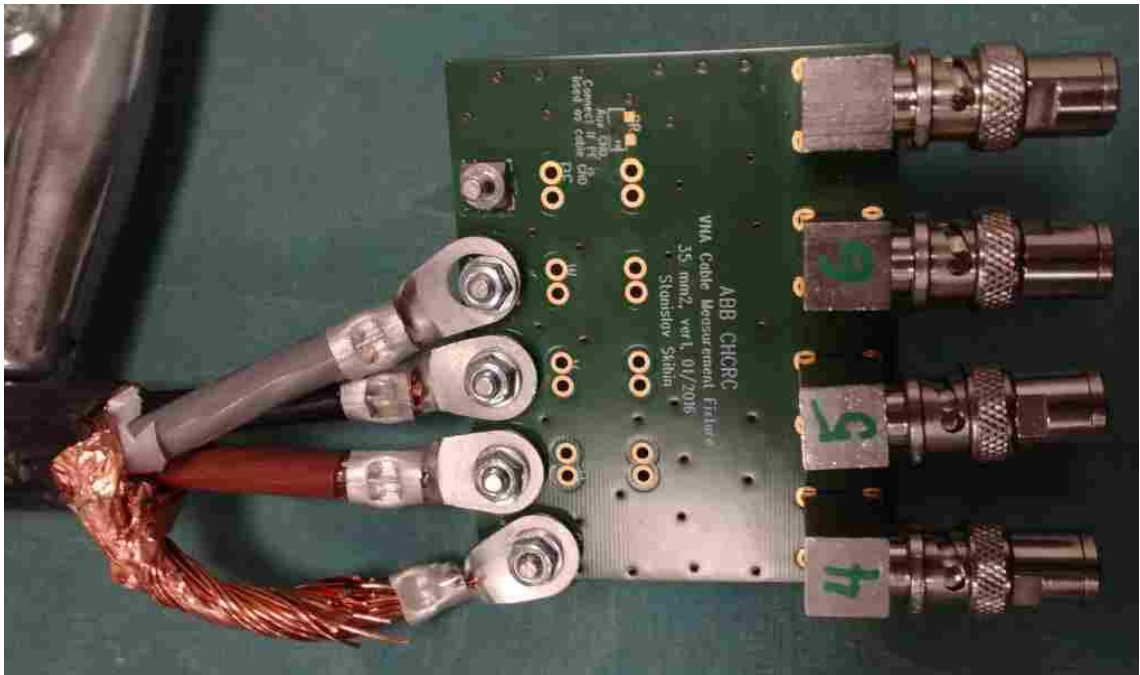


Kuva 2. Suojattu nelijohdinkaapeli [2].

Kuvassa 2 näkyy, miten kaapelin porttien numeroinnit määräytyvät. Nelijohdinkaapelissa on kahdeksan porttia, jolloin sen Y-matriisin koko on 8×8 . Matriisissa on 64 parametria. Poikkileikkauksesta nähdään nelinkertainen symmetria kaapelissa, joka tarkoittaa johtimien olevan 90 asteen kulmassa keskipisteeseen nähden. [4.] Kaapelin yhdenmukaisuutta pituussuunnassa voidaan myös hyödyntää yhtenä symmetriana keskipisteeseen nähden [4]. Näiden symmetrioiden ansiosta saadaan kuusi ryhmää 64:stä parametristä.

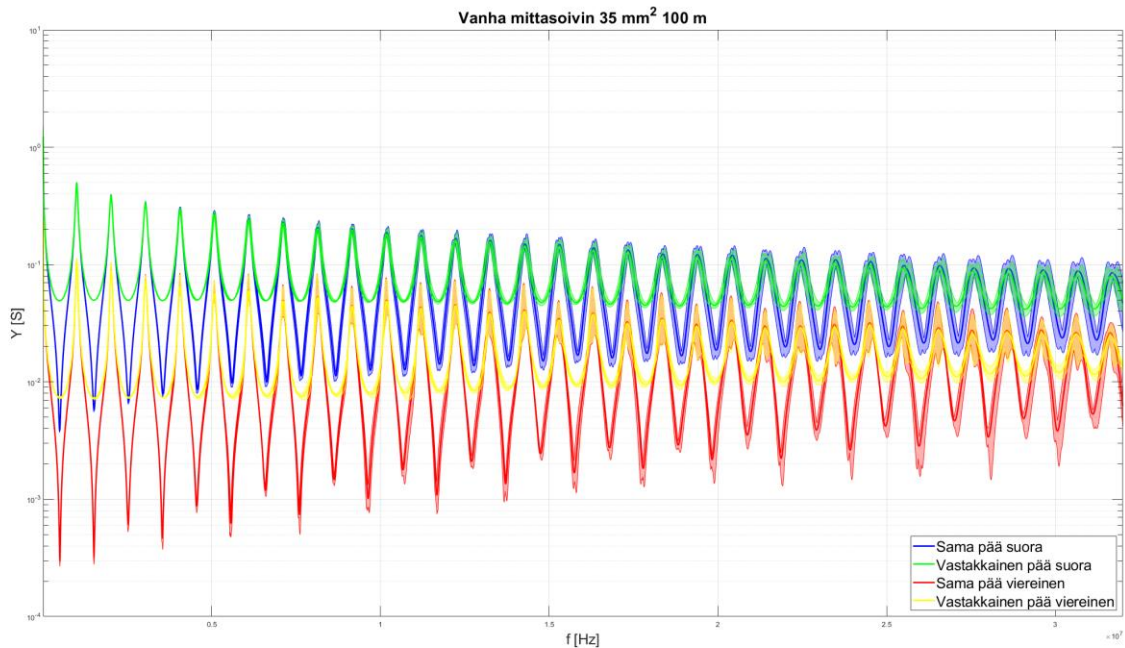
3.2 Symmetrisen mittasovittimen tarve

Nykyisen mittasovittimen ongelma on sen epäsymmetria, hankala käytettävyys ja sillä testattavien kaapelien koon rajoitteet. Korkeilla taajuuksilla tehtyihin mittauksiin tulevan virheen yksi syy on sovittimen epäsymmetria. Kaapeli täytyy levittää olemassa olevaan sovittimeen, jolloin kaapelin oma symmetria kärsii. Tämä voidaan välttää erityyppisellä sovittimella.



Kuva 3. Vanha mittasovitin.

Kuvan 3 vanhan mittasovittimen kytkeminen on vaikeaa, mikäli pyritään mahdollisimman lyhyihin johtimiin. Johtimet on taivutettava paikalleen toistensa yli, joka ei ole helppoa tai mahdollista isoilla kaapeleilla. Isoille kaapeleille ei löydy kaapelikenkiä, jotka mahtuisivat vanhaan sovittimeen. Mittasovitin on suunniteltu maksimissaan 35 mm²:n kaapelille, joten suuremmista poikkipinta-aloista joutuu leikkaamaan johtimen yksittäisiä säikeitä pois.



Kuva 4. Vanhan sovittimen Y-parametrit (100 m MCCMK 3 x 35 mm²).

Kuvassa 4 näkyy mittaus satametriselle 35 mm²:n kaapelille, joka on tehty vanhalla sovittimella ennen työn aloittamista. 7,5 MHz:n jälkeen resonanssien huiput alkavat vaeltamaan, joka osittain johtuu sovittimen kytkennän epäsymmetriasta. Tämän mittatuloksen avulla pystyy hyvin tehdä simulointimallin tälle tietylle kaapelille, mutta pituus ei ole skaalattavissa. Mittatulosten poikkeama aiheuttaa sen, että myös p.u.l-arvoissa on poikkeamaa ja ei ole varmaa tietoa mikä oikea arvo on. Mikäli eri pituisia kaapeleita halutaan simuloida, on jokainen pituus mitattava erikseen. Nykyisellä mittasovittimella olisi todella työlästä tehdä kaapelikirjastot. Tämä vaatisi erittäin paljon resursseja kaapelien mittamiseen. Tämän takia simulointia varten olevia kaapelikirjastoja ei ole vielä rakennettu. Mikäli on tarvittu jotain tiettyä kaapelin pituutta, on se mitattu erikseen.

Tulevan mittasovittimen symmetrian ansiosta tarvitsee mitata vain yksi kaapelipituus per poikkipinta-ala, jonka mittatulos on mahdollista skaalata eri pituuksille. Tämä vähentää mittauksen määrää huomattavasti, sillä mittauksiin riittää erityyppiset ja erikokoiset kaapelit. Yhdellä sovitinmallilla on tarkoitus mitata laaja skaala eri poikkipinnalla olevia kaapeleita.

4 Vektoripiirianalysaattori

Vektoripiirianalysaattori (VNA) mittaa piirin S-parametrit taajuuden funktiona. VNA:n yleisin käyttötarkoitus on mitata passiivisia komponentteja kuten kaapeleita, suodattimia, muuntajia ja antenneja. VNA:lla voi myös mitata dielektrisiä aineita, koska sillä mitataan heijastumista. Elektromagneettisten kuvien ottaminen on kasvava osa VNA:n toimintaa. Tätä käytetään muun muassa lääketieteessä ja turvallisuus alalla kehon kuvaamista varten. [5.]

4.1 Piirianalysaattorin historia

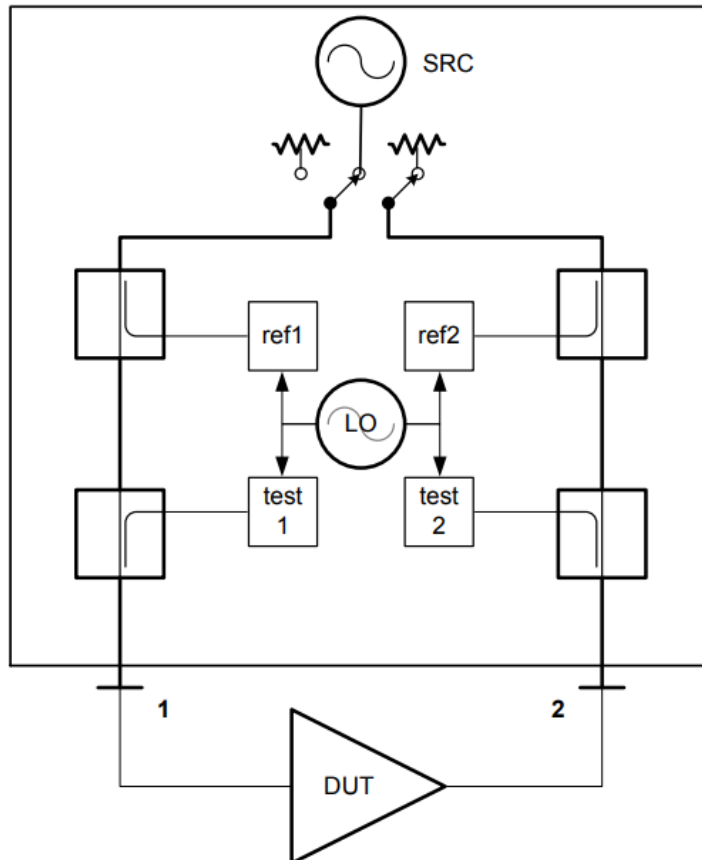
Yritys Rohde & Schwarz kehitti ensimmäisinä 1950-luvulla laitteen piirianalyysiä varten. Tuote nimettiin Zg diagraphiksi. Tällä laitteella pystyi mittaamaan 30 MHz–300 MHz:n taajuusalueen ja sillä pystyi piirtämään S-parametrin suoraan Smithin karttaan. Zg:tä käytettiin radio- ja TV antennien mittaukseen. 1950- ja 1960-luvun vaiheessa kolme muuta yritystä esitteli Homodyn periaatteeseen perustuvaa piirianalysaattoria. [5.]

Hewlett Packard (HP) julkaisi vuonna 1966 vektorivolttimetrim 8405A, joka käytti SR-dioditekniikka. SR-diodien avulla oli mahdollista mitata kahden signaalin amplitudin ja vaiheen eroa 1 GHz:iin asti. SR-dioditekniikalla tehtiin korkea taajuisista signaaleista matalampi taajuisia signaaleja. Yhdistämällä 8405A liitäntäkytkimiin pystyi sillä mittaamaan amplitudin ja vaihe-eron johtuneesta- tai heijastuneesta signaalista. Vuonna 1967 HP julkaisi 8410A:n, jolla pystyi piirtämään Smithin kartan suoraan mittalaitteen näytölle. Vuotta myöhemmin yritys julkaisi ensimmäisen automaattisen piirianalysaattorin. [5.]

Laajakaistaisten kiinteiden mikroaalto lähteiden, parempien näytteenottimien ja nopeampien mikroprosessorien avulla kehitettiin HP 8510, 8753 ja 8720. HP 8753A oli ensimmäinen täysin virhekorjauksen tekevä piirianalysaattori. Sen edullisen hinnan ja korkean suorituskyvyn ansiosta, siitä tuli standardi mittalaite radiotaajuusmittauksiin (RF). 1990-luvulla suosio langattomiin laitteisiin kasvoi. Tämän takia ennen pelkästään tuotekehityksen ja tutkimiseen suunniteltu laite tuli käyttöön myös radiotaajuusmikropiirien valmistuslaitteeksi. [6.]

4.2 Toimintaperiaate

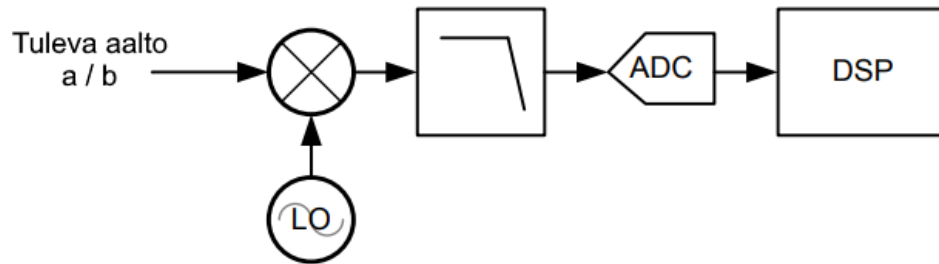
VNA perustuu kolmeen päätoimintoon: signaalin tuottamiseen, sen vastaanottamiseen ja mittatulosten käsittelyyn. Sillä on tarkoitus mitata lähtevä, johtunut ja heijastunut signaali. Kuvassa 5 näkyy yksinkertaistettu lohkokaavio VNA:sta. [5.]



Kuva 5. VNA Lohkokaavio [5].

Kuvasta 5 näkee, miten mittaus toimii VNA:lla. Vain yhteen porttiin syötetään signaalia kerrallaan. Kuvan tapauksessa syötetään signaali portista yksi porttiin kaksi. Toinen portti terminoidaan $50\ \Omega$:n kuorma impedanssiin yleensä. Syötettävä signaali kulkee referenssi 1-signaalierottimelle. Referenssi 1-signaalia käytetään mittatulosten käsittelyssä referenssinä, sitä vasten verrataan testi 1 ja 2 antamia tuloksia. Signaali jatkaa portti 1:n kautta testilaitteelle. Testattavana oleva laite aiheuttaa heijastuman, joka palaa takaisin signaalinerottimelle testi 1. Tämän avulla määritetään testilaitteen sisääntulon heijastuskerroin (S_{11}). Testilaitteen läpimenevä signaali kulkee testi 2 signaalierottimelle,

josta se kulkee kuormaan. Testin 2 saamalla signaalilla määritetään eteenpäin oleva vahvistus (S_{21}). Kytkeä muuttamalla päin vastaiseksi, eli vaihtamalla lähde porttiin kaksi ja kuorma porttiin yksi. Mittaus toimii samalla tavalla kuin aikaisemminkin, mutta vain käänteisessä järjestyksessä ja referenssi 2 on uusi referenssi. Tällöin saadaan määritettyä testilaitteen lähdön heijastuskerroin (S_{22}) ja taaksepäin oleva vahvistus (S_{12}).



Kuva 6. Signaalin käsittely [4].

Kuvassa 6 näkyy, miten jokainen signaali käsitellään digitaaliseen muotoon. Signaalin-erottimelta tulevan RF-signaalin taajuutta pudotetaan mikserillä tai ottamalla näytteitä matalammalla taajuudella signaalista. Ennen käytettiin näytteenottamistekniikkaa, koska se oli yksinkertaisempi ja edullisempi tapa. Nykyään käytetään mikseriä ja laajakaistaista paikallisoskillaattoria (LO). Mikseriin tulee kaksi eri taajuutta RF ja LO signaalit. Mikseri tekee erotuksen RF- ja LO-signaalien taajuuksista, mistä tulee uusi välitaajuussignaali (IF). [5.]

IF-signaali kulkee valesignaalisuodattimen läpi analogisesta digitaaliselle muuntimelle (ADC). ADC on nykyään vähintään 14 bitin resoluutiolla, eli signaali voi saada vähintään 16384 eri arvoa. ADC:n jälkeen signaali prosessoidaan digitaalisella signaalinkäsittelyllä (DSP). DSP laskee signaalin reaali- ja imaginäärisen osan. [5; 7.]

Heterodyne-menetelmää käytettäessä mittaukseen tulee vaiheensiirtoa. Käytettäessä samaa LO-signaalia kaikissa mittauksissa vaiheen siirrosta tulleet virheet kumoavat toisensa laskettaessa S-parametrejä. Lopuksi DSP:llä tehdään virheenkorjaukset, jotka on saatu mittalaitteen kalibroimisesta. [7.]

4.3 Kalibrointi

Kalibroinnilla on tarkoitus poistaa systemaattista virhettä, joka voi johtua esimerkiksi mitalaitteen ja testattavan välisestä kaapelista ja/tai sovittimesta. Mikäli kalibrointi on tehty oikein ja oikeilla välineillä, voi VNA:n antamia tuloksia pitää hyvin tarkkoina. VNA:n kalibrointi tapoja on monia, mutta yleisin on oikosulku, avoin, kuorma ja siirtolinja (SOLT).

SOLT:n kalibroinnissa on viisi osaa. Oikosulku (S, eli short) referenssitason, joka voidaan tehdä hyppyyttämällä signaali esimerkiksi $0\ \Omega$:n vastuksella referenssiin. Avoin (O, eli open) signaaliin ei kytketä mitään ylimääräistä. Kuormassa (L, eli load) kytketään signaali referenssiin tietyn suuruusella impedanssilla, yleensä 50 tai $75\ \Omega$:n vastuksella. Kuorman tunnuksena saatetaan myös käyttää kirjainta M, joka tulee englanninkielisestä sanasta match. Nämä kolme edeltävää tehdään jokaiselle portille erikseen. Siirtojohdon (T, eli through) tarkoitus on mitata kahden portin välistä, joiden signaalit on yhdistetty. Näiden neljän edeltävän lisäksi on kahden portin välinen eristys, jolle ei ole annettu kirjainta.

4.4 Mittaaminen

VNA-mittaukset ovat joko yksi- tai moniporttimittauksia. Yksiporttimittauksella voi mitata vain heijastumista, joka aiheutuu testattavasta laitteesta. Moniporttimittauksessa on portteja kaksi tai enemmän. Kaksiporttisella VNA:lla voi mitata N-porttista järjestelmää, jossa N on jokin kokonaisluku yli yhden. Useamman portin VNA nopeuttaa ja helpottaa manuaalista työtä, mutta mittalaitteen hinta nousee huomattavasti.

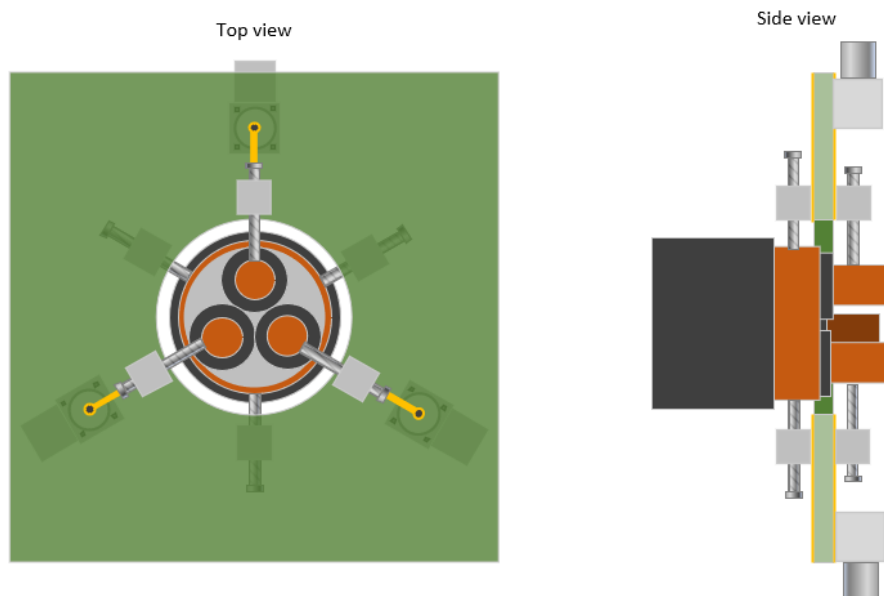
Moniporttimittaus perustuu VNA:ssa siihen, että yhteen porttiin kerrallaan syötetään signaalia ja muut ovat terminoituja. Moniporttinen VNA automaattisesti vaihtaa signaaliporttia ja terminoi muut portit. Moniporttisen VNA:n hyvät puolet ovat ne, että pystyy suoraan ottamaan oikeanlaisen tiedoston mittatuloksista, mittajärjestelyyn ei tarvitse koskea kesken testin ja inhimillisen virheen mahdollisuus pienenee. Kaksiporttista mittalaitetta käytettäessä mittaajan täytyy manuaalisesti vaihtaa porttia ja terminointia. Tämän takia mittaajan tekemän virheen mahdollisuus kasvaa huomattavasti.

Kaksiporttisella VNA:lla mitattaessa yli kaksiporttista järjestelmää tärkeimmät asiat ovat hyvät merkinnät ja järjestelmällisyys. Testilaitteen portit ja mittalaitteen johtimet on hyvä numeroida tarkkaan. Tämä selkeyttää mittaus prosessia ja datan nimeämistä huomattavasti. Toinen tärkeä osa on järjestelmällisyys. Tämä on todella tärkeä mittauksen kannalta, jotta varmasti kaikki porttiyhdistelmät tulee mitattua.

5 Suunnittelu

5.1 Konsepti

Ennen työn aloittamista ohjaajani Ville Forsström oli luonut kuvan 7 konseptin, josta näkyy hyvin, millä tavalla on tarkoitus kytkeä kaapeli sovittimeen. Konseptin idea on kytkeä kaapeli mittalaitteeseen ilman, että kaapelin symmetria kärsisi. Tällä on tarkoitus päästä eroon vanhan sovittimen aiheuttamasta epäsymmetriasta mittauksissa.

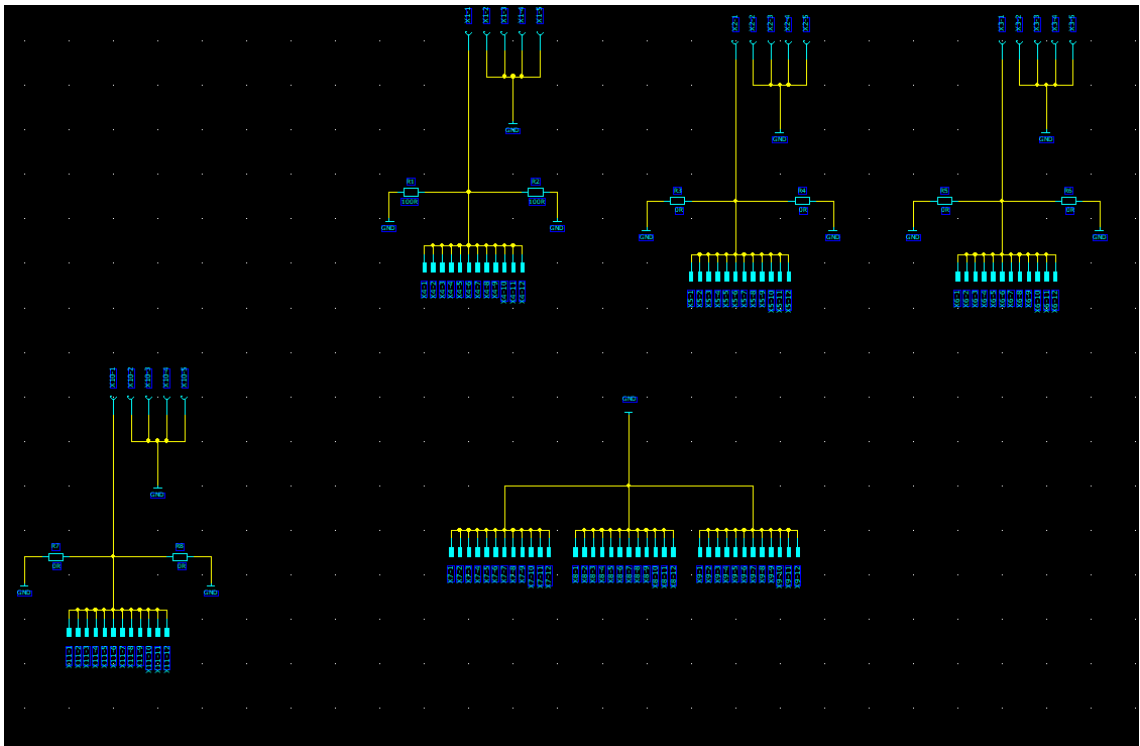


Kuva 7. Ville Forsströmin mittasovitinkonsepti.

Olemassa olevalla samankaltaisella kiinteällä sovittimella on saatu hyviä mittatuloksia. Ongelma tässä symmetrisessä sovittimessa on sen vaikea käytettävyys, sillä kaapelin johtimet ja suojavaippa on juotettava sovittimeen. Isojen kaapelien juottaminen on todella vaikeaa, kuparin lämmön johtavuuden suurien kaapelien lämpömassan takia. Näiden takia kaapeliin tulee kiinnittyä jollain muulla tavalla, kuin juottamalla. Lisäksi kiinteä sovitin tukee vain yhtä kaapelikokoa.

5.2 Kytcentäkaavio

Kytcentäkaavion suunnittelu alkoi siitä minkälaisia kaapeleita haluamme mitata. Päädyttiin kolmejohtimisiin kaapeleihin, sillä se on yleisin kaapelityyppi mitä käytetään. Kuvan 8 kytcentäkaavio tähän työhön oli hyvin yksinkertainen. Vaikka käytettävässä kaapelissa on vain kolme johdinta, on kytcentäkaaviossa neljä signaalia. Neljäs signaali on varmuuden vuoksi, jotta on mahdollisuus mitata esimerkiksi johtavan lattian ja kaapelin väliset S-parametrit.



Kuva 8. Kytcentäkaavio.

Samaa kytcentäkaaviota ja piirilevyä on tarkoitus käyttää VNA:n kalibroimiseen ja mittaamiseen. VNA:n kalibrointi vaatii oikosulun ja referenssi-impedanssin, jotka tehdään erillisillä vastuksilla. Kalibrointikortissa riittäisi pelkästään $0\ \Omega$:n ja $50\ \Omega$:n vastus kahteen eri signaaliin. Vastuksia laitetaan kaksi rinnan, jotta kytkennän induktanssi puolittuu. Kaikkiin signaaleihin laitettiin optio näille vastuksille, jotta kortti pysyisi mahdollisimman symmetrisenä.

5.3 Piirilevy

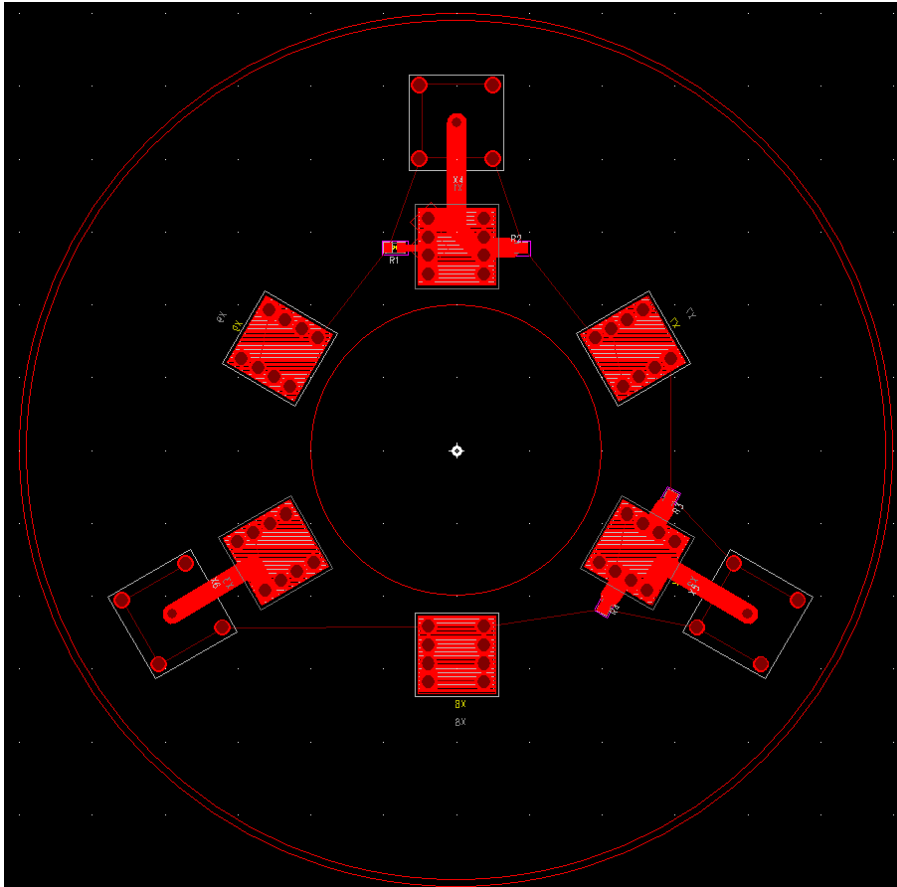
Piirilevyn suunnittelussa tuli ottaa huomioon se, että signaalien kuparivedot tulee olla sovitettu 50 Ω:n impedanssiin. Sovittaminen tehdään kuparivedon leveyttä muuttamalla. Impedanssiin vaikuttavat tekijät ovat kuparivedon leveys ja paksuus, eristyksen paksuus ja sen suhteellinen permittiivisyys. Piirilevyn paksuudeksi valittiin 1,6 mm, jolloin kuparin paksuus on noin 35 µm ja eristeen paksuus on 1,55 mm. Eristysmateriaalina käytetään FR-4:sta, jonka suhteellinen permittiivisyys on noin 4,4. Vedon leveyden voi laskea kaavalla 10, jossa w on leveys, h on eristeen paksuus, z_0 on tavoiteimpedanssi, ϵ_r on suhteellinen permittiivisyys ja t on kuparin paksuus. Tällä kaavalla kuparivedon leveydeksi tulee noin 2,86 mm.

$$W = \frac{7.48 \times h}{e^{z_0 \frac{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}}{87}}} - 1.25 \times t \quad (10)$$

Kalibroitivastuksiksi kuormaa ja oikosulkua varten valittiin kaksi 0805 koteloinnilla olevaa vastusta. Korttien kasaaminen tehdään käsin, jolloin isommalla koteloinnilla olevat vastukset ovat helpompi juottaa paikalleen.

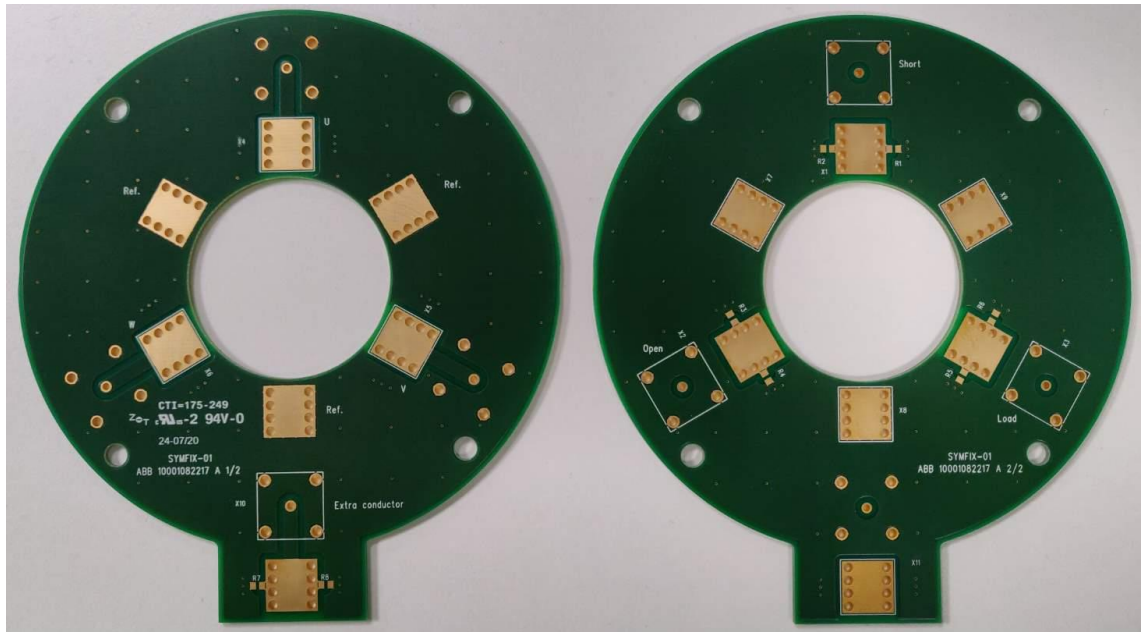
Piirilevyn suunnittelussa tärkeä osa on symmetria. Symmetrian varmistamiseksi kaikkien pääkomponenttien sijainnit toisiinsa nähden on laskettu sinin ja kosinin avulla. Piirilevyn piirto alkoi siitä, että tehtiin päätös maksikaapelin koosta. Kaapelikooksi päätettiin 70 mm², sillä ne ovat suurimmat kaapelit, joita käytetään EMC testeissä ja joista on useampi eri pituus samasta halkaisijasta. 70 mm²:n kaapelin ulkohalkaisija on noin 36 mm. Kortin sisäreiän halkaisijasta tehtiin 40 mm, jotta kaapelin asennuksessa on hieman toleranssia. Komponentit sijoitettiin reiän ympärille symmetrisesti 60 asteen välein. Signaalien välillä on 120 astetta. Jokaisen signaalin välissä on yksi kiinnitys kaapelin suojavaippaa varten, joka toimii referenssitasona.

Ensimmäisessä versiossa kortti oli neliön muotoinen, mutta tämä ei vaikuttanut järkevältä komponenttien sijoittelun kannalta. Toisesta versiosta tehtiin kuusikulmainen, tällä tavoin saatiin piirikortista symmetrinen komponentteihin nähden. Luovuttiin kuusikulmaisesta kortista sillä terävistä kulmista ei ole mitään hyötyä kortissa. Päädyttiin lopulta ympyrän malliseen korttiin, kuva 9.



Kuva 9. Pyöreä piirikortti.

Korttia katselmoidessa päätettiin, että sovittimessa on hyvä olla yksi ylimääräinen liitäntä. Tämä liitäntä mahdollistaa kaapelin ja jonkun muun vuorovaikutuksen mittaamisen kuten esimerkiksi johtavan lattian ja kaapelin väliset parametrit. Ylimääräinen signaali ei pitäisi rikkoa sovittimen symmetriaa, eikä sitä ole pakko juottaa paikalleen, mutta optio on hyvä olla varalla. Piirilevyllä lisättiin uusi liitäntä ja tähänkin signaaliin laitettiin paikat kalibrointivastuksille, jotta sovittimen yhdenmukaisuus säilyisi. Lopuksi yhdistettiin eri kerroksilla olevat referenssitason ja lisättiin silkkipainokuvat. Kortin nimeksi päätettiin SYMFIK-01.



Kuva 10. Piirikortin päältä (vas.) ja pohjasta (oik.).

Kuvassa 10 näkyy piirikortin lopullinen versio. Kaikki signaalit kulkevat kortin ensimmäisessä kerroksessa. Piirikortin yläpuolelle tulee johtimien signaalien ruuviliitokset, lisäsignaalin BNC-liitin ja kalibrointivastukset. Kaikki käyttämätön tila on täytetty referenssitason kuparilla. Korttiin lisättiin neljä reikää M4-pulttia varten. Näitä reikiä voi käyttää muun muassa lisätukea tai kaapelinohjainta varten.

Sovittimien kasaan juottaminen sujui ilman ongelmia. Tehdyt komponenttilaskeutumiskuviot ja itse komponentit sopivat hyvin yhteen. Kasattuja kortteja tuli yhteensä neljä, kaksi mittaamista ja kaksi kalibroimista varten. Yhteen kalibrointikorttiin juotettiin referenssivastukset, oikosulkupalat ja yksi signaalin jätettiin avoimeksi. Toiseen kalibrointikorttiin juotettiin kaikki maadoituksen pultit ja kaksi signaalia yhteen.

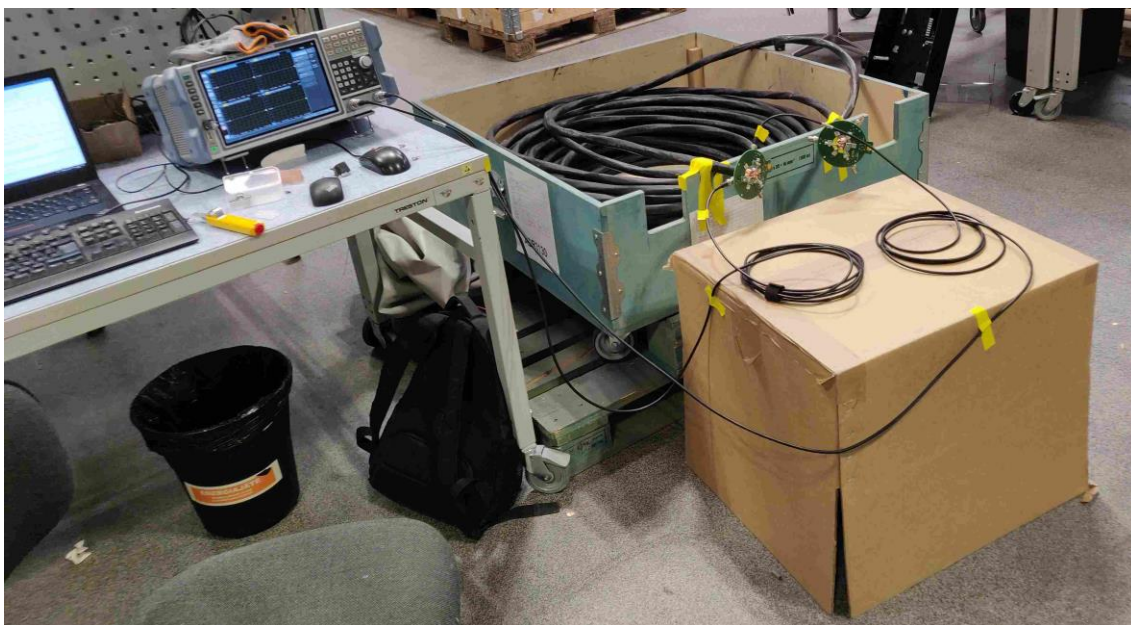
6 Verifiointi

6.1 Mittaukset

Mittaukset tapahtuivat ABB:n tiloissa Rohde & Schwarzin ZNL6-vektoriipiirianalysaattorilla. ZNL6 on kaksiporttinen VNA, jonka taajuusalue on 5 kHz–6 GHz. Mittaukset tehdään 5 kHz–32 MHz välillä, joten mittalaitteen kaista on riittävä. Mittanäytteitä otetaan 8 kHz:n välein, joka tarkoittaa 4000 mittapistettä. Mitattaviksi kaapeleiksi valittiin 70 mm², 35 mm² ja 2,5 mm², jokaisesta kaapelikoosta oli kaksi eri pituutta. 70 mm² kaapeli mitataan, koska mittasovitin on suunniteltu tälle kaapelikoolle. 35 mm² on suurin koko vanhalla mittasovittimella. 2,5 mm² on valittu, koska tarkoituksena on selvittää, mikä on pienin kaapelikoko mitä voi mitata kyseisellä sovitimella. Kaikki mitattavat kaapelit ovat Drakan valmistamaa MCCMK EMC-kaapelia.

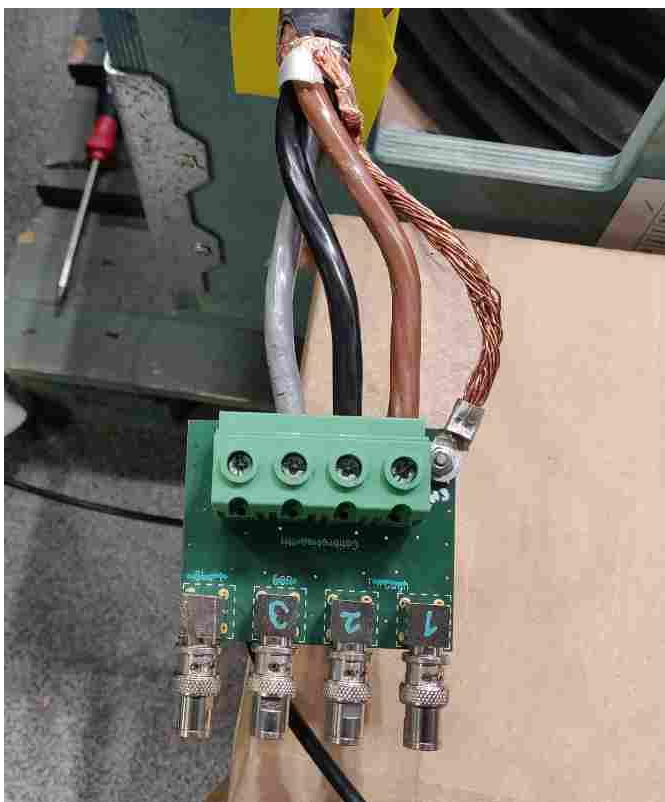
Kaapeleita valittiin rajattu määrä, sillä aikaa oli varattava mahdollisten ongelmatilanteiden varalta. VNA:lla mittaaminen oli myös uusi asia minulle, joten jouduin opettelemaan sen mittausten ohella. Mittausten tarkoitus on todistaa konsepti toimivaksi ja selvittää mille kaapelien halkaisijoille sovitin käy. Tästä mittakerrasta on tarkoitus saada referenssi tulevaisuuden mittauksille, jos esimerkiksi sovitin ei käy pienille kaapeleille tai siinä on jokin muu ongelma. Tällä tiedolla osataan varautua ja suunnitella uudelleen tai parannella mittasovitinta seuraavaa kertaa varten.

Kaikissa kaapeleissa on kolme johdinta ja suojavaippa toimii maadoituksena ja referenssinä mittauksessa, jolloin mittaus on kuusiporttinen. Eri porttiyhdistelmiä tässä mittauksessa on kolmekymmentä, mutta mitata tarvitsee vain viisitoista. Kaikkia kolmekymmentä eri mittausta ei tarvitse tehdä, sillä mittalaite mittaa automaattisesti molempiin suuntiin, jolloin yhdellä mittauksella saa 1–2 ja 2–1. Portit numeroitiin kuvan 2 s. 6 tapaisesti, toisessa päässä kaapelia on portit 1–3 ja toisessa 4–6. VNA:ssa on kaksi porttia ja siitä saa .s2p-tiedostoja, jotka sisältävät neljä S-parametriä taajuuden funktiona. Tulokset otetaan paljaina numeroina reaali- ja imaginäärimuodossa.



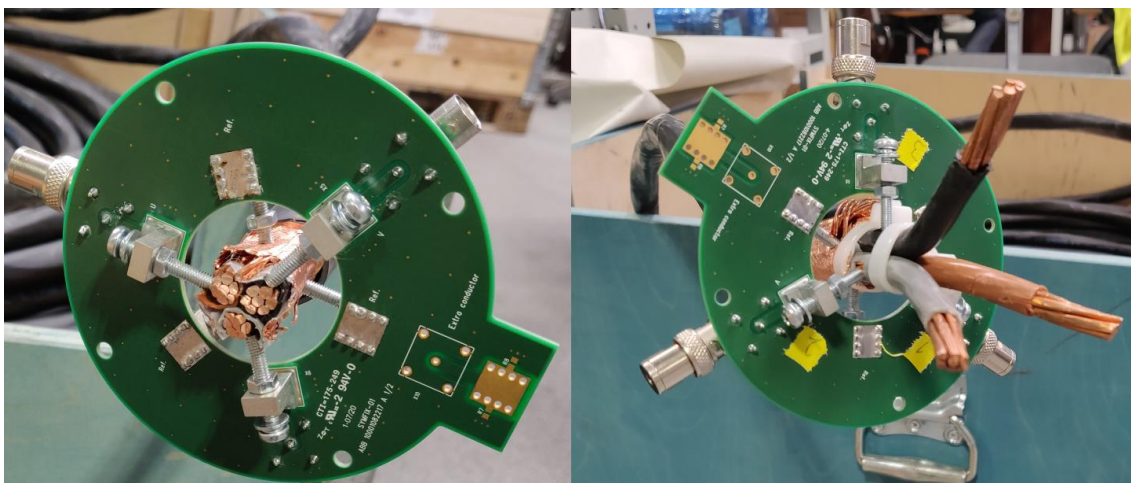
Kuva 11. Mittajärjestely.

Kuvassa 11 näkyy, minkälainen mittajärjestely oli. Suurin osa mitatuista kaapeleista on omassa laatikossaan, joka on helppo tuoda paikalle. Kaapelit teipattiin paikoilleen mittauksien ajaksi, jotta järjestely pysyisi muuttumattomana koko testin ajan. Järjestely pysyi samanlaisena kaikissa mittauksissa.



Kuva 12. Vanhan mittasovittimen kytkentä.

Mittaukset aloitettiin satametrisestä 35 mm²:n kaapelista. Kaapeli mitattiin ensin vanhalla mittasovittimella (kuva 12). Kuvasta näkee hyvin sen, että kaapelin oma symmetria kärsii sovittimeen kiinnityksestä. Kaapeliin sisäjohtimet täytyy taivuttaa vierekkäin ja maadoitus ei ole niiden ympärillä sovittimen liitoskohtaan saakka. Vanhalla sovittimella pystyy saamaan paremmat mittatulokset, jos johtimet pidettäisiin lyhyinä. Kuvassa 13 näkyy eri tavat, miten uusi mittasovitin kiinnittyy kaapeliin ja sen johtimiin. Kaapelin johtimia ei tarvitse levittää ennen sovitinliitääntä ja maadoitus pystytään pitämään yhtenäisenä lähellä signaaliliitoksia.



Kuva 13. Uuden sovittimen kiinnitys leikattu (vas.) ja leikkaamaton (oik.).

Ruuvikärkien geometrian ja johdinhäntien vaikutus mittatulokseen testattiin kolmekymmentämetrisellä 35 mm²:n kaapelilla. Kaapelille tehtiin kolme eri mittausta. Ensimmäisessä mittauksessa kaapelia ei leikattu vaan jätettiin kuvan 13 oikealla olevat johdinhännät. Toisessa mittauksessa leikattiin hännät pois ja verrattiin mittaustuloksia. Mittaustuloksissa ei ollut huomattavaa eroa. Mittaamalla nämä kaksi eri tilannetta pystyttiin todentamaan se, että hännät eivät vaikuta mittatuloksiin kriittisesti. Tulevaisuudessa ei siis tarvitse leikata kaapelin päitä pois mittausta varten. Kolmannessa mittaustilanteessa testattiin, onko ruuvien teroittamisella ja paremmalla kontaktilla mitään merkitystä mittatuloksiin. Tätä mittatulosta verrattiin kahteen aikaisempaan tulokseen, tuloksissa ei ollut huomattavaa eroa. Tästä tiedosta on hyötyä tulevissa kapeita kaapeleita mitattaessa.

2,5 mm²:n ja 70 mm²:n kaapeleista mitattiin 100 m:n ja 30 m:n pituudet. 70 mm²:n kaapeleista ei leikattu johtimia. Johtimien eristeisiin porattiin pieni reikä, joka peitettiin myöhemmin jänniteteipillä ja lämpökutistuvalla eristeellä. Tällä tavalla testaukseen käytettäviä kaapeleita ei tarvitse lyhentää ollenkaan. 2,5 mm²:n kaapelin kiinnitys sovittimeen on huomattavasti vaikeampaa, kuin paksun kaapelin. Johtimet ovat todella kapeita ja niihin on kytkeydyttävä pitkillä pulteilla. Ohuissa kaapeleissa korostuu sen keskittämisen tarkeys verrattuna paksuihin. Kaapelin tulee olla täysin keskellä sovitinta, jotta se saadaan kytkettyä hyvin paikalleen.

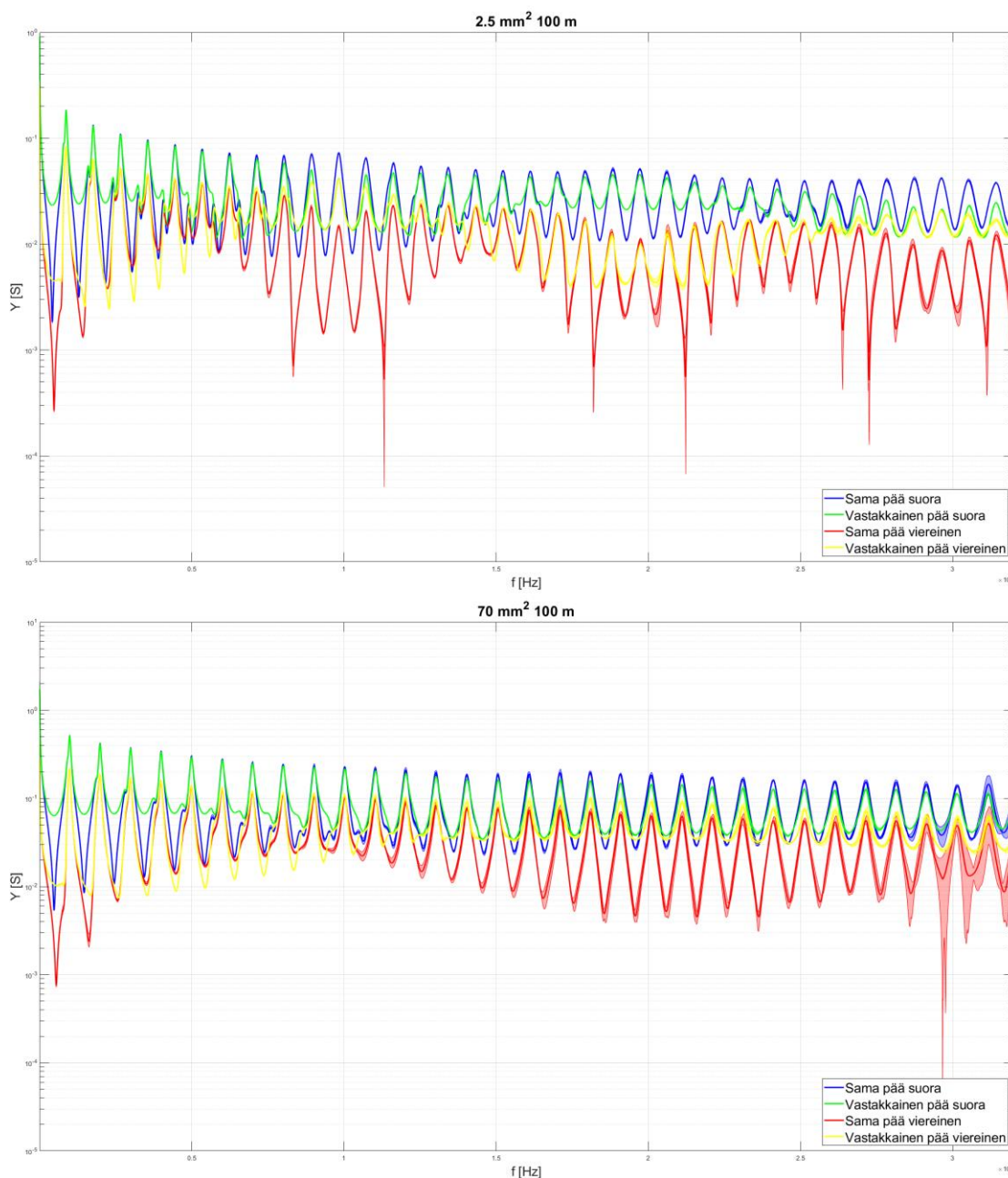
Valittujen kaapelikokojen jälkeen oli vielä mitta-aikaa jäljellä, joten mittaukseen otettiin näiden kaapelin välikokoja. Aikaisempien mittatulosten perusteella päädyttiin mittaamaan vain 100 m:n kaapelit. Mittauksiin valittiin 6, 16 ja 25 mm²:n kaapelit. Näiden uusien kaapeli pituuksien mittaaminen ei ollut välttämättömiä työni kannalta, mutta niistä on hyötyä tulevaisuuden simulointikirjastoja varten.

6.2 Mittatulosten käsittely

Mittatuloksien käsittely tapahtuu valmiiksi tehdyillä Matlab-kirjastoilla, joita muokattiin työtä varten. Tulosten käsittelyssä yhdistetään mitatut kaksiporittiset S-parametrit 6 x 6 S-matriisiksi taajuuden funktiona. Nämä arvot muutetaan Y-parametreiksi ja ne visualisoidaan kuvaajilla.

Kuvaajien piirtämiseen kirjoitin yksinkertaisen Matlab-koodin. Koodilla järjestetään parametrit neljään eri ryhmään, jotka perustuvat kaapelin omaan symmetriaan. Näistä parametriryhmistä etsitään minimi, maksimi ja lasketaan keskiarvo jokaiselle taajuudelle. Minimistä ja maksimista tehdään ylä- ja alaraja poikkeamalle mittauksessa ja keskiarvoa verrataan poikkeamaan.

Mittatuloksissa on neljä eri ryhmää. Itseensä heijastuvassa ja suoraan johtuvassa molemmissa on kuusi eri parametria. Viereiseen johtimeen samassa päässä ja eri päässä kaapelia olevissa ryhmissä on molemmissa 12 eri parametria. Hyvässä mittatuloksessa kaikki yhden ryhmän sisällä olevat parametrit ovat yhtä suuret, jolloin poikkeaman maksimi, minimi ja keskiarvon muodostavat vain yhden viivan kuvaajaan.

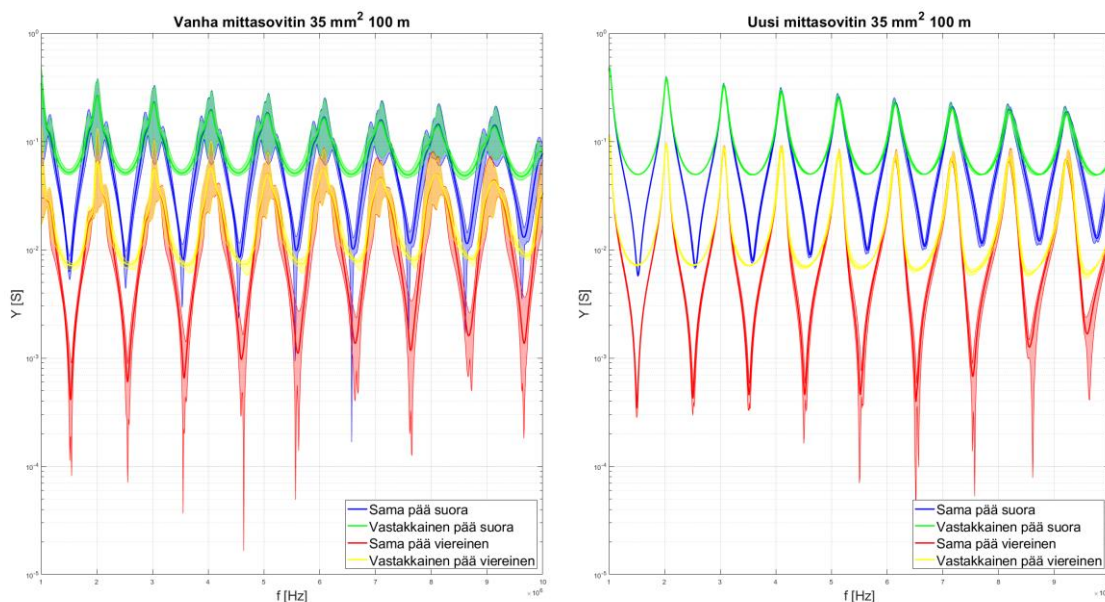


Kuva 14. 2,5 mm²:n ja 70 mm²:n 100 m:ten kaapelien Y-parametrit uudella mittasovittimella.

Mittauksissa selvitettiin mikä on pienin mahdollinen kaapeli koko, mihin sovitinta voi käyttää. 2.5 mm²:n kaapelista sai todella hyvät mittatulokset kuva 14. Maksimi, minimi ja keskiarvo menevät lähestulkoon päällekkäin. 70 mm²:n kaapelin mittaustulos on myös todella hyvä. Mittatuloksissa on pieniä heittoja, kun signaali mitataan samasta päästä viereisestä johtimesta. Korkeilla taajuuksilla tapahtuva poikkeama ei ole, niin kriittinen verrattuna matalampiin taajuuksiin.

6.3 Vanhan ja uuden mittasovittimen vertailu

Vertailuksi vanhan ja uuden mittasovittimen välille valittiin 35 mm²:n kaapelin, sillä se on suurin kaapeli, joka järkevästi mahtuu vanhaan sovittimeen.



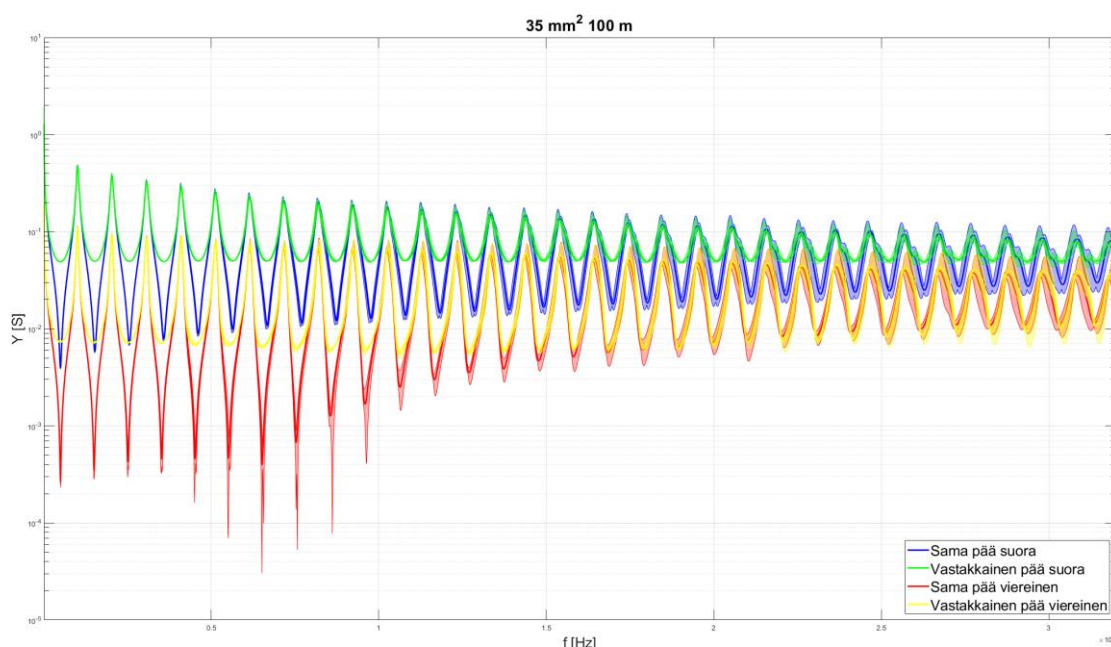
Kuva 15. Vanhan ja uuden mittasovittimien tulokset (100 m MCCMK 3 x 35 mm²).

Kuvassa 15 vasemmalla puolella on vanhalla mittasovittimella saadut kaapelin Y-parametrit. Oikealla puolella on uudella sovittimella saadut arvot. Molemmissa tapauksissa mitattava kaapeli on ollut 100 m:n MCCMK 3 x 35 mm² ja mittaus on tapahtunut samassa paikassa ilman, että kaapelia on liikutettu. Molemmissa mittauksissa VNA-kalibroitiin sovittimen omalla kalibrointikortilla.

Vanhalla ja uudella sovittimella saaduissa tuloksissa on huomattava ero ja tämä ero kasvaa mitä korkeammille taajuuksille mennään. Vanhassa sovittimessa maksimi ja minimi muodostavat suurehkon alueen. Resonanssien välissä on useita piikkejä, jotka tekevät tuloksista epäsymmetrisiä. Näiden piikkien takia kaapelin skaalaus ei ole mahdollista. Uudella sovittimella minimi, maksimi ja keskiarvo kulkevat lähes päällekkäin.

6.4 Tulosten oikeellisuus

Tämän työn mittatulosten laatua tutkitaan kaapelin symmetrian kannalta. Hyvässä ja oikeassa mittatuloksessa parametriyhmien sisällä ei ole heittoa. Mittatulosten symmetrian voi rikkoa monella eri tavalla: huonolla kontaktilla, unohtamalla terminoinnin, nimeämällä tulokset väärin, signaalin suorassa kontaktissa referenssiin tai kaapeli voi olla jo ennestään huonossa kunnossa. Kaapelien mittaaminen on toistoa, joten siitä tulee helposti rutiini. Rutiinien alussa on helppo tehdä ilmiselviä virheitä esimerkiksi: itse unohdin muuttaman kerran terminoida signaalin, mutta tämän huomaa helposti mittatuloksesta. Aina ennen uuden kaapelin vaihtamista pyrin piirtämään omat mittatulokset, tällä tavalla pysyin toteamaan mittauksen lopuksi, ettei mittausrvirhettä ole tapahtunut.



Kuva 16. Satametrisen 35 mm²:n kaapelin Y-parametrit.

Mittatulosten ottamiseen pystyy itse vaikuttamaan, mutta kaapelin kuntoon ei pysty muuta kuin ostamalla uuden. Yksi mitatuista kaapeleista on todennäköisesti viallinen, sillä korkeilla taajuuksilla tuloksien poikkeama kasvoi muihin verrattuna enemmän. Kuvassa 16 on vertailuun käytetyn kaapelin Y-parametrit. Tällä kaapelilla tuli huonoimmat mittatulokset. Tämä kyseinen kaapeli on ollut käytössä jo pitkään EMC-testeissä. Kaapelia kytkettäessä moottorin ja taajuusmuuttajan välille, sitä joudutaan taivuttamaan.

Kaapelin taivuttaminen voi vaurioittaa sen suojavaippaa, jolloin referenssitaso ei ole enää yhtenäinen ja mittatulokset voivat olla väärin. Kaapeli voi myös olla valmistustoleranssiltaan ja symmetrialtaan huono.

Vanhan sovittimen mittauksia voi pitää jonkin näköisenä referenssinä. Verrattaessa kuvan 15 s. 25 mittatuloksia huomaa, että resonanssien määrä molemmissa mittauksissa on sama. Tämä sama pätee myös ennen työtäni otetun mittauksen kanssa, kuvissa 4 s. 8 ja kuvassa 16 on molemmissa suunnilleen sama määrä resonansseja.

7 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli selvittää ABB:lle, onko moottorikaapelin symmetrinen mittaaminen mahdollista erillisellä mittasovittimella. Työssä suunniteltiin ja verifioitiin symmetrinen mittasovitin ennalta tehdyn konseptin perusteella. Työtä helpotti hyvä aikataulu, jonka tein ennen sen aloittamista.

Työ sujui hyvin ja aikataulussa. Varasin riittävästi aikaa Pads-ohjelmiston opetteluun ja sovittimen suunnitteluun. Piirikortti saatiin tilattua noin neljä viikkoa työn aloittamisen jälkeen. Tilaus ajankohta oli todella kriittinen sillä, mittalaitteen varaus oli jo lukittu. Kortin toimituksessa meni noin kaksi viikkoa, johon oli osattu varautua. Piirikortit ja mittalaite saapuivat samana päivänä. Komponentit tulivat muutama päivä ennen piirikortin saapumista. Piirikorttien saapumisen jälkeen päästiin juottamaan sovitinta kasaan. Komponenttien juottamisessa ja sopivuudessa ei ollut mitään ongelmia, joten päästiin mittaamaan heti korttien kasauksen jälkeen.

Mittauksiin varattiin kaksi viikkoa. Tämä aika riitti reilusti mittaamiseen, sillä aikaa jäi vielä ylimääräisten kaapelikokojen mittaamiseen. Mittatulokset uudella sovittimella ovat todella hyviä verrattuna aikaisempaan sovittimeen. Uuden sovittimen käyttö isoille kaapeleille on huomattavasti miellyttävämpää, mutta pienet kaapelit ovat oma haasteensa. Pieniä kaapeleita varten sovittimeen voisi suunnitella ohjainpalan, joka siirtää kaikki johdot yhtä kauas toisistaan. Tämän voisi kiinnittää sovittimen neljään ruuvireikään. Sovitin toimi odotettua paremmin, koska sillä pystyy mittaamaan laajan skaalan eri poikkipinnalla olevia kaapeleita. Positiivinen asia sovittimessa oli se, että kaapelia ei tarvitse leikata sen mittausta varten. Kaapelia pitää vain kuoria vähän lisää, jotta saadaan

suojavaippa esille referenssitason varten. Tämän lisäksi johtimien eristeisiin on porattava pieni reikä, jonka voi peittää jänniteteipillä ja lämpökutistuvalla eristeellä. Uudella sovittimella mittaukset sujuivat todella hyvin, eikä ole tarvetta tehdä mitään ylimääräistä viritystä, kuten mekaanista tukea.

Mittaustulokset olivat hyviä eri kaapelipoikkipinta-aloille. Ohjaajani kokeili skaalata 35 mm²:n 100 metrin kaapelin 30 metriin. Mittatulos oli huonoin kaapelin kunnan takia, mutta skaalattu tulos oli silti mitatun veroinen. Tieto mahdollistaa sen, että kaapeleista ei tarvitse mitata kuin yksi koko. Lopuista kaapeleista mittasin vain 100 m:n pituudet. Mittauksien osalta kolmejohtimisen MCCMK-kaapelikirjasto on lähes valmis. 50 mm²:n mittaus puuttuu, sillä sitä ei ollut saatavilla mittausten aikana.

Tulevaisuudessa tätä mittasovitinkonseptia tullaan laajentamaan suuremmille poikkipinoille ja kaapeleille, joissa on enemmän johtimia. Sovittimen työstäminen on jo aloitettu, jolla pystyy mitata 300 mm²:n alumiinikaapelia. Tarkoituksena on myös mitata MCCMK-kaapelit, sekä eri valmistajien versiot näistä. Tullaan tekemään skaalattava kirjasto näistä mittatuloksista.

Opinnäytetyön aihetta miettiessäni halusin työn missä täytyy opetella teoriaa ja pääsee myös tekemään, jotain konkreettista. Aluksi ajattelin työtä yksinkertaiseksi, mutta ensimmäisten viikkojen aikana aloin ymmärtämään työn haastavuuden. Työtä tehdessä opettelin käyttämään Pads-ohjelmaa, jota en ollut ikinä ennen käyttänyt. Tämä on työkalu, jota monet suunnittelijat käyttävät, joten se on hyvä opetella. Työssä pääsin myös tutustumaan S-parametreihin, vektoripiirianalysointiin ja korkeataajuusmittauksiin.

Lähteet

- 1 Pupalais, Peter J. 2020. S-Parameters for Signal Integrity. Cambridge: Cambridge University Press.
- 2 Wing, Omar. 2008. Classical Circuit Theory. Berlin: Springer Science+Business Media.
- 3 Stevanović, Ivica; Wunsch, Bernhard; Madonna, Gian Luigi & Skibin, Stanislav. 2014. High-Frequency Behavioral Multiconductor Cable Modeling for EMI Simulations in Power Electronics. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS. VOL. 10, s. 1392—1399.
- 4 Wunsch, Bernhard; Stevanović, Ivica & Skibin, Stanislav. 2017. Length-Scalable Multiconductor Cable Modeling for EMI Simulations in Power Electronics. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS. VOL. 32, s. 1908—1916.
- 5 Introduction to Network Analyzer Measurements. Verkkoaineisto. National Instruments. http://download.ni.com/evaluation/rf/Introduction_to_Network_Analyzer_Measurements.pdf. Luettu 17.02.2020.
- 6 The Evolution of RF/Microwave Network Analyzers. 2014. Verkkoaineisto. Keysight Technologies. <https://about.keysight.com/en/newsroom/backgrounders/na/>. Laadittu 15.09.2014. Luettu 17.02.2020.
- 7 Fundamentals of Vector Network Analysis. Verkkoaineisto. Rohde & Schwarz. <http://www.rohde-schwarz-usa.com/rs/rohdegsschwarz/images/Vector-Network-Analyzer-Fundamentals-Primer.pdf>. Luettu 17.02.2020.