



TEKNIikka JA LIIKENNE

Sähkötekniikka

Elektroniikka ja automaatio

INSINÖÖRITYÖ

IMMUNITEETTIMITTAUSTEN VERTAILU

**Työn tekijä: Harry Schumacher
Työn ohjaaja ja valvoja: Esa Häkkinen**

Työ hyväksytty: ____ . ____ . 2010

**Esa Häkkinen
yliopettaja**

TIIVISTELMÄ

Työn tekijä: Harry Schumacher

Työn nimi: Immunitaettimittausten vertailu

Päivämäärä: 18.5.2010

Sivumäärä: 50 + 7 liitettä

Koulutusohjelma:

Suuntautumisvaihtoehto:

Sähkötekniikka

Elektroniikka ja automaatio

Työn ohjaaja ja valvoja: yliopettaja, tekn.lis. Esa Häkkinen, Metropolia Ammattikorkeakoulu

Tässä insinööriyössä tutkittiin testattavan laitteen häiriönsietokykyä säteilevien sähkö- ja magneettikenttien häiritsevien vaikutusten alaisena sekä toimintakykyä jännite- ja virtainjektiolla tehdyn häirinnän alaisena. Erityisen tärkeä tutkimuskohde oli säteilevän ja injektoidun testisignaalin häiriövaikutusten vertailu.

Tähän työhön liittyvä teoria ja testausstandardien IEC 61000-4-6/ENV 50141 ja EN50082-2 (IEC 801-6) keskeiset asiat on esitelty tiivistetysti. Käytännön osassa toteutettiin tarvittavat koekytkennät ja testaukset. Työssä käytettiin testausstandardien mukaisia testi- ja mittausrakenteita. Koska häiriövaikutustestaukset tehtiin noudattamalla työtä koskevia standardeja, saatiin testauksille toistettavuutta ja validiteettia.

Vertailu tehtiin taajuusalueella, jolla säteilevä kenttä aiheutti selvän häiriön. Tämä taajuusalue poikkesi injektiostandardien taajuusalueesta. Standardin mukaista virtainjektioestausta liitännäsohjotuksella ei voitu toteuttaa, koska siinä tarvittavien laitteiden käyttäytyminen standardin määräämän taajuusalueen ulkopuolella oli tuntematon.

Lopuksi pohdittiin, voitaisiinko tässä työssä säteilevän ja injektoidun häirinnän välillä vallitsevan korrelaation perusteella korvata säteilytestaus kokonaan injektioestauksella. Säteilytestaus edellytti häiriösuojattua huonetta. Injektoimalla suoritettavat testaukset voitiin sen sijaan tehdä merkittävästi kevyemmällä kalustolla. Tämän työn vertailulla saatiin siten aineistoa testausmenetelmien käytännöllisyyden ja kustannustehokkuuden väliseen vertailuun.

Sähkökentän häiriövaikutuksen kanssa samaan häiriintymisasteeseen vaaditaan mittausten perusteella yleisesti suurempi jännite- tai virtainjektion taso (häirintägeneraattorin sähkömotorinen voima) taajuuden noustessa. Häiriintymisvaikutus pienenee korkeammilla taajuuksilla, jollei injektio taso samalla nouse taajuuden mukana.

Työn tuloksista voidaan nähdä säteilevän häirinnän ja injektioitujen häirintätapojen häiritsevyysasteiden vastaavuudet, jotka ovat voimassa työn testattavan laitteen tapauksessa. Tulosten perusteella tutkitun laitteen säteilevän häiriön immunitaettitestaus voitiin korvata injektioestauksella, kun otettiin käyttöön standardista poikkeava taajuusalue.

Avainsanat: sähkökenttä, E-kenttä, magneettikenttä, H-kenttä, kytkentäelin, virtainjektio, jänniteinjektio

ABSTRACT

| | |
|---|--|
| Author: Harry Schumacher | |
| Name: Comparison of Immunity Measurements | |
| Date: 18 May 2010 | Pages: 50 + 7 appendices |
| Department: | Study programme: |
| Electrical Engineering | Electronics and Automation Engineering |
| Instructor and Supervisor: Esa Häkkinen, M.Sc., Tech.Lic., Principal Lecturer, Helsinki Metropolia University of Applied Sciences | |
| <p>This graduate study was made to examine the tolerance and redundancy of a device under the influences of interferences of electrical and magnetic fields. The graduate project also aimed at studying the operation of the device under both the injected current and voltage interference.</p> <p>A particularly important issue in this study was to compare the interference effects from radiated and injected test signals. The comparison was made within frequency range, in which the radiated field clearly caused interference. However, the current injection test to the auxilliary equipment wiring was not executable, since the behaviour of the required equipment was unknown outside this frequency range.</p> <p>The essential theory and requirements based on the related standards (IEC 61000-4-6/ENV 50141 and EN50082-2/IEC 801-6) have been presented.</p> <p>The test arrangements were made and the actual tests were carried out. The testing process gained validity and repetitiveness, since the interference redundancy tests were carried out specifically in accordance with related standards.</p> <p>Finally, it was considered, whether the radiated interference test could be replaced with the injection test, on the basis of the prominent correlation in this work. The radiated interference test required an RF-shielded test room. The injection tests, on the other hand, could be carried out with far more compact equipment. The comparison in this work resulted therefore in additional material usable in comparing the feasibility and cost efficiency of the test methods.</p> <p>According to the test results, to gain the same degree of disturbance with electrical and magnetic fields, mainly a higher electromotive force from the signal generator is needed as the frequency increases. In other words, the risk of disturbance decreases at higher frequencies, unless the injection level increases with the frequency at the same time.</p> <p>The results of this work will present equivalence with radiated and injected interference immunity tests, which is valid with the device under test in this work. According to the results, the radiated interference test can be substituted with injection tests, if deviation from the standard frequency range is allowed.</p> | |
| Keywords: electric field, magnetic field, electromagnetic compatibility, coupling/decoupling network, voltage injection, current injection | |

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYS

| | |
|--|-----------|
| 1 JOHDANTO | 1 |
| 2 HÄIRIINTYMISEN TEORIAA TYÖN KANNALTA | 2 |
| 2.1 Säteilevä häiriö | 2 |
| 2.2 Jänniteinjktiolla tehty häiriö | 4 |
| 2.3 Virtainjektioilla tehty häiriö | 6 |
| 2.4 Tätä insinööriötä koskevista standardeista | 9 |
| 3 HÄIRIINTYVYYSMITTAUKSET | 12 |
| 3.1 Koejärjestelyt | 12 |
| 3.2 Säteilevä häiriö | 12 |
| 3.3 Jänniteinjektio..... | 16 |
| 3.4 Virtainjektio | 17 |
| 4 HÄIRIINTYVYYSMITTAUSTEN TULOKSET | 17 |
| 4.1 Säteilevän häiriön tulokset | 17 |
| 4.2 Jänniteinjektio tulokset..... | 20 |
| 4.3 Virtainjektio tulokset | 28 |
| 4.4 Injektio tapojen yhdistetyt tulokset..... | 34 |
| 5 TÄSSÄ INSINÖÖRITYÖSSÄ KÄYTETYT LAITTEET | 35 |
| 6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTAA | 46 |
| LÄHTEET | 49 |
| LIITTEET..... | 50 |

1 JOHDANTO

Tämän insinööriyön aiheena on immunitaattimittausten vertailu. Sähkömagneettisilla kentillä (jäljempänä E- ja H-kentillä) on usein epäedullisia vaikutuksia sähkölaitteiden normaalille toiminnalle. Tämän testaamiseksi voidaan testattavaa laitetta säteilyttää radioaalloilla. Laitteen toimintaa voidaan häiritä myös jännite- ja virtainjektion avulla. Näin on tehtävä, jos ensiksi esitetty testataustapa ei ole mahdollinen. Tutkimuksen yksi tarkoitus on nähdä, voiko säteilyttämällä tehdyn testin korvata injektioitaustavalla.

Tässä työssä aiheutetaan tahallisesti E-kentän häiriötä testin alaiseen laitteeseen (usein myös nimellä DUT eli *Device Under Test*, joka on tässä työssä jännitelähde ja sen etupaneelin oma volttimittari). Jäljempänä aiheutetaan häiriötä injektiokeinoin vastaavasti. Tuloksista saadaan käsitys kyseisen laitteen immunitaattista näille häiriöille. *Tärkeimpänä saadaan kuitenkin käsitys siitä, miten E-kentän ja injektiokeinon häiritsevät vaikutukset korreloivat, toisin sanoen miten suuri kentänvoimakkuus vastaa häiritsevyydeltään mitäkin injektioitasoa.*

E-kenttien yhteydessä esiintyy myös H-kenttiä. EU:n direktiivit ja normit esittävät vaatimuksia laitteiden E-kenttien sietokyvylle, ja H-kentän voimakkuus on johdettavissa E-kentän voimakkuudesta direktiivien edellyttämässä kaukokentän olosuhteissa. E- ja H-kenttien häiriövaikutukset saadaan aikaan altistamalla testattava laite radiotaajuiselle (RF; *Radio Frequency*) häiriölähteelle häiriösuojatussa huoneessa.

Injektioita on kaksi: jännite- ja virtainjektio. Tässä työssä jänniteinjektiossa kytketään häiriö galvaanisesti (fyysisesti) johtimeen käyttämällä sopivaa kytkentäelintä (*Coupling/Decoupling Network*). Virtainjektiossa puolestaan johtimen ympärille asetetaan käämitys tai virtamuuntaja, jota käyttämällä häiriö siirtyy indusoitumalla johtimen eristeen läpi.

2 HÄIRIINTYMISEN TEORIAA TYÖN KANNALTA

E- ja H-kenttiin ja niiden etenemiseen ja vaikutuksiin liittyy normaali radiotekniikan teoria ja matematiikka, joista tarvittava osuus pian jäljempänä. Injektioilla aikaansaatu häiriötä tässä työssä edustava luku käsittelee hieman elektroniikan perusteita sekä vaihtosähköteoriaa. Tekstissä edempänä mainitut lyhenteet EUT ja DUT (*Equipment Under Test* ja *Device Under Test*) tarkoittavat yleisesti testattavaa kohdetta, sillä erolla, että sanatarkka käänös englannista viittaa ensin mainitulla lyhenteellä laitteistoon ja jäljemmällä yksittäiseen laitteeseen.

2.1 Säteilevä häiriö

Sähkökenttä ja magneettikenttä etenevät 90 asteen kulmassa toisiinsa nähden (kaukokentän olosuhteissa). Lisäksi sähkökentän tapauksessa aallon polarisaatiolla on merkitystä. On olemassa vaaka- ja pystypolarisaatioita sekä kiertopolarisaatio, jossa koko kenttä pyörii aallon edetessä. Edellä mainitut seikat liittyvät lähemmin antenniteoriaan, mikä jää osittain tämän tarkastelun ulkopuolelle.

Polarisaatiolla on kuitenkin tässä yhteydessä merkitystä: häiriötä lähettävän lähteen (kuten tässä antennin) asento vaikuttaa häiriintyvään laitteeseen. Mikäli häiriötä vastaanottava pinta on samansuuntainen kuin häiritsevän lähteen säteilypinta (täsmällisemmin: tasoaalto), on odotettavissa, että häiriintymisaste kohoaa merkittävästi verrattuna päinvastaiseen tilanteeseen.

Testattavan laitteen virtapiirien muodostamat sähköiset silmukat toisaalta toimivat silmukka-antennien tavoin. Silmukka-antennit toimivat rakenteensa vuoksi magneettikenttien vuon vastaanottimina. Mainittujen silmukoiden sähköinen pituus määrittelee aallonpituuden ja siitä johdetun taajuuden, jolla kyseinen silmukka vastaanottaa tehokkaimmin H-kentän vaikutuksia.

Yleisesti (edellä esitetyn lisäksi) virtapiiri ajautuu resonanssitilaan tietyllä taajuudella. Virtapiirissä on tietty induktanssi ja kapasitanssi, joiden perusteella voidaan resonanssitaajuus laskea seuraavan kaavan mukaan:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

Kaavassa (1) f_0 on resonanssitaajuus, L on induktanssi ja C kapasitanssi. Tällä taajuudella virtapiiri vastaanottaa tehokkaimmin häiriötä, toisin sanoen virittyy radiovastaanottimen tapaan niille. Induktanssia on kaikessa johtavassa materiaalissa, ja kapasitanssia syntyy hajakapasitanssin lisäksi viereisten johtavien materiaalien välille.

Usein ei-toivottua signaalia vastaanottaa siirtolinjaksi mallinnettavissa oleva virtapiiri. Sen minimi- ja maksimi-impedanssit (resonanssit) saattavat sattua ei-toivotulle taajuudelle. Minimimpedanssikohdassa piirissä kulkee suurin mahdollinen virta, jolloin mahdollinen häiriövaikutus on todennäköisin.

Teorian mukaan voidaan olettaa, että lähteen ja vastaanoton välisestä etäisyydestä noin $0,16 \cdot \lambda$ aallonpituus (λ) etäämmällä vallitsevat kaukokentän ominaisuudet (tarkemmin etäisyydestä $\lambda/2 \cdot \pi$ alkaen silloin, kun lähde on piste-mäinen). Se tarkoittaa sitä, että tällöin E- ja H-kenttien suhde (E/H) on noin 377Ω ja näihin kaukokentän olosuhteisiin perustuvat määräykset. E:n ja H:n suhdelukuna voidaan käyttää lukuarvoa $120 \cdot \pi / 1$.

EU:n direktiivi edellyttää CE-hyväksyttävän laitteen kestävän vähintään 1 V/m:n suuruista kentänvoimakkuutta. H-kentän suuruus on johdettavissa tästä, se on kaukokentän olosuhteissa nimittäin $1 \text{ V/m} / 377 \Omega$, sillä silloin on voimassa em. suhde $E/H = 377 \Omega$. Luonnollisesti H-kenttä muuttuu E-kentän muuttuessa, kaukokentän olosuhteissa em. suhdeluvulla.

Yksikkölaskulla selviää edellä sanotusta seuraavaa: H-kentän suuruus = $(\text{V/m})/(\text{V/A})$, kun korvataan Ω sen johdannaisella (tässä V/A). Supistamisen jälkeen jää laaduksi A/m, mikä onkin magneettikentän (H-kentän) voimakkuuden yksikkö SI-järjestelmässä /2/. Edellä esitettyjen seikkojen nojalla voidaan likimain etäisyydestä $0,16 \cdot \lambda$ alkaen todeta seuraavaa:

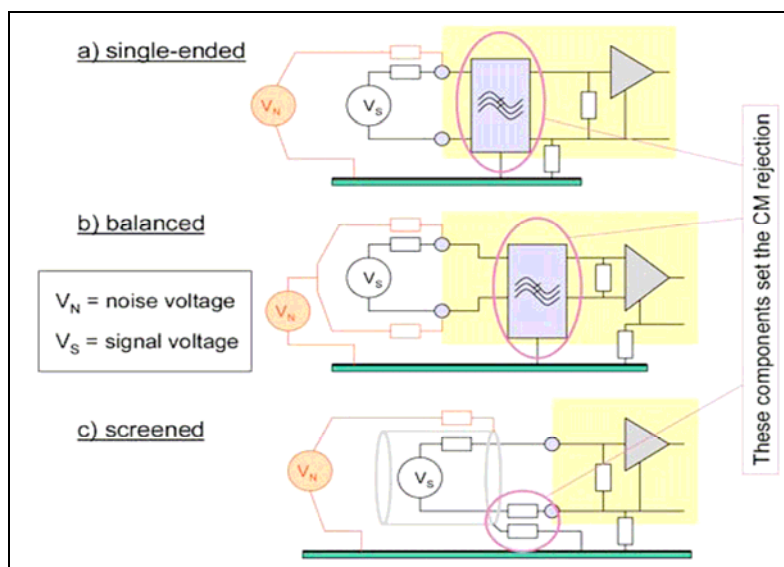
$$1 \text{ [V/m]} / 377 \text{ [V/A]} = 1/377 \text{ [A/m]} \approx 0,00265 \text{ [A/m]}$$

EU-direktiivien mukaan mittaukset on tehtävä kaukokentän olosuhteissa. Näin tehden saadaan hyvä toistettavuus. Kaukokentässä lähetystaajuuksien näennäisesti summautuvat ja kumoutuvat lähikentän komponentit pienenevät nopeasti merkityksettömiksi kertoimilla luokkaa $1/r^2$ tai $1/r^3$, missä r = etäisyys lähteestä. Nämä kertoimet saadaan klassisista Maxwellin yhtälöistä, jotka ovat tämän insinööriyön aiheen ulkopuolella.

2.2 Jänniteinjeksiolla tehty häiriö

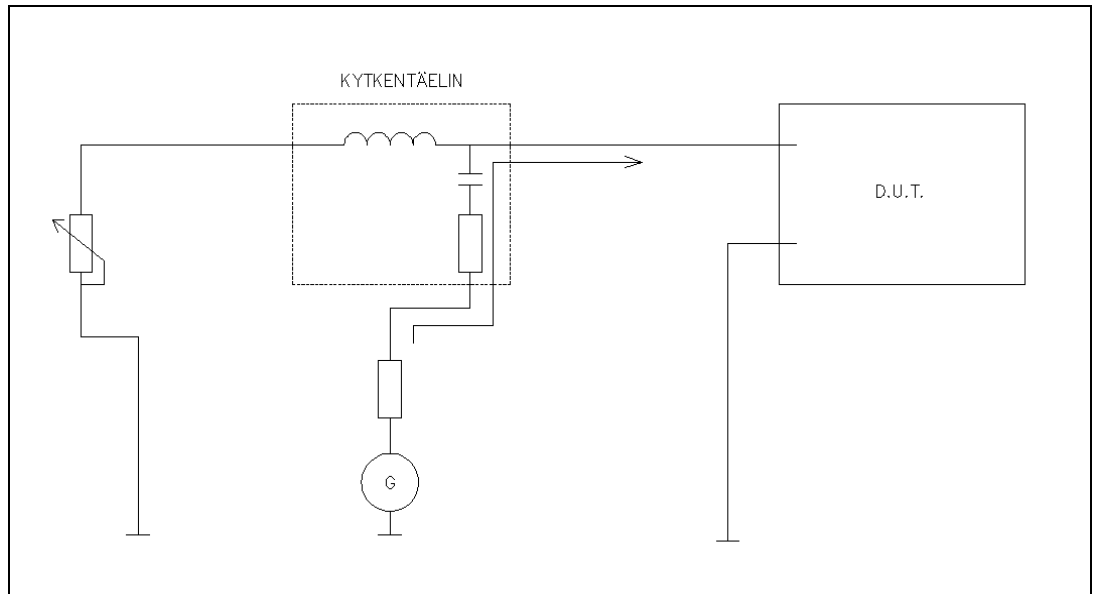
Jänniteinjektion koejärjestelyyn tarvitaan erityinen kytkentäelin. Kytkentäelimen avulla aikaansaadaan häiriö, joka etenee johtimessa ainoastaan testattavaan laitteeseen päin, eikä syöttävään sähköverkkoon päin. Näin aikaansaatu häiriövaikutus ei jakaudu ennustamattomasti sähköverkon ja laitteen kesken vaan ilmenee suoraan epäedullisessa tapauksessa testattavan laitteen sisäisenä toimintahäiriönä.

Jänniteinjektio voidaan toteuttaa eri tavoin. Kaksijohtimisessa anturijohdotuksessa voidaan häiriötä injektoida jompaankumpaan tai molempiin johtimiin ja lisäksi voidaan injektoida ympäröivään suojukseen (kuva 1).



Kuva 1. Erilaisia jänniteinjektion tapoja. Ylin kuvista (single-ended) esittää parhaiten tämän työn tapaus (vrt. kuva 2). V_N on häiriöjännite ja V_S hyöty- eli signaalijännite. Häiriöjännitettä mitataan yhteistä maatasoa vastaan. Kahdessa ylimmässä vaihtoehdossa ympyröity suorakaide esittää alipäästösuodinta. Alimmassa vaihtoehdossa syötetään häiriötä hyötysignaalin lähdeä ympäröivään suojaukseen, josta häiriö ajautuu hyötysignaaliin. /3/

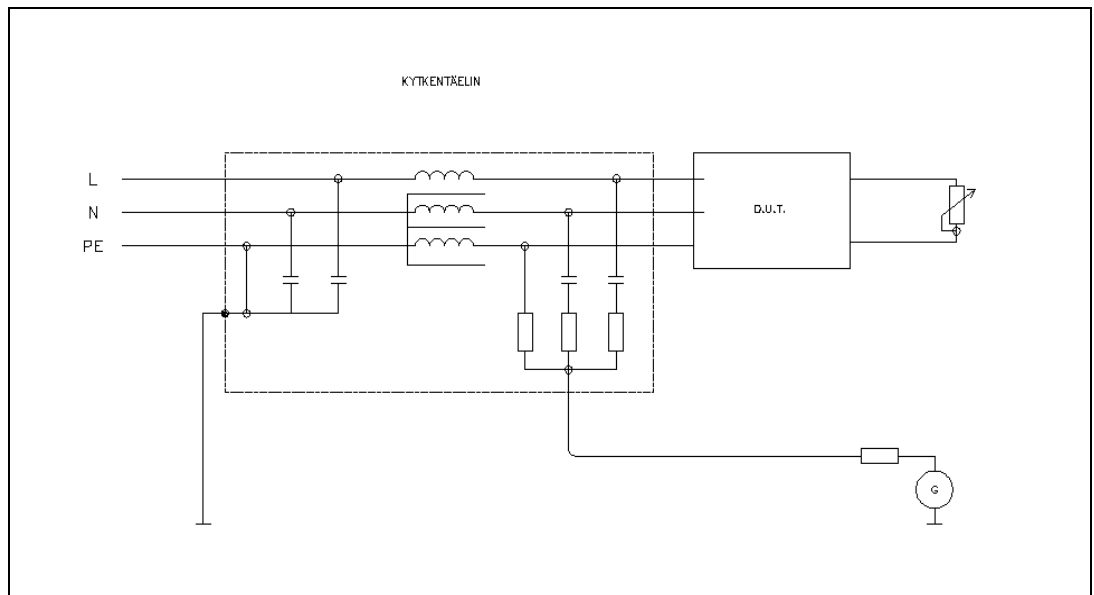
Jänniteinjektion kytkentäelimen kytkentä koostuu induktanssista (käämistä) ja kapasitanssista (kondensaattorista). Lisäksi kytkennässä on kytkentälaitteen ohminen resistanssi (vastus), joka näkyy häiriön syötön sisäänmenossa (kuva 2).



Kuva 2. Kytkentäelimen sähköinen sijaiskytkentä ja jänniteinjektio liitännäjohtoon. Kuvassa G on häiriölähte sisäisellä resistanssilla varustettuna. Nuoliviiva kuvaa häiriövirran suunnan testattavaa laitetta (D.U.T.) kohti. Kuvassa vasemmalta tulee hyötysignaali kytkentäelimeen, esim. anturitietoa. Tässä työssä liitetään kuvassa vasemmalle jännitelähteen kuormaksi säädettävä vastus (reostaatti), jotta piirissä saadaan kulkemaan virtaa.

Kuva 2 osoittaa, että (korkeataajuinen) häiriösignaali ei pääse ajautumaan alipäästösuotimen tapaan toimivan kelan läpi anturin (tässä reostaatin) suuntaan. Tämä on ymmärrettävää, sillä impedanssi anturin suuntaan on $j\omega L$, missä $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ ja $L =$ induktanssi, ja edellähän todettiin taajuuden f olevan (riittävän) korkea. Näin impedanssi anturin suuntaan on suuri. Tasajännitettä (tai -virtaa) edustava anturitieto sen sijaan pääsee helposti pieniresistanssisen kelan läpi normaaliin tapaan testattavalle laitteelle.

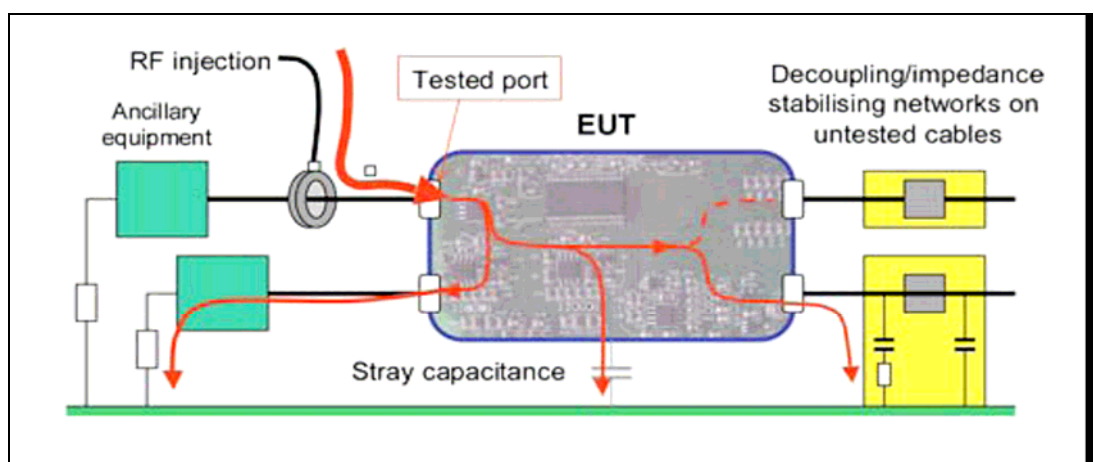
Toisaalta kuvassa 2 näkyvä kapasitanssi (kondensaattori) estää DUT:n antaman tasajännitteen rikkomasta häiriögeneraattoria G. Jänniteinjektio voidaan aiheuttaa joko liitännäjohtoon tai verkkojohtoon (kuvat 2 ja 3).



Kuva 3. Jänniteinjektio verkkojohtoon. Kuvassa testattavan laitteen sähkönsyöttö (vasemmalta) kulkee kytkentäelimen läpi. Matkallaan testattavalle laitteelle sähkönsyöttöön injektoidaan häiriöjännitettä, joka saadaan häirintägeneraattorilta (merkinnällä G). Häiriösignaali jakautuu siis kaikkien kolmen johtimen osalle, kuten kuvassa. Kuvan kytkentäelimen induktanssit estävät korkeataajuisen häiriön pääsyn syötävän verkon puolelle. Injektiota määrittävä standardi EN50082-2 (IEC 801-6) määrittää kytkentäelimen vastusten kokonaisresistanssiksi 100Ω , mikä myös todennettiin mittaamalla resistanssi työn kytkentäelimestä.

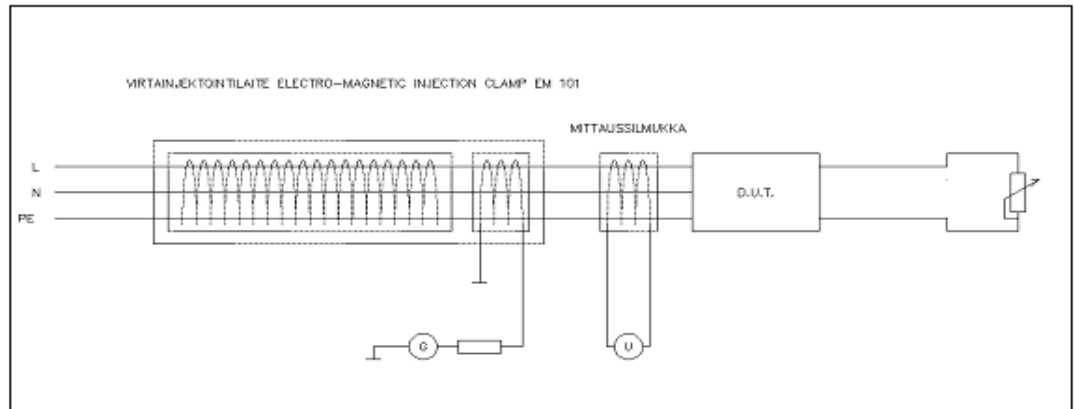
2.3 Virtainjektioilla tehty häiriö

Virtainjektio simuloi tilannetta, jossa läheinen suurtaajuuslähde (esimerkiksi voimakas radiolähetin) indusoi häiriötä altistuvaan johtimeen. Johtimeen tällaisissa oloissa syntyvää virtaa voidaan jäljitellä virtamuuntajalla (kuva 4). Syntyneeseen virtaan vaikuttavat taajuus sekä johtimen säteilyominaisuudet yhdessä.

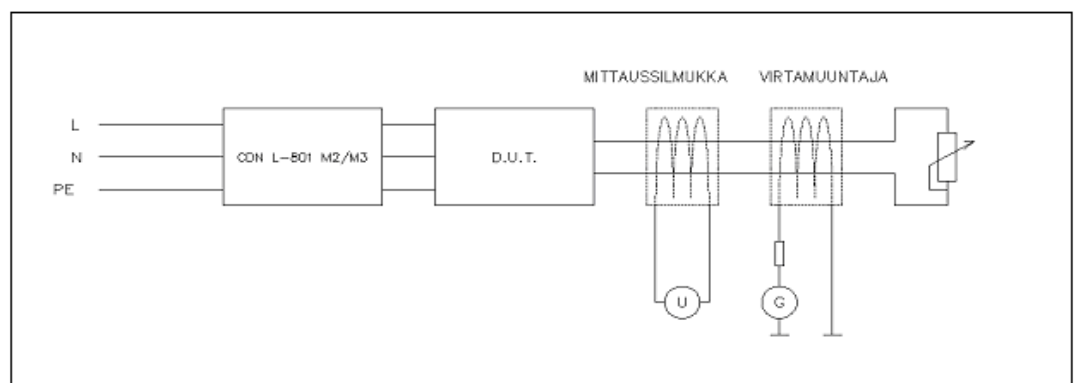


Kuva 4. Virtainjektio testilaitteeseen virtamuuntajalla (kuvassa merkinnällä RF injection); EUT eli Equipment Under Test /3/

Virtainjektion tapauksessa sähkömagneettisen induktion vaikutuksesta johtimeen indusoituu jännite ja johtimessa alkaa kulkea virtaa testattavan laitteen kuormitusimpedanssin suuruudesta riippuen. Tämän työn testattavan laitteen kannalta on mahdollista aiheuttaa virtainjektioita joko verkkojohtoon tai jännitteen ulostuloon eli liitäntäjohtoihin (kuvat 5 ja 6).



Kuva 5. Kaaviokuva virtainjektioista testilaitteen verkkojohtoon. Testattavan laitteen sähkönsyöttö tulee kuvassa vasemmalta, virtainjektio-tilaite Electro-Magnetic Injection Clamp EM 101:n läpi. Kyseiseen laitteeseen syötetään häirintäsignaalia ja laitteen rakenne häviöllisine ferriitteineen (kuvassa kuvattu käämityksen tapaan) sähköverkon puolella estää häirintäsignaalin jakautumisen sähköverkon puolelle. Edelleen siitä oikealle mittausilmukka, testattava laite (D.U.T.) ja säätövastus (reostaatti) tässä työssä. Häviöllistä ferriittirakennetta tarvitaan, jottei virtamuuntajan syöttämä häirintäsignaali jakautuisi testattavan laitteen ja valtakunnan sähköverkon kesken ja siten mahdollisesti vaikuttaisi testituloksiin.



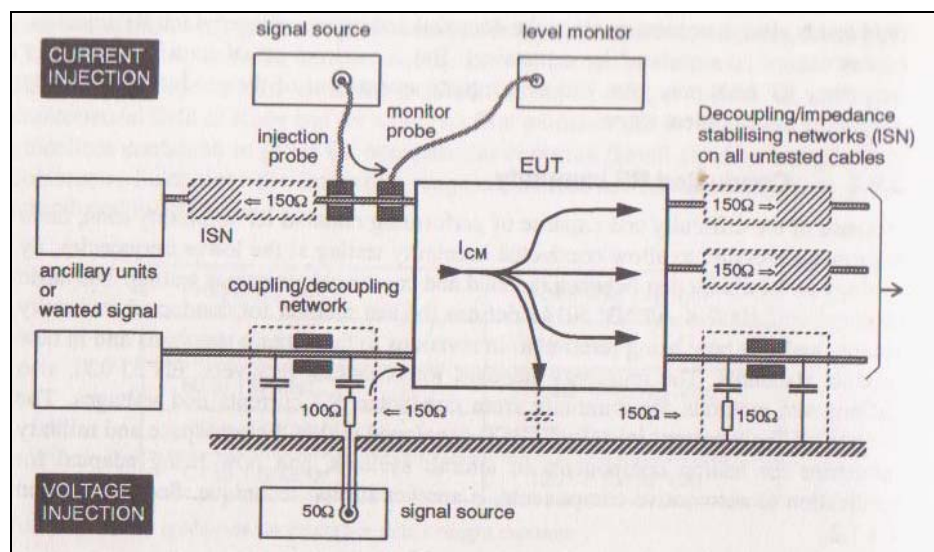
Kuva 6. Kaaviokuva virtainjektioista testilaitteen ulostuloon. Kuvassa testattava laite (D.U.T.) saa käyttöjännitteensä vasemmalta. Testattavan laitteen antama ulostulojännite johdotetaan äärimmäisenä oikealla näkyvälle säätövastukselle (reostaatille). Juuri tässä välissä mitataan ja aiheutetaan virtainjektio kuvan virtamuuntajalla ja häiriögeneraattorilla (jälkimmäinen merkitty kirjaimella G). Testauksessa tarvitaan CDN L-801 M2/M3 -kytkentäelinä sähköverkon ja testattavan laitteen välissä, jotta häirintäsignaali ei jakautuisi sähköverkon puolelle ennustamattomasti.

On huomattava, että virtainjektiossa häiriö on yhteismuotoista (Common Mode), mikä vastaakin todellisuutta. Johdotus altistuu häiriöille

kokonaisuudessaan, eikä altistuminen, ainakaan ilman erityisiä järjestelyjä, tee eroja johdotusten yksittäisten johtimien välillä.

Jännite- ja virtainjektiolla testaamiseen on painetta säteilevällä häirinnällä toteutetun testaamisen eräiden hankaluuksien ja kalleuden vuoksi. Säteilevän häiriön testaus edellyttää häiriösuojattua huonetta, kun injektio-testaus onnistuu kenttäolosuhteissakin ja huomattavasti kevyemmällä kalustolla. Tässä insinööriyössä tutkittiin molempien injektio-tapojen vastaavuutta säteilevän häirinnän kanssa ja keskenään.

Jänniteinjektiolla toteutettu häirintä onnistuu suhteessa pienemmällä teholla kuin vastaava virtainjektiolla. Virtainjektiossa osa tehosta hukkuu häviöihin, mutta kytkentä on usein mekaanisesti ja fyysisesti helpompi toteuttaa. IEC 61000-4-6/ENV 50141 -standardit määrittelevät testauksen menettelytavat ja niihin sekä niiden revisioihin viitataan uusien tuotteiden standardeissa /4, s.101/. Seuraava kuva selvittää injektointitapoja lähemmin (kuva 7):



Kuva 7. Virta- ja jänniteinjektiolla toteutettavia testausmenetelmiä havainnollistava kaaviokuva /4, s.102/. Signaali etenee molemmissa injektio-tapauksissa vasemmalta oikealle testattavaan laitteeseen, ja tällä matkalla toteutetaan injektio kukin omalla tavallaan. Kuvan testattavasta laitteesta lähtee johtimia edelleen oikealle, mikä poikkeaa tämän työn tilanteesta. Tämän insinööriyön kaltaisesta tapauksesta ei ole saatavilla esimerkkikuvia, mutta kuva on sovellettavissa tässä työssä, etenkin impedanssien osalta.

2.4 Tätä insinööriyttä koskevista standardeista

Tässä työssä käytetyissä lähteissä mainitaan muutamia standardeja, jotka koskevat johtumalla eteneviä häiriöitä. Perusstandardi IEC 61000-4-6 määrittelee immunitetestausmenetelmät tavallisimmin taajuusalueella 150 kHz - 80 MHz. Radiovastaanottimia käsittelee immunitestistandardi EN 55020, joka niin ikään testausmenettelyjen lisäksi käsittelee johtuvia virtoja ja jännitteitä radiotaajuuksilla. Lähdemateriaalina on käytetty myös standardia EN50082-2 (IEC 801-6). Tämäkin standardi määrittelee testiproseduureja immunitestauksessa sekä asettaa ehtoja hyväksyttävälle laitteelle. /5./

Säteilevän häiriön immunitestistausta käsittelee standardi EN50082-2 /6/.
Em. standardi vaatii kiteytetysti seuraavaa:

- Testaus on tehtävä vaimennetussa tilassa tietyin vaatimuksin.
- Testattava laite on asetettava johtamattomalle alustalle 80 cm korkeudelle johtavaksi ja maadoitetuksi ajatellusta lattiatasosta. Tämä koskee pöydällä pidettäviä laitteita (kuten tässä työssä käytetty laite).
- Testattavan laitteen käyttösähkö on suodatettava (tarkemmin määrittelemättä) testitilassa ja suodatuksen jälkeen johdettava testilaitteelle tarkalleen 1 metrin mittaisella syöttöjohdolla.
- Testattavan laitteen toiminnalle olennaisen ulkopuolisen toimilaitteen johdotus on hoidettava metrin mittaisella ja pieni-impedanssilla ferriitein varustetulla johdotuksella (tarkemmin määrittelemättä), työn tapauksessa.
- Tietyt homogeenisuusvaatimukset koskevat häirintäkenttää.
- Testausjärjestelyä määrittävät tietyt geometriavaatimukset, joiden tarkoituksena on saada tietty toistettava kentänvoimakkuuden taso (tästä lisää tuonnempana).

Häirintäsäteilyä koskevat seuraavat vaatimukset:

- Mittaus on tehtävä taajuusvälillä 80 - 1 000 MHz.
- Taajuuspyyhkäisy em. välillä on edettävä 1 % taajuuden korotuksin (1,01 * edellinen taajuus) testausstandardin mukaan (mainittakoon, että MIL-standardi edellyttää sen sijaan 0,25 %:n taajuuden korotuksia).
- Häiriösäteilyssä on oltava AM-modulaatiota seuraavasti: 1 kHz:n (± 10 %) siniaaltoja 80 (± 5) %:n modulaatiosyvyydellä.
- AM-modulaation kesto aika kullakin testitaajuudella on oltava vähintään 500 ms.
- Kentänvoimakkuuden on oltava testikategoriasta riippuen 1, 3 tai 10 V/m (lisäksi laitevalmistajalle on varattu vapaus kentänvoimakkuudelle valmistajan oman spesifikaation mukaan).

Nämä vaatimukset toteutuvat riittävän tarkasti tässä työssä seuraavin huomautuksin:

- EN50082-2 -standardin homogeenisuusvaatimus ei teoriassa aivan tarkalleen toteudu, sillä testattava laite metallikuorineen aiheuttaa minimaalisia muutoksia E-kenttään.
- Geometriavaatimukset eivät sido tätä työtä mittaustekniikan toteutustavan ansiosta (ks. 3.2).

AM-modulaation kestoajaksi testauksessa asetettiin 1 000 ms. Kentänvoimakkuudeksi asetettiin 10 V/m.

Tämän työn injektio-testaukset haluttiin toteuttaa EN50082-2 (IEC 801-6) -standardia noudattaen. Tiivistettynä standardin osa IEC 801-6 edellyttää (tämän työn kannalta) seuraavaa:

- Testattava laite on asetettava tasaiselle, maadoitetulle ja johtavalle pinnalle, jota kutsutaan myös maatasoksi. Johtavan pinnan tulee ylittää vähintään 0,2 m joka puolella testilaitteen ympärille.
- Kytkenän laitteille, testattavalle laitteelle ja kytkentäjohtimille on määritellyt korkeudet maatasosta mitattuna.

Perusstandardi EN61000-4-6 jaottelee testauskategorioita häirintägeneraattorin signaalin sähkömotorisen voiman (smv) mukaan. Kategoriat testattavalle laitteelle määräytyvät 1, 3 ja 10 V:n smv:n sietokyvyn mukaan.

Häiriögeneraattorilta edellytetään seuraavaa:

- Ulostuloimpedanssin on oltava 50 Ω .
- Särön ja harmonisten taajuuksien on oltava ≤ -15 dB alle kanta-aallon tason.
- Amplitudimodulaatiovaatimukset ovat samoja kuin säteilevän häiriötestauksen tapauksessa.
- Häiriösignaalin tason on oltava suuruusluokkaa testilaitteen taso / 6 (± 25 %) lineaarisen taajuuspyyhkäisyn tapauksessa.

Testausstandardi antaa tyyppimerkinnot testauksiin käytettäville injektointilaitteille, eli käytännössä sille, millainen on niiden määräysten mukainen sähköinen sijaiskytkentä. Tässä työssä käytettiin testausstandardin mukaisia injektointilaitteita.

Testattavan laitteen ja kaapelien johdotuksille on omat ohjeensa, joita työssä noudatettiin. IEC 61000-4-6 -standardin taajuusalue päättyy 80 MHz:iin, mutta injektointilaitteet täyttävät vaatimukset 230 MHz:iin saakka, mitä edellytetään eräissä tapauksissa. Johtimien epäideaalisuuksien arveltiin tässä työssä olevan merkitykseltään pieniä, sillä käytettiin hyvälaatuisia sellaisia.

Mainitun taajuusalueen läpikäyntinopeus on määritelty, se ei nimittäin saa ylittää nopeutta $1,5 * 10^{-3}$ dekadia/s. Askelittain nousevaa taajuutta käyttäen ei askeleen suuruus saa ylittää 1 % aloitustaajuudesta ja sen jälkeen 1 % seuraavan taajuuden suuruutta. Näillä ehdoilla halutaan ilmeisesti varmistaa se, että testattava laite ehtii kunnollisesti reagoida uuteen taajuuteen testauksen edetessä.

Yleisesti standardeja noudattamalla saadaan vertailukelpoisuutta ja toistettavuutta. Injektiotapausten standardia noudatettiin soveltuvin osin, sillä sen esimerkkitapaukset ja kytkentäohjeet koskevat erilaista tilannetta ja testattavaa laitetta kuin työn tapauksessa. Injektiostandardien esimerkkikuvissa mm. tarvittavasta apulaitteesta (AE; *Auxiliary Equipment*) lähti johtimia eteenpäin (toki asianmukaisesti erotettuna), mikä ei sovellu tämän työn tapaukseen. Säteilevää häiriötä koskevaa standardia saattoi sen sijaan noudattaa aivan tarkalleen, sillä se esittää yksikäsitteiset ja selkeät asetusarvot.

3 HÄIRIINTYVYYSMITTAUKSET

Työn vertailu eri häiriömuotojen välillä perustui säteilevän häiriön vastaavuuden hakemiseen injektiotapauksissa. Tämä edellytti huolellisia käytännön mittauksia. Samalla haluttiin toistettavuutta, todistusvoimaisuutta ja noudattaa työtä koskevia standardeja.

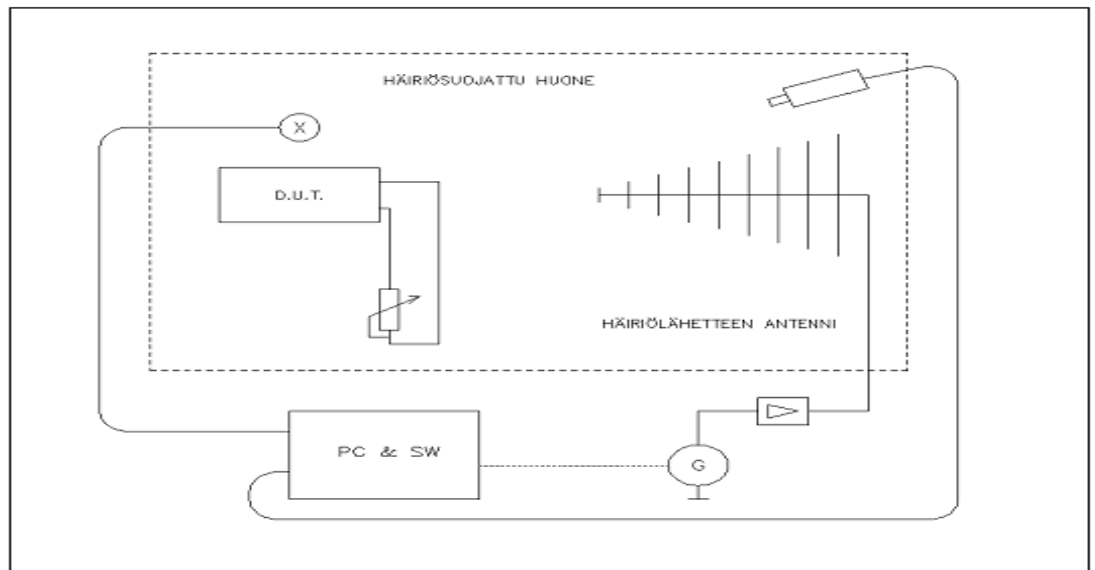
3.1 Koejärjestelyt

Testausstandardi ei suoraan anna ohjeita testattavan laitteen asetuksille. Tässä työssä päätettiin asetella jännitelähde antamaan 10 V:n jännitettä, joka ohjattiin 20 ohmin säätövastukselle (reostaatille), joten virraksi tulee Ohmin lain mukaan 0,5 A. Aivan tarkalleen tosin jännitelähteen virran oma näyttämä ei tätä tosiseikkaa tukenut.

3.2 Säteilevä häiriö

Koetilanteessa tarvittiin häiriösuojattua huonetta, jottei häiriösignaali olisi levinnyt ympäristöön ja ennen kaikkea sitä, etteivät ulkopuoliset häiriöt olisi

vaikuttaneet mittaukseen (kuva 8). Samoista syistä ei mittauksen aikana huoneessa sallittu ihmisten läsnäoloa.



Kuva 8. Häiriösuojattu huone ja koeytkennän kaaviokuva E-kentän häiriövaikutusten toteamiseksi. Kuvassa testattavan laitteen (D.U.T.) yläpuolella on kentänvoimakkuusanturi (merkinnällä X). Kuvan oikeassa yläkulmassa on kamera, jolla testattavan laitteen häiriintymistä voidaan tarkkailla. Kentänvoimakkuusanturi antaa taikasinkytkevää informaatiota tietokoneelle ja sen ohjelmalle (kuvassa merkinnällä PC & SW) ja kameran informaation perusteella tehdään testiraportti. Haravamainen rakenne kuvassa esittää häirintäantennia. Testin aikana tietokone ohjelmineen säättää myös häiriögeneraattoria (kuvassa merkinnällä G), tarkemmin sen taajuusaskelusta ja antotasoa. Häiriögeneraattorin ja antennin välissä on työssä tarvittava teho vahvistin.

Säteilevän häiriön tapauksessa täytettiin testausstandardin vaatimukset sekä asetettiin häiriögeneraattori pyyhkäisemään vaadittu taajuusalue automaattisesti portaittain. Automaattisesti toteutettiin myös jännitelähteen etupaneelin volttimittarin seuranta kokeen aikana, jolloin käytettiin kameraa ja tietokonetta hahmontunnistusohjelmineen. Koko prosessi tapahtui automaattisesti ja pyyhkäisy kesti noin 31 minuuttia. Ellei automatiikkaa olisi ollut käytössä, olisi prosessi kestänyt huomattavasti kauemmin, kun säädöt olisi pitänyt asettaa käsin yksitellen taajuus kerrallaan. Lisäksi automaatio minimoi inhimillisten virheiden vaikutukset. Tuloksista tehtiin käyrä, joka osoittaa, millä taajuuksilla testattava laite häiriytyi ja miten paljon.

Automaattisen pyyhkäisyn taajuusalueeksi asetettiin 80 - 1 000 MHz ja taajuus asetettiin nousemaan pykälittäin 1 % korotuksin. Modulaatiosyvyydeksi asetettiin testausstandardin vaatima 80 % 1 kHz:n siniaalto.

Kentänvoimakkuudeksi asetettiin 10 V/m. Näin menetellen oli tarkoituksena saada aikaan reilusti näkyviä tuloksia.

Antennin etäisyys testihetkellä testattavasta laitteesta oli noin 180 cm. Kentänvoimakkuusanturi oli kattoon kiinnitettyyn lankaan sidottuna noin 90 cm korkeudella testattavasta laitteesta (kuvat 9 ja 10).

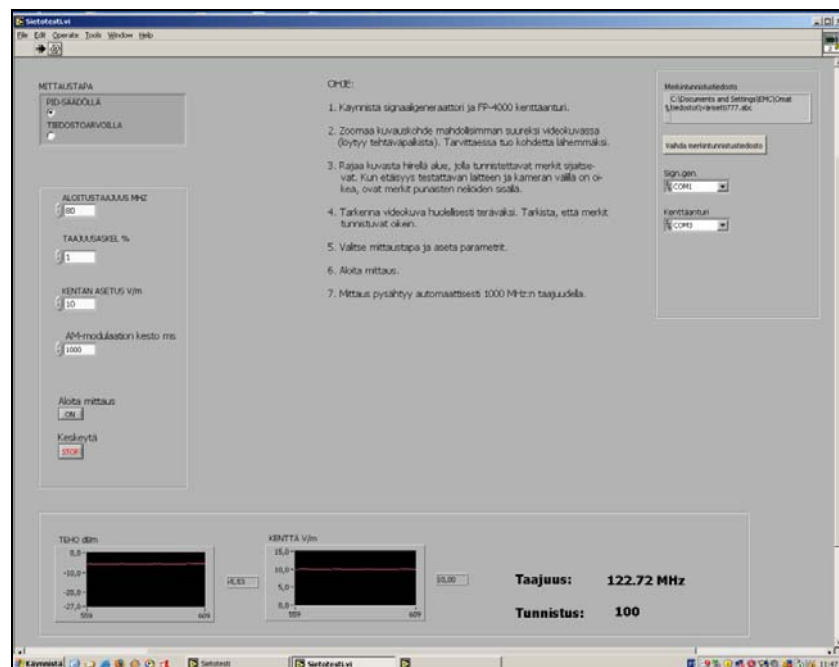
Jännitelähde asetettiin pöydälle antennin eteen suunnilleen samalle korkeudelle ja sopivalle etäisyydelle, millä pyrittiin aikaansaamaan riittävän suuri kentänvoimakkuus. Häiriösuojatun huoneen ovi suljettiin ja siirryttiin huoneen ulkopuolisen tietokoneen ääreen. Testin aikana tietokone kontrolloi lähetystehoja pitäen kentänvoimakkuuden vakiona asetellussa arvossa taajuuspyyhkäisyn edetessä.



Kuva 9. Testausstandardin mukainen säteilevän häiriön koejärjestely. Kattoon on ripustettu kentänvoimakkuusanturi, jonka informaatio tuodaan valokuidulla huoneen ulkopuolelle. Testattavan laitteen korkeus on täsmälleen oikea, 80 cm lattiasta. Laitteet vasemmalta oikealle: säätövastus (reostaatti), ferriitein varustetut ja tarkalleen metrin mittaiset kytkentäjohdot, testattava laite eli jännitelähde tässä työssä ja lattialla keinoverkko (LISN), josta lähtee tarkalleen metrin pituinen syöttöjohto testattavalle laitteelle.



Kuva 10. Säteillevän häiriön immuteettitestausta havainnollistava kuva. Kuva on otettu häirintälähetettä lähettävän antennin takaa (ks. myös kuvat 9, 39 ja 40). Järjestely on testausstandardin mukainen. Testauksen aikana huoneessa ei oven sulkemisen jälkeen sallittu ihmisten läsnäoloa, vaan tarkkailu tapahtui kameralla.



Kuva 11. Kuvakaappaus mittausautomaatio-ohjelman käyttöliittymästä. Parametrien asettelujen jälkeen ohjelmassa painettiin Aloita mittaus -nappia ja taajuuslukema alkoi nousta. Samaan aikaan näkyi kohdassa Tunnistus jännitelähteen senhetkinen näyttämä. Tämä näkyi tosin ilman desimaalipistettä, siten esimerkiksi kuvan tunnustusarvo 100 tarkoittaa 10,0 voltia. Ohjelma tuotti lopuksi tekstipohjaisen listauksen taajuuksista ja niitä vastaavista tunnustusarvoista, joita voitiin sitten käsitellä taulukolaskentaohjelmalla.

Häiriösuojatun huoneen ulkopuolella olevan tietokoneen mittausautomaatio-ohjelman käyttöliittymästä on kuvankaappaus edellä (kuva 11). Apuna työssä käytettiin mittausautomaatiota aivan erityisesti käsittelevää lähdettä, nimittäin aiheesta tehtyä kattavaa insinööriytöä /7/. (Ks. mittausautomaatio-ohjelman tuottama tuloslistaus, liite 1.)

3.3 Jänniteinjektio

Jänniteinjektio-testit toteutettiin testausstandardia soveltaen (kuvat 12 ja 13). Työssä käytetyt kytkentäelimet ovat periaatteiltaan jo esitellyt aiemmin. (Ks. 2.2.)



Kuva 12. Jänniteinjektio **liitäntäjohtoon**, koejärjestely kytkentäelintä CDN L-801 M1 käyttäen. Vasemmalta reostaatti, kytkentäelin ja jännitelähde. Huomiota kiinnitettiin kytkentäelimen kunnolliseen maadoitukseen.



Kuva 13. Jänniteinjektio **verkkojohtoon**, koejärjestely kytkentäelintä CDN L-801 M2/M3 käyttäen. Vasemmalta reostaatti, jännitelähde ja kytkentäelin.

Tämän työn kytkentäelimet ovat mallia CDN L-801 M1 (jänniteinjektio liitäntäjohtoon) ja CDN L-801 M2/M3 (jänniteinjektio verkkojohtoon), mitkä myös viittaavat testausstandardiin. Valmistaja on sveitsiläinen Lüthi. (Ks. kytkentäkaaviot, liitteet 2 ja 3.)

3.4 Virtainjektio

Testausstandardi esittää arvioita tehojen tarpeista tiettyjen kentänvoimakkuuksien vastaavuuksien saavuttamiseksi, mikä riippuu virtasilvikoiden käämintäsuhteista. Nämä eivät selvinneet ainakaan käytettyjen laitteiden tyyppikilvistä, mutta on oletettava, että laitteet olivat testausstandardien mukaisia.

Virtainjektioitustien koejärjestelyjä valmisteltaessa havaittiin, että *liitäntäjohtojen* injektointiin tarvittavan virtamuuntajan kalibroitu toiminta on määritelty 230 MHz:iin asti (ks. liite 4). Säteilevän häiriön testi tehtiin 1 000 MHz:iin asti, joten em. virtamuuntajan tuloksia ei voitu palauttaa vertailukelpoisiksi. Injektioperiaatteen esittely haluttiin silti tässä työssä tehdä.

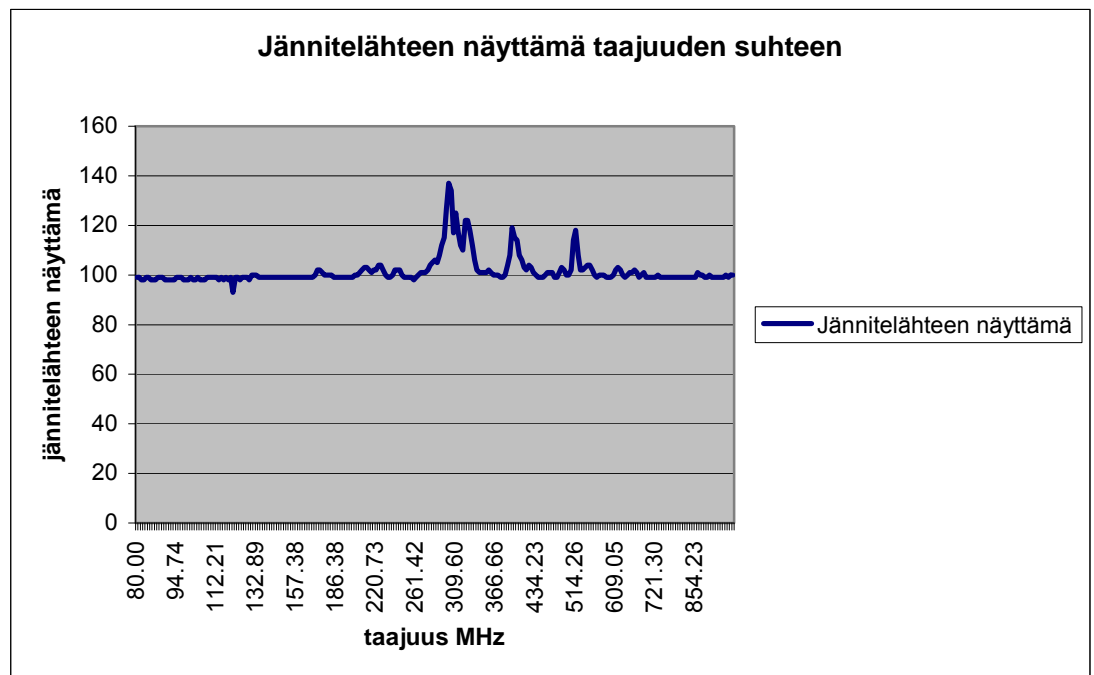
Virtainjektio voitiin silti suorittaa *verkkojohtoon*. Mittaukset tehtiin testausstandardin mukaisesti soveltuvin osin. Jäljempänä kuvia verkkojohdon virtainjektioinnin koejärjestelystä (kuvat 26 - 34). (Ks. virtainjektiossa tarvittujen laitteiden dokumentit ja spesifikaatiot, liitteet 4 - 6).

4 HÄIRIINTYVYYSMITTAUSTEN TULOKSET

Tulosten esittelyssä kiinnitettiin huomiota havainnollisuuteen ja todistusvoimaisuuteen. Konkreettisten tulosten saamiseksi kohdattiin eräitä ongelmia, joista pian seuraavassa.

4.1 Säteilevän häiriön tulokset

Alkuasettelujen jälkeen mittausautomaattikka suoritti mittauksen itsenäisesti. Tuloksien perusteella voitiin taulukkolaskentaohjelmalla tuottaa seuraava kuvaaja (kuva 14):



Kuva 14. Jännitelähteen näyttämä taajuuden funktiona. Hahmontunnistusohjelma ei tunnistanut desimaalipistettä, mistä syystä jännitelähteen näyttämät on kerrottava luvulla 0,1. Siten esimerkiksi taajuudella 300,47 MHz esiintyvän piikin arvo 137 tarkoittaa jännitelähteen näyttäneen tuolloin todellisuudessa 13,7 voltia (ks. liite 1).

Mittausta valmisteltaessa havaittiin, ettei jännitelähteen jännitelukema ollut aivan vakaa, nimittäin $\pm 0,1$ V:n heilahteluja esiintyi. Tästä syystä esiintyi 9,9 (ja jopa 9,8) V:n tilanteita (jotka hahmontunnistusohjelma tunnisti arvoiksi 099 tai 098). Oven sulkemisen ja etenkin mittauspyyhkäisyn aikana ei siihen voinut vaikuttaa.

Mainittavimmat kolme piikkiä vasemmalta oikealle esiintyivät seuraavasti (kuva 14):

Piikki 1: taajuus 300,47 MHz, jolloin tunnistusarvo oli 137 (13,7 voltia)

Piikki 2: taajuus 393,11 MHz, jolloin tunnistusarvo oli 119 (11,9 voltia)

Piikki 3: taajuus 514,26 MHz, jolloin tunnistusarvo oli 118 (11,8 voltia)

Nämä taajuudet otettiin erityisen tarkastelun kohteiksi myöhemmin. Seuraavassa taulukko säteilevän häiriön immuniteettitestin tuloksista (taulukko 1).

Taulukko 1. Yhteenveto säteilevän häiriön immuniteettitestin tuloksista

| Piikki no. | Taajuus [MHz] | Vastaava λ ⁽¹⁾ | Vastaava kaukokentän etäisyys ⁽²⁾ | Näyttämä mainitulla taajuudella | Näyttämän edustama virhe-% ⁽³⁾ |
|------------|---------------|-----------------------------------|--|---------------------------------|---|
| 1 | 300,47 | 0,998 | 0,160 | 137 (13,7 V) | +37 |
| 2 | 393,11 | 0,763 | 0,122 | 119 (11,9 V) | +19 |
| 3 | 514,26 | 0,583 | 0,093 | 118 (11,8 V) | +18 |

Huomautuksia

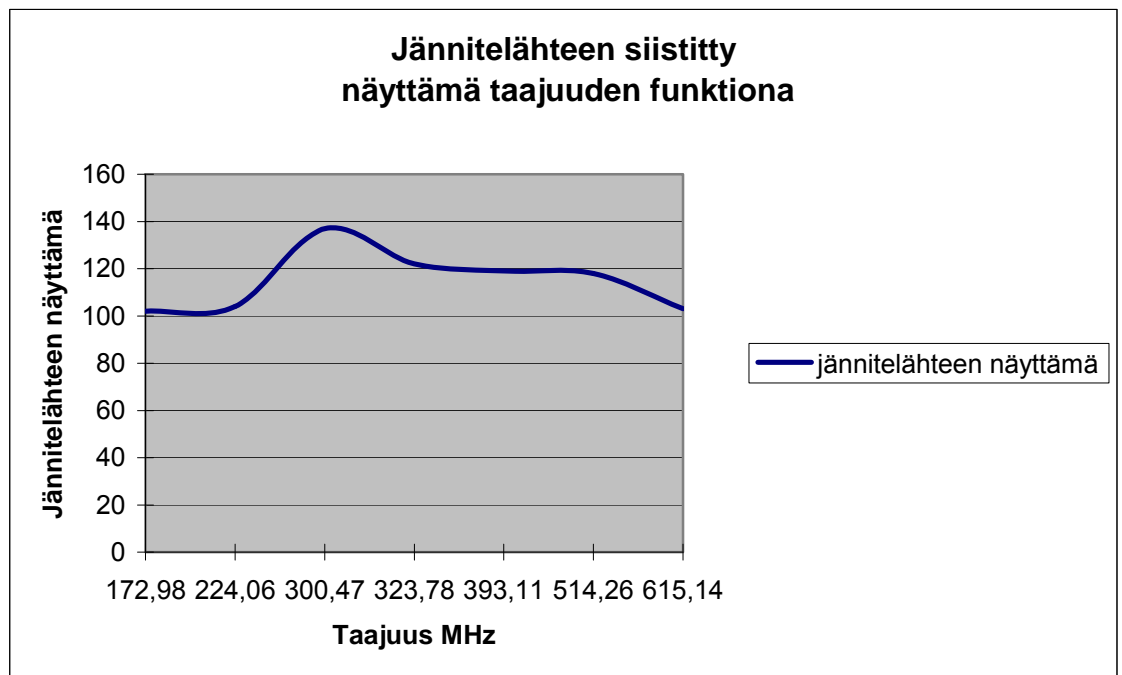
(1)= λ eli aallonpituus, joka saadaan jakamalla valon nopeus tyhjiössä (yksikköä m/s) mainitulla taajuudella (yksikköä 1/s), tuloksen yksikkö metriä

(2)= kaukokentän olosuhteiden alkamisraja, jotka alkavat lähteen ja vastaanoton välisestä etäisyydestä n. $0,16 * \lambda$ (ks. ed.) kauempana (oletuksena pistemäinen lähde), yksikkö metriä

(3) = virheprosentti verrattuna asetettuun arvoon 10,0 V (tunnistusarvo 100)

Piikki 1:n läheisyydessä esiintyy piikki 309,60 MHz:n taajuudella, jolla näyttämäksi tunnistettiin 125 (12,5 V). Lisäksi tuloslistauksen (liite 6) mukaan muita paikallisia kohoamisia havaittiin taajuuksilla 172,98 MHz (arvioitu keskikohta, jolla tunnistettiin 102), 224,06 MHz (arvioitu keskikohta, jolla tunnistettiin 104), 323,78 MHz (arvioitu keskikohta, jolla tunnistettiin 122) ja vielä taajuudella 615,14 MHz, jolla tunnistettiin 103. (Kuva 14.)

Kuvaajaa yksinkertaistettiin syöttämällä kaikki edellä havaitut paikalliset kohoamiset taulukkolaskentaohjelmaan ja lisäksi vielä sallittiin kuvaajan käyrän pyöristäminen. Näin saatiin seuraavanlainen siistitty kuvaaja (kuva 15):



Kuva 15. Jännitelähteen siistitty näyttämä taajuuden funktiona. Kuvaajan lähdetietoina on käytetty kaikkia havaittuja paikallisia näyttämien kohoamisien arvoja. Lisäksi on sallittu kuvaajan käyrän pyöristäminen, puhtaasti havainnollistamaan tilannetta. Tämä kuva on keskimääräinen eikä kerro koko totuutta (vrt. kuva 14), mutta sen tarkoitus on osoittaa, että 300,47 MHz:n taajuudella on voimakkain häiriintymisaste ja häiriintyminen vaimenee taajuuden noustessa. Näyttämien arvo (y-akselin arvot) on kerrottava luvulla 0,1, sillä hahmontunnistusohjelma ei tunnistanut desimaalipistettä testin aikana.

Etäisyydet, joista alkaen vallitsevat kaukokentän olosuhteet, voidaan laskea edellä esitetyn laskutavan mukaisesti (ks. 2.1). Koska suurin rajaetäisyys (taajuudella 300,47 MHz) on noin 0,160 metriä, voidaan häirintäetäisyyttä pitää riittävänä. Lähetinantennin ja vastaanottavan jännitelähteen etäisyys oli joka tapauksessa suurempi, lähes 2 m, joten toimittiin varmuudella kaukokentässä.

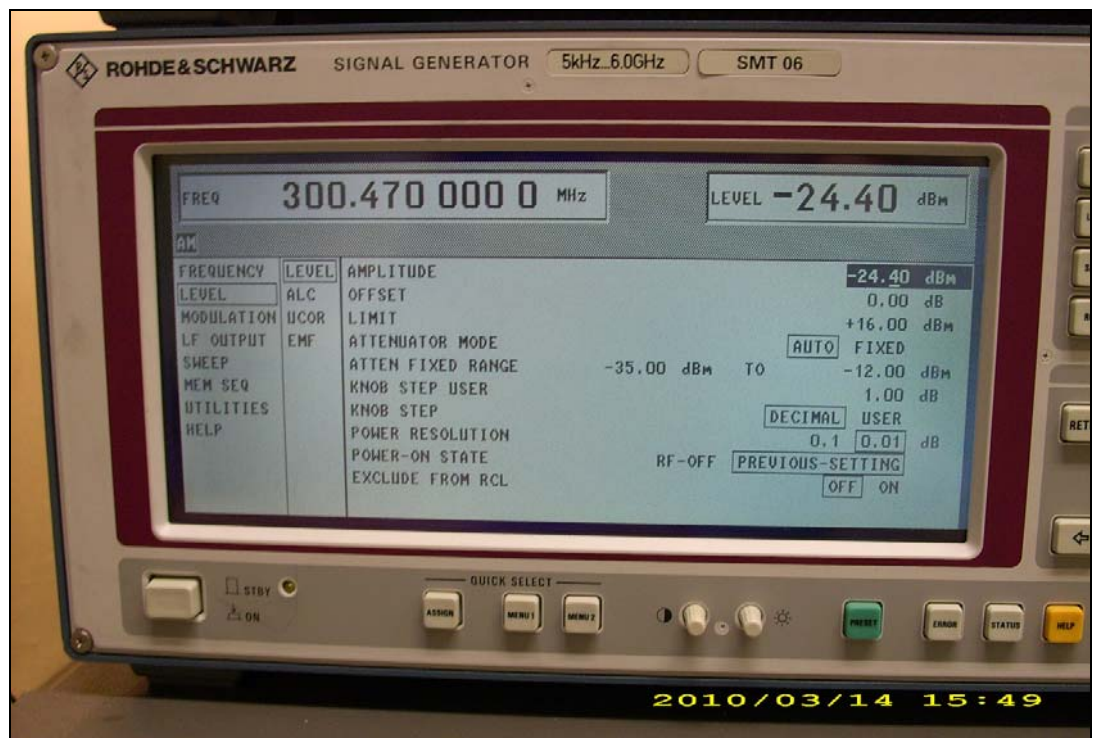
4.2 Jänniteinjektion tulokset

Jänniteinjektion tapauksessa jouduttiin tekemään joitain myönnytyksiä. Säteilevän häirinnän tapauksessa kentänvoimakkuutta valvoi ja säätö kentänvoimakkuusanturi ja ohjelmisto. Jänniteinjektion tapauksessa mittaustavan takia ei ollut tarjolla säätävää ja takaisinkytkevää tietoa tai mittalaitetta. Tästä syystä taajuutta ja häiriögeneraattorin antotasoa jouduttiin säätämään manuaalisesti.

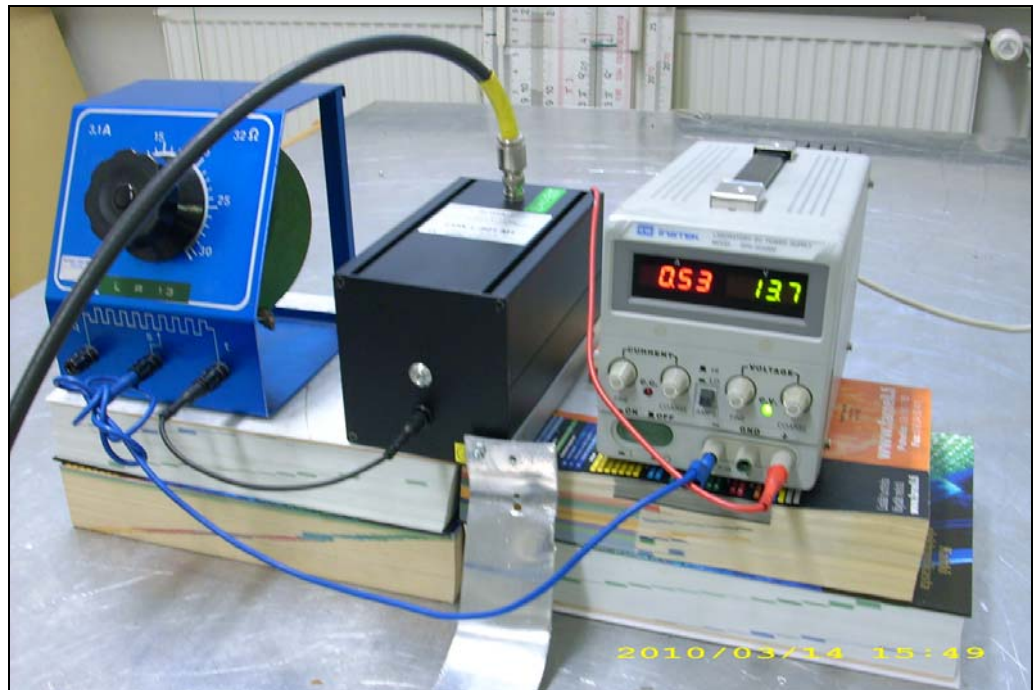
Jännite- ja virtainjektiomittauksissa vertailukelpoisten tulosten saamiseksi jouduttiin kytkemään häiriögeneraattorin perään 25 W:n tehovahvistin. Näin siksi, koska häiriögeneraattorin antama signaalitaso oli yksin riittämätön.

Säteilevän häirinnän tapauksessa (kuva 14) esiintyvät piikit olivat tässä erityisen tarkastelun kohteena, sillä säteilevän häirinnän jokaisen 255:n erillisen mittauspisteen läpikäyminen yksitellen käsin arvioitiin liian työlääksi. Mainittujen piikkien taajuudet asetettiin häiriögeneraattoriin kukin kerrallaan ja rauhallisesti nostettiin signaalin tasoa, kunnes testattava laite osoitti samaa häiriintymisastetta kuin säteilevän häirinnän tapauksessa. Jänniteinjektiossa (samoin kuin virta-) esiintyi testattavan laitteen volttimittarissa huomattavaa epävakautta.

Taajuudella 300,47 MHz aiheutettu säteilevää häirintää vastaava jänniteinjektio liitänäjohtoon ilmeni seuraavasti (kuvat 16 ja 17):

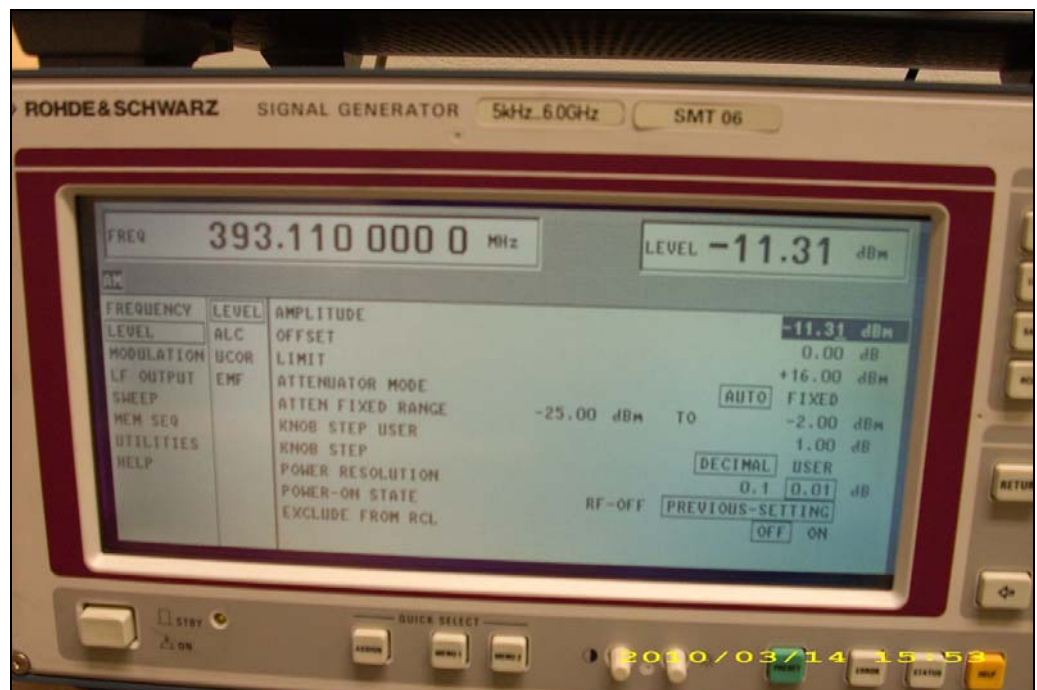


Kuva 16. Jänniteinjektio-tilanne **liitänäjohtoon**: häirintägeneraattori taajuudella 300,47 MHz ja 10 V/m:n kentänvoimakkuuden häiritsevyytensä vastaavalla antotasolla -24,40 dBm



Kuva 17. Jänniteinjektio-tilanne **liitäntäjohtoon**: testattavan laitteen häiriintyminen taajuudella 300,47 MHz kuvan 16 esittämällä antotasolla, epävakaa näyttämä keskimäärin 13,7 V

Taajuudella 393,11 MHz aiheutettu säteilevää häirintää vastaava jänniteinjektio liitäntäjohtoon ilmeni seuraavasti (kuvat 18 ja 19):

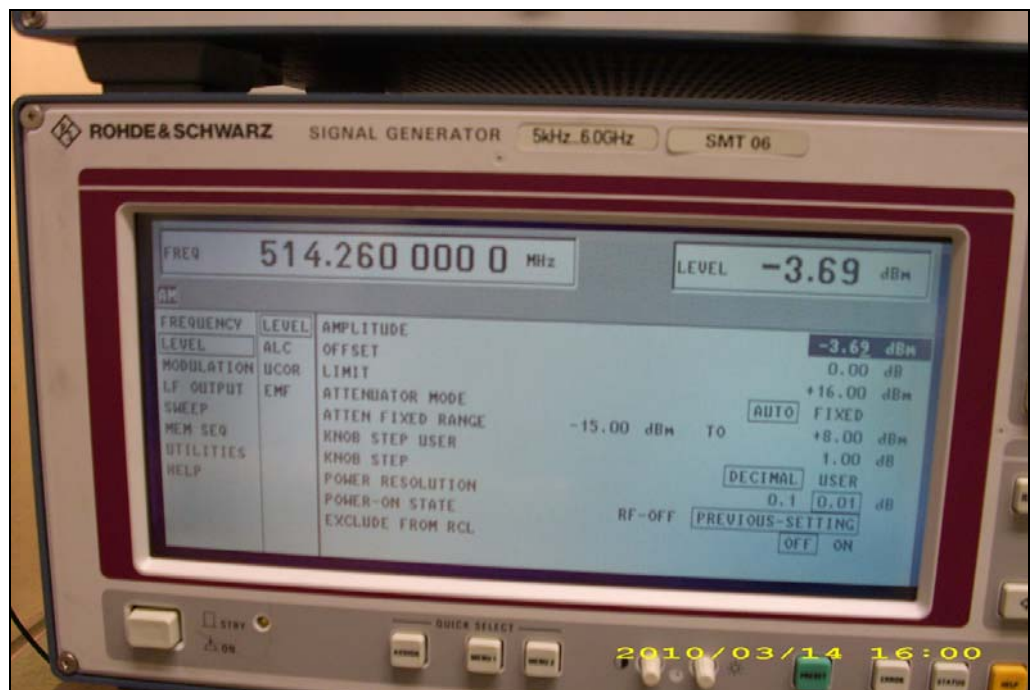


Kuva 18. Jänniteinjektio-tilanne **liitäntäjohtoon**: häirintägeneraattori taajuudella 393,11 MHz ja 10 V/m:n kentänvoimakkuuden häiritsevyytensä vastaavalla antotasolla -11,31 dBm

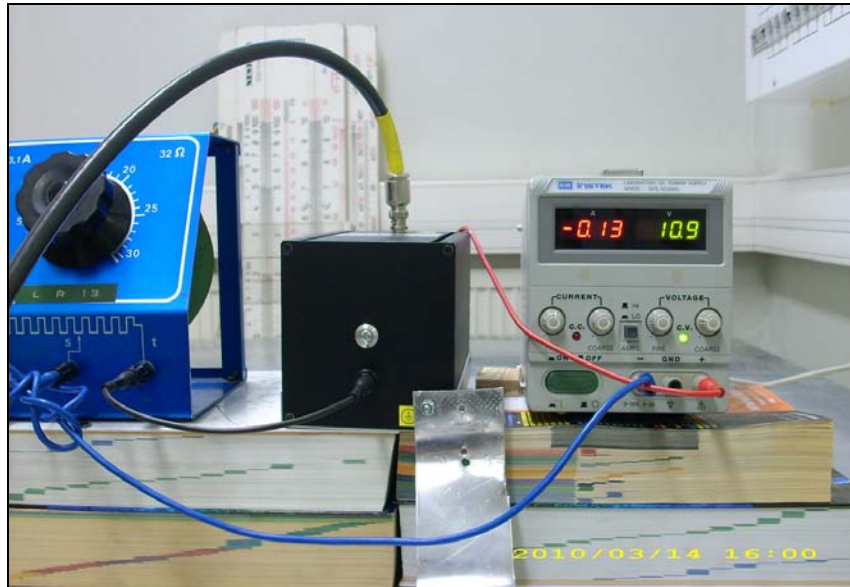


Kuva 19. Jänniteinjektiotilanne **liitäntäjohtoon**: testattavan laitteen häiriintyminen taajuudella 393,11 MHz kuvan 18 esittämällä antotasolla, epävakaata näyttämä keskimäärin 11,9 V (kuvan ottohetkellä sattumalta 11,8 V)

Taajuudella 514,26 MHz aiheutettu säteilevää häirintää vastaava jänniteinjektio liitäntäjohtoon ilmeni seuraavasti (kuvat 20 ja 21):



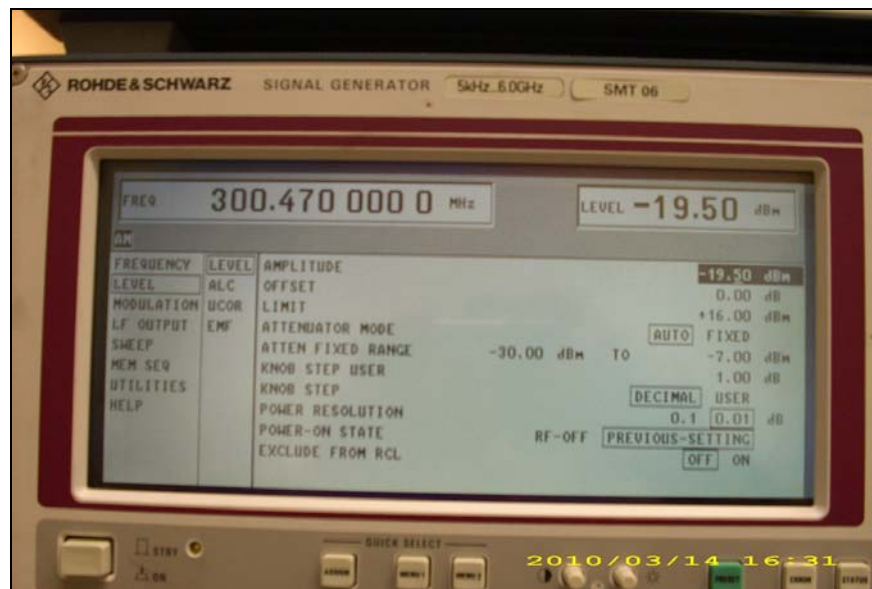
Kuva 20. Jänniteinjektiotilanne **liitäntäjohtoon**: häirintägeneraattori taajuudella 514,26 MHz ja 10 V/m:n kentänvoimakkuuden häiritsevyytensä vastaavalla antotasolla -3,69 dBm



Kuva 21. Jänniteinjektiotilanne **liitäntäjohtoon**: testattavan laitteen häiriintyminen taajuudella 514,26 MHz kuvan 20 esittämällä antotasolla (epävakaa näyttämä keskimäärin 11,8 V, kuvan ottohetkellä sattumalta 10,9 V)

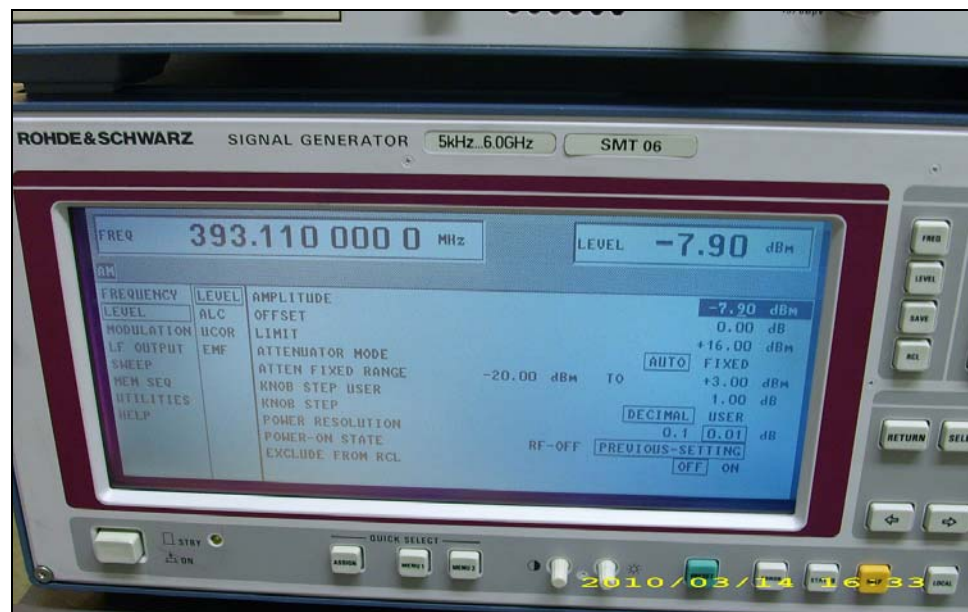
Jänniteinjektiossa verkkojohtoon ei jännitelähdettä enää kuvattu, sillä häirintägeneraattorin antotasoa nostamalla ainoastaan haettiin mahdollisimman tarkasti sama näyttämä jännitelähteen etupaneelissa. Näin ollen kuvat eivät tarjoaisi uutta tietoa.

Taajuudella 300,47 MHz aiheutettu säteilevää häirintää vastaava jänniteinjektio verkkojohtoon ilmeni seuraavasti (kuva 22):



Kuva 22. Jänniteinjektiotilanne **verkkojohtoon**: häirintägeneraattori taajuudella 300,47 MHz ja 10 V/m:n kentänvoimakkuuden häiritsevyytensä vastaavalla antotasolla -19,50 dBm

Taajuudella 393,11 MHz aiheutettu säteilevää häirintää vastaava jänniteinjektio verkkojohtoon ilmeni seuraavasti (kuva 23):



Kuva 23. Jänniteinjektio-tilanne **verkkojohtoon**: häirintägeneraattori taajuudella 393,11 MHz ja 10 V/m:n kentänvoimakkuuden häiritsevyytensä vastaavalla antotasolla -7,90 dBm

Taajuudella 514,26 MHz aiheutettu säteilevää häirintää vastaava jänniteinjektio verkkojohtoon ilmeni seuraavasti (kuva 24):



Kuva 24. Jänniteinjektio-tilanne **verkkojohtoon**: häirintägeneraattori taajuudella 514,26 MHz ja 10 V/m:n kentänvoimakkuuden häiritsevyytensä vastaavalla antotasolla -10,59 dBm

Edellisillä asetuksilla pyrittiin saamaan säteilevää häirintää vastaavat näyttämät jännitelähteen etupaneelissa (kuvat 16 - 24). Juuri tällä pyrittiin tavoittelemaan verrannollisuutta ja korrelaatiota.

EN50082-2/IEC 801-6 -standardi sekä sitä noudattava lähdeaineisto ilmoittaa testauskytkennän impedanssiksi 150Ω [5]. Tämä muodostuu häirintägeneraattorin sisäisestä resistanssista (50Ω) ja kytkentäelimen resistanssista (100Ω).

Koska häirintägeneraattorin etupaneelissa näkyi verrannollinen antotaso dBm:nä, voitiin vastaavaa häiriintymisastetta edellyttävät jännitteet U laskea seuraavan kaavan (2) mukaisesti:

$$U = \sqrt{P \cdot Z}, \text{ jossa } P = 10^{([dBm\text{-luku}] / 10)} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{ (W)}. \quad (2)$$

Antotason yksiköstä dBm johtuu myös kerroin $1 \cdot 10^{-3}$ kaavassa (2). Koska häirintägeneraattorin sisäinen resistanssi on 50Ω , niin 50Ω :n kuormitustilanteessa kaavan (2) U vaikuttaa kuormitusresistanssin yli yhtä suurena kuin jännite sisäisen resistanssin yli. Häirintägeneraattorin antotason lukemassa tämä otetaan huomioon. Tästä johtuen kaavan (2) Z :n arvoksi asetetaan 50Ω . Testausstandardien mukaan testeissä pitää tietää häiritsevän jännitteen sähkömotorinen voima (smv). Edellä esitetyn mukaan smv voidaan laskea seuraavasti (kaava 3):

$$\text{smv} = 2 * U, \quad (3)$$

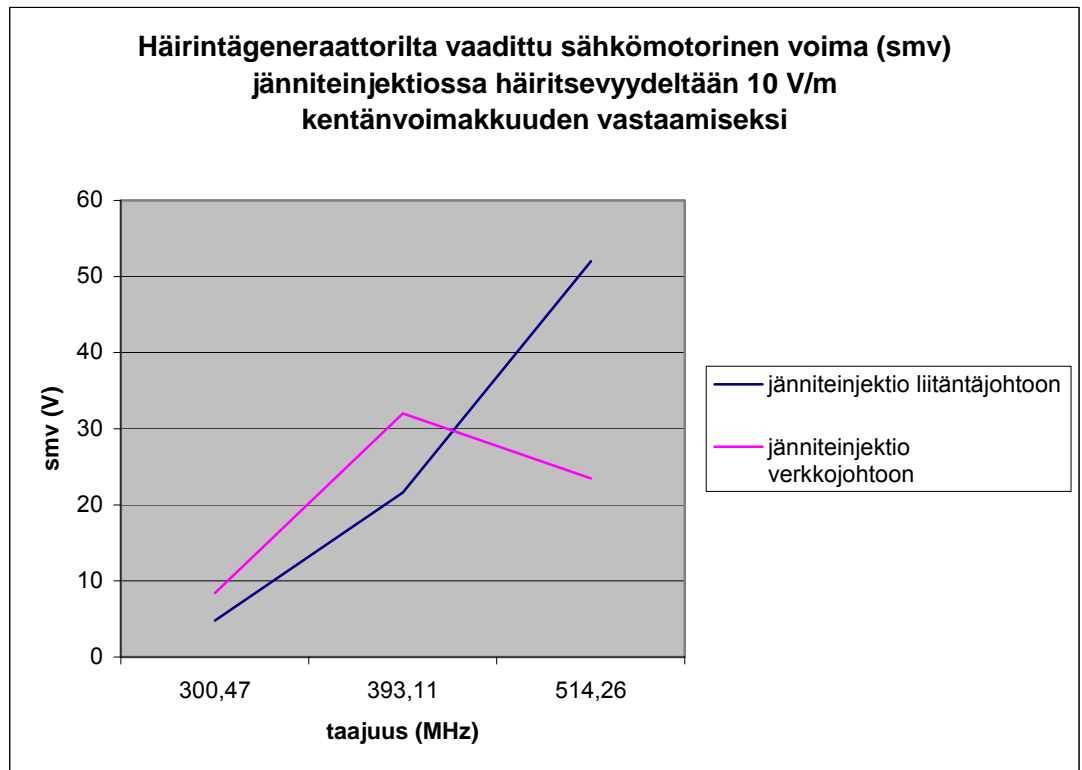
missä U saadaan kaavan (2) avulla. Häiriögeneraattorin smv ei ota kantaa kuormitukseen. Koska injektioiden yhteydessä käytettiin tehovahvistinta, on sen vahvistus lisättävä häirintägeneraattorin etupaneelin dBm-lukuihin. Vahvistukseksi ilmoitetaan 45 dB (ks. liite 7). Lisäys tehdään yhteenlaskulla ja lopullinen dBm-määrä (vahvistimen jälkeen) sijoitetaan kaavaan (2). Näillä tiedoilla voitiin laskea häiritsevyydeltään verrannollinen sähkömotorinen voima ja verrata sitä injektiostandardin vaatimukseen. Tuloksista voitiin laatia yhteenveto (taulukko 2).

Vahvistimen spesifikaatioiden mukaan ehdoton maksimi ulos tulevalle teholle on 40 W (liite 7). Tästä seuraa, että maksimi ulos tuleva jännite on $U_{\max} = \sqrt{(P * Z)} = \sqrt{(40 * 50)} = \sqrt{(2\ 000)} \approx 44,72\text{ V}$ (ks. kaava 2). Edellä todettiin smv:n muodostuvan kaksinkertaisesta jännitteestä (kaava 3). Näin ollen ehdoton maksimi-arvo smv:lle voi olla $2 * 44,72\text{ V} = 89,44\text{ V}$. Tämä seikka on otettu huomioon tuloksissa.

Taulukko 2. Säteilevän häirinnän ja jänniteinjektion vastaavuus

| Piikki no. | f [MHz] | Säteilyn asetettu kentänvoimakkuus [V/m] | Vaikutus (näyttämä ja virhe) | Injektiotaso liitäntäjohtoon ja sitä vastaava smv saman vaikutuksen saamiseksi | Injektiotaso verkkojohtoon ja sitä vastaava smv saman vaikutuksen saamiseksi |
|------------|---------|--|------------------------------|--|--|
| 1 | 300,47 | 10 | 13,7 V (+37%) | 20,60 dBm (4,792 V) | 25,50 dBm (8,424 V) |
| 2 | 393,11 | 10 | 11,9 V (+19%) | 33,69 dBm (21,628 V) | 37,10 dBm (32,026 V) |
| 3 | 514,26 | 10 | 11,8 V (+18%) | 41,31 dBm (52,000 V) | 34,41 dBm (23,498 V) |

Saadut smv:n arvot eivät ylitä em. 89,44 V:n maksimi-arvoa, joten tulokset ovat adekvaatteja. Tulokset syötettiin taulukkolaskentaohjelmaan, joka muodosti seuraavat kuvaajat (kuva 25):

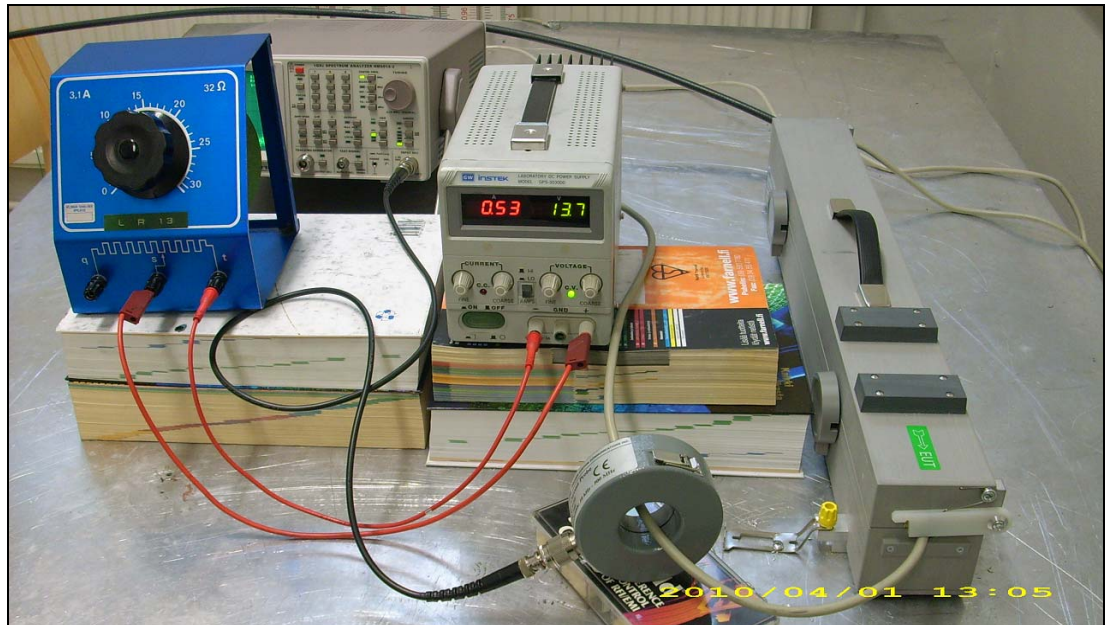


Kuva 25. Jänniteinjektiossa häiritsevyydeltään 10 V/m:n kentänvoimakkuutta vastaava häiriögeneraattorin sähkömotorinen voima (smv) voltteina taajuuden suhteen

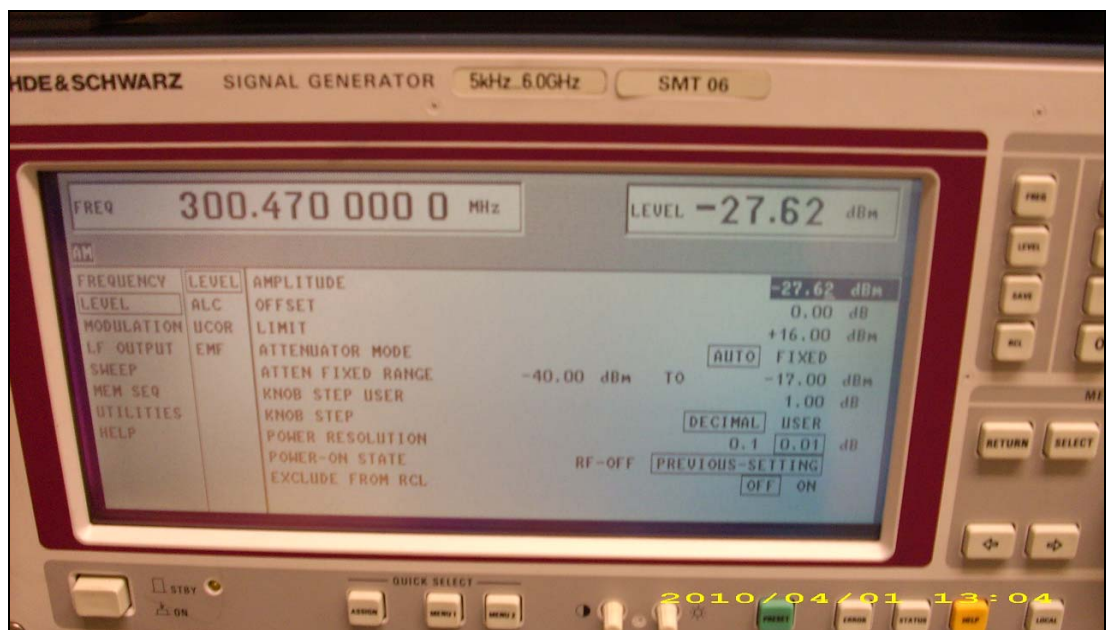
4.3 Virtainjektion tulokset

Virtainjektionkin tapauksessa jouduttiin taajuutta ja häiriösignaalien tasoja säätämään manuaalisesti. Edellä mainitut kolme häiriöpiikkien taajuutta otettiin tarkastelun kohteiksi, samoista syistä kuin edellä. (Ks. 4.2.)

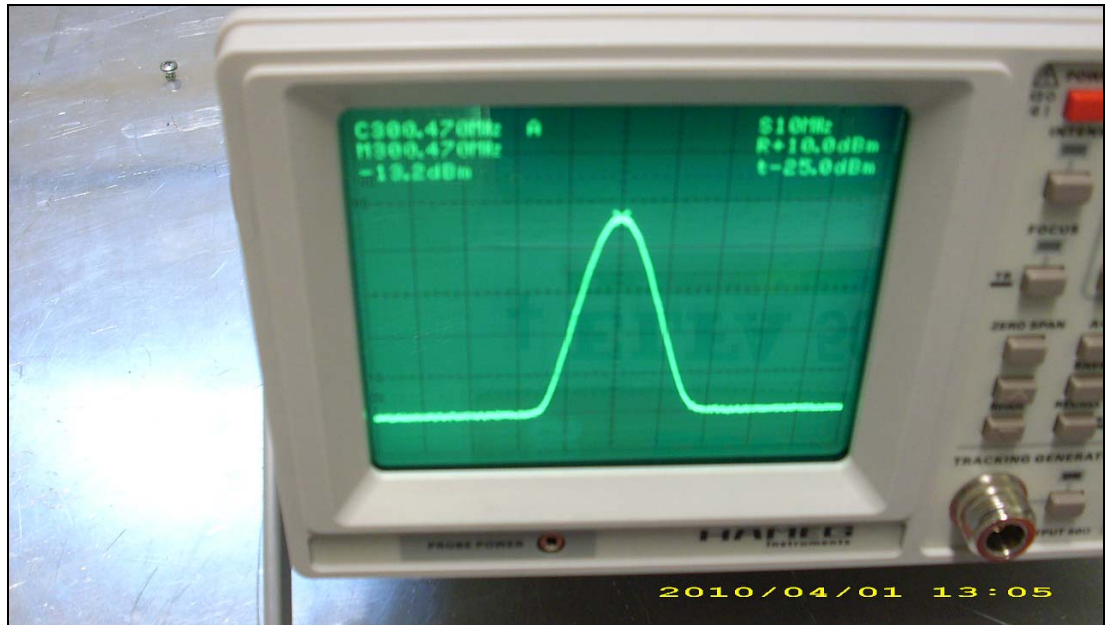
Virtainjektiotapoja on kaksi, injektioiminen liitäntäjohtoihin ja verkkojohtoon. Näistä kahdesta vain verkkojohtoon injektioiminen pystyttiin toteuttamaan (ks. 3.4). Häirintägeneraattorin antotasoa nostamalla etsittiin tilanteet, joissa testattavan laitteen eli jännitelähteen etupaneelin näyttämät vastasivat 10 V/m:n kentänvoimakkuustilanteen vastaavia kyseisillä taajuuksilla. Virtainjektio-testeissä voitiin samalla mitata johtimeen injektioitunutta virtaa mittaussilmukalla (*RF Current Probe*) sekä spektrianalyysaattorilla. Ohessa kuvia kaikista mittausten tuloksista (kuvat 26 - 34).



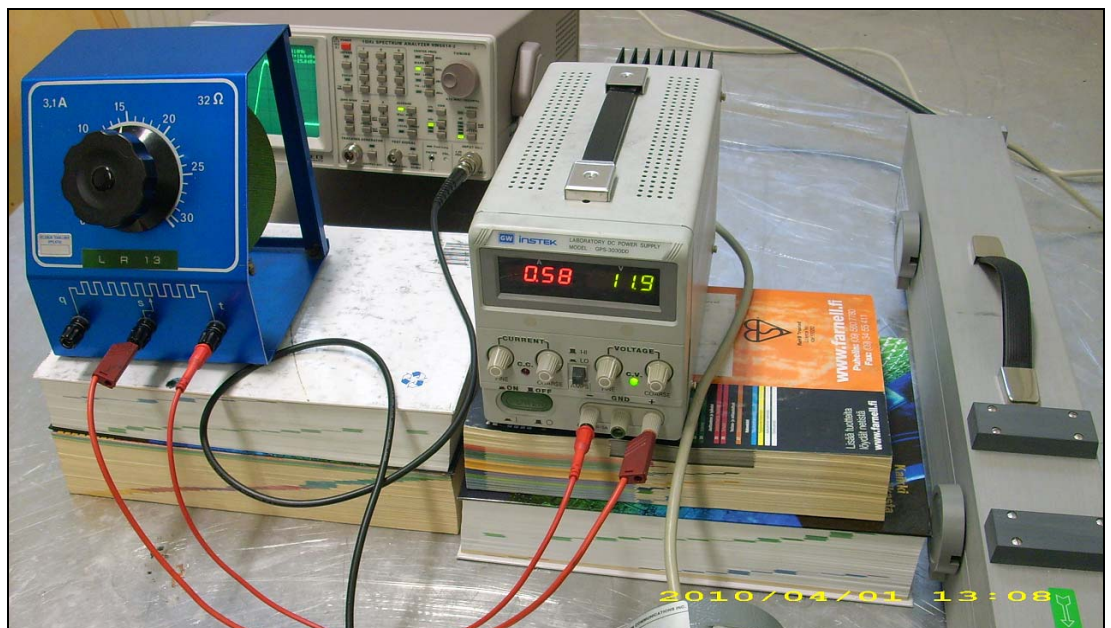
Kuva 26. Virtainjektio verkkojohtoon taajuudella 300,47 MHz ja sen häiritsevyyssaste: 13,7 V jännitelähteen etupaneelissa



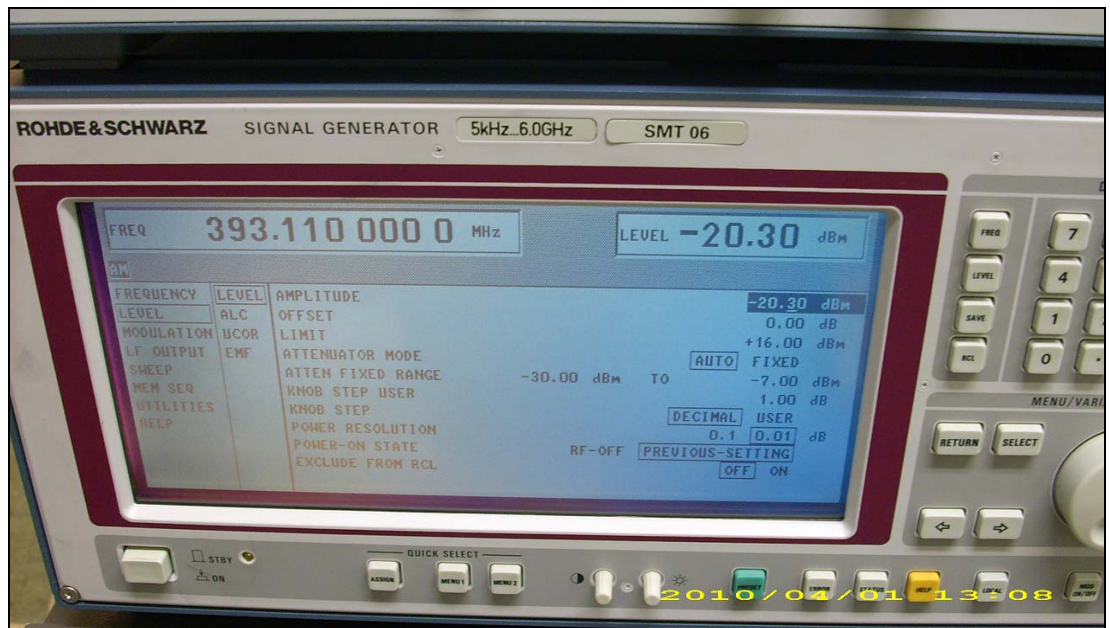
Kuva 27. Virtainjektio verkkojohtoon taajuudella 300,47 MHz: häiritägeneraattorin antotaso -27,62 dBm kuvan 26 esittämässä tilanteessa



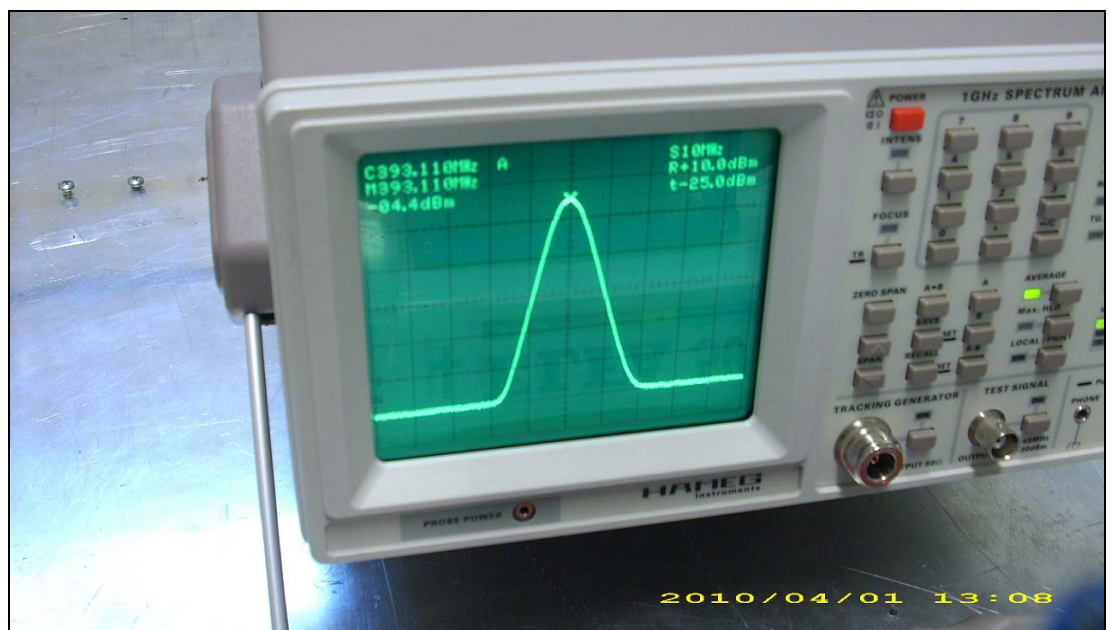
Kuva 28. Virtainjektio verkkojohtoon taajuudella 300,47 MHz: spektrianalysaattorin näyttämä -13,20 dBm kuvien 26 ja 27 esittämässä tilanteessa



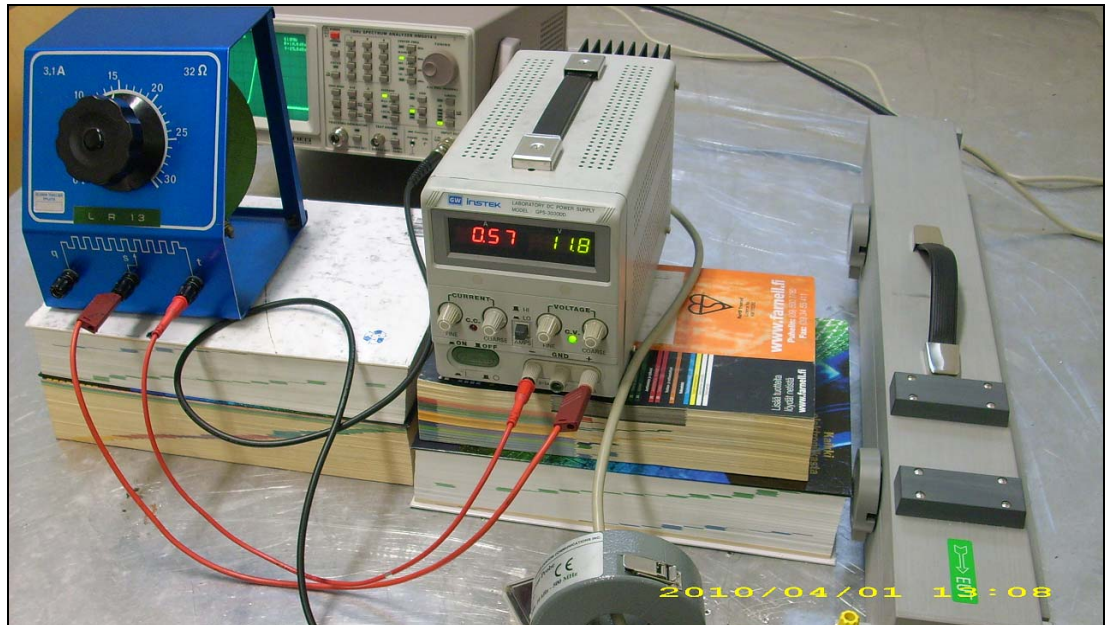
Kuva 29. Virtainjektio verkkojohtoon taajuudella 393,11 MHz ja sen häiritsevyysaste: 11,9 V jännitelähteen etupaneelissa



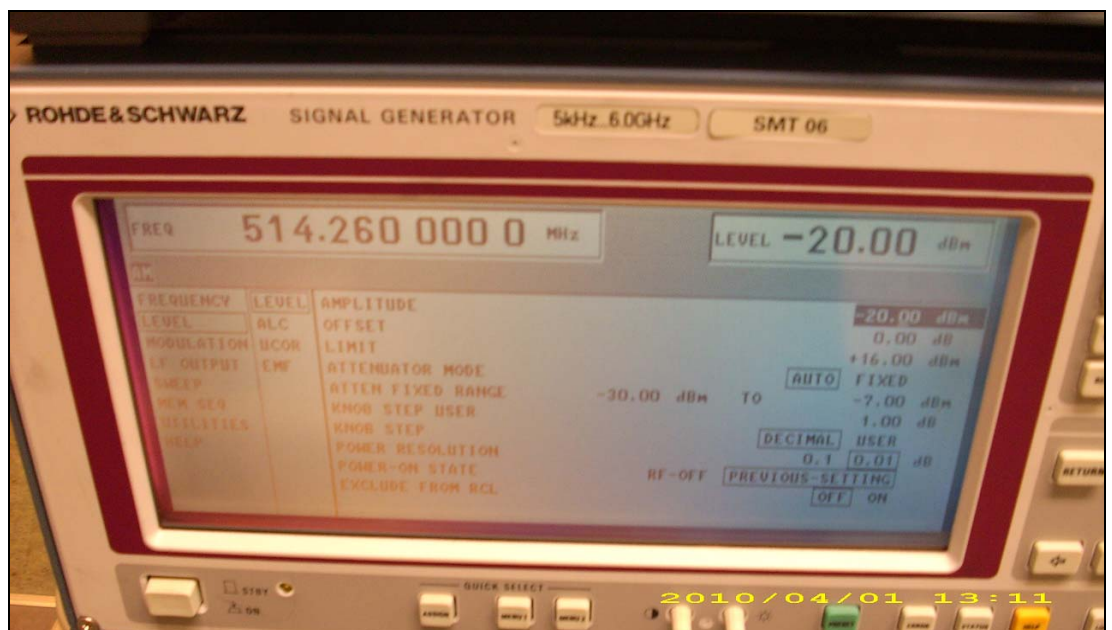
Kuva 30. Virtainjektio verkkojohtoon taajuudella 393,11 MHz: häirintägeneraattorin antotaso -20,30 dBm kuvan 29 esittämässä tilanteessa



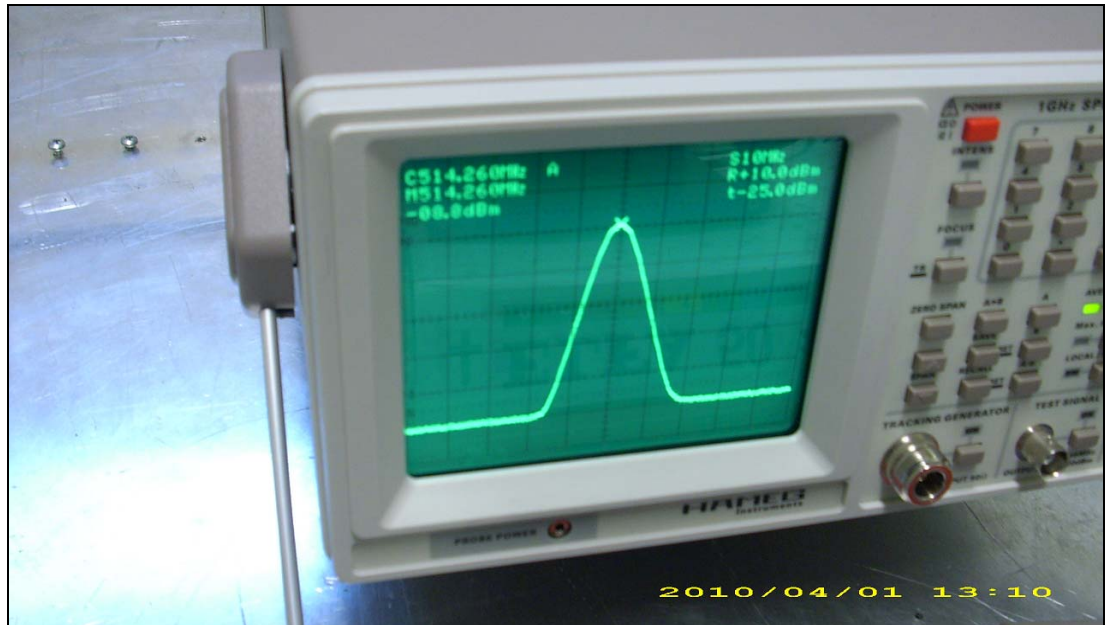
Kuva 31. Virtainjektio verkkojohtoon taajuudella 393,11 MHz: spektrianalysaattorin näyttämä taso -4,40 dBm kuvien 29 ja 30 esittämässä tilanteessa



Kuva 32. Virtainjektio verkkojohtoon taajuudella 514,26 MHz ja sen häiritsevyyssaste: 11,8 V jännitelähteen etupaneelissa



Kuva 33. Virtainjektio verkkojohtoon taajuudella 514,26 MHz: häirintägeneraattorin antotaso -20,00 dBm kuvan 32 esittämässä tilanteessa



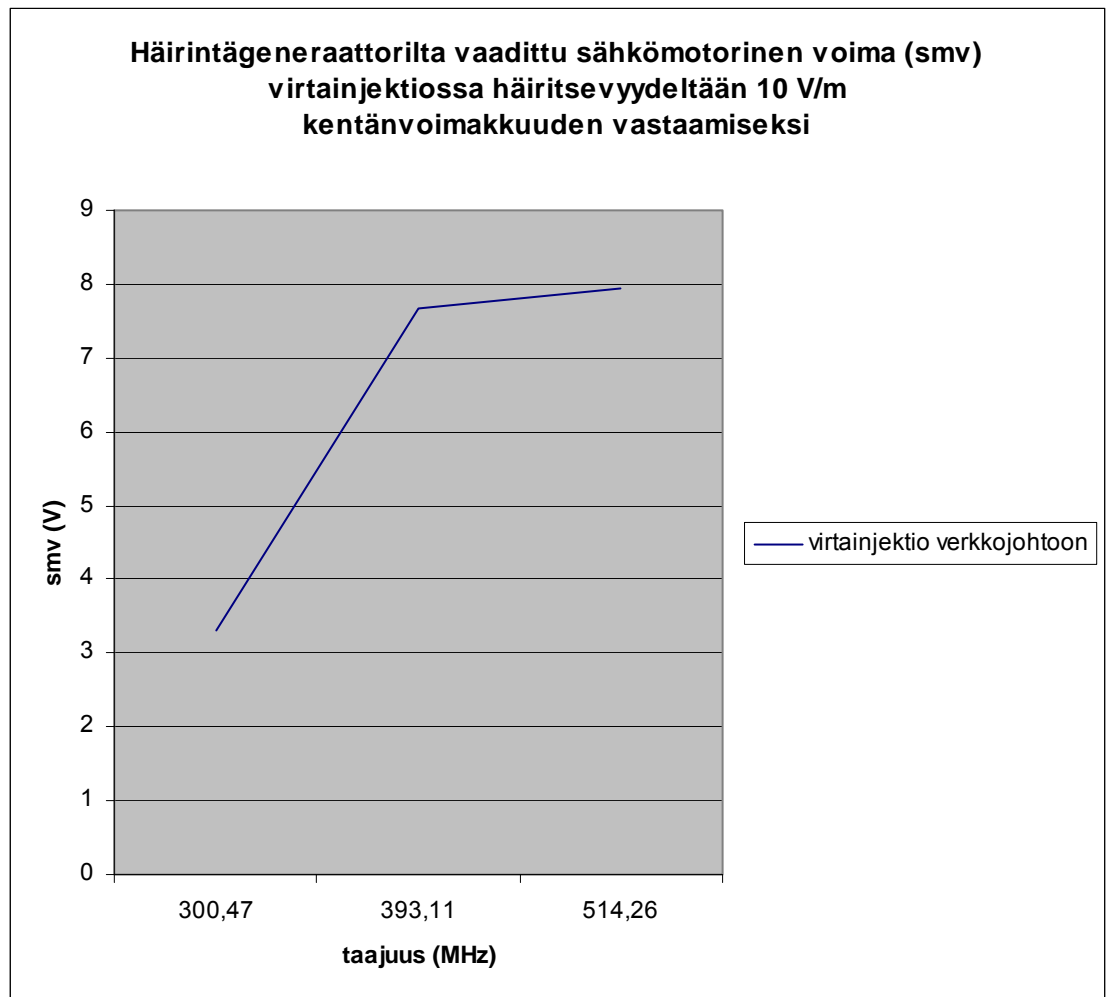
Kuva 34. Virtainjektio verkkojohtoon taajuudella 514,26 MHz: spektrianalysaattorin näyttämä taso -8,80 dBm kuvien 32 ja 33 esittämässä tilanteessa

Verkkojohdon virtainjektioiden mittaustuloksista laadittiin yhteenvedot (taulukko 3). Tulokset voitiin laskea kaavan (2) avulla (ks. 4.2).

Taulukko 3. Säteilevän häirinnän vastaavuus verkkojohdon virtainjektion kanssa

| Piikki no. | f [MHz] | Säteilyn asetettu kentänvoimakkuus [V/m] | Vaikutus (näyttämä ja virhe) | Injektiotaso verkkojohtoon ja sitä vastaava smv saman vaikutuksen saamiseksi |
|------------|---------|--|------------------------------|--|
| 1 | 300,47 | 10 | 13,7 V (+37%) | -27,62 dBm (3,308 V) |
| 2 | 393,11 | 10 | 11,9 V (+19%) | -20,30 dBm (7,683 V) |
| 3 | 514,26 | 10 | 11,8 V (+18%) | -20,00 dBm (7,953 V) |

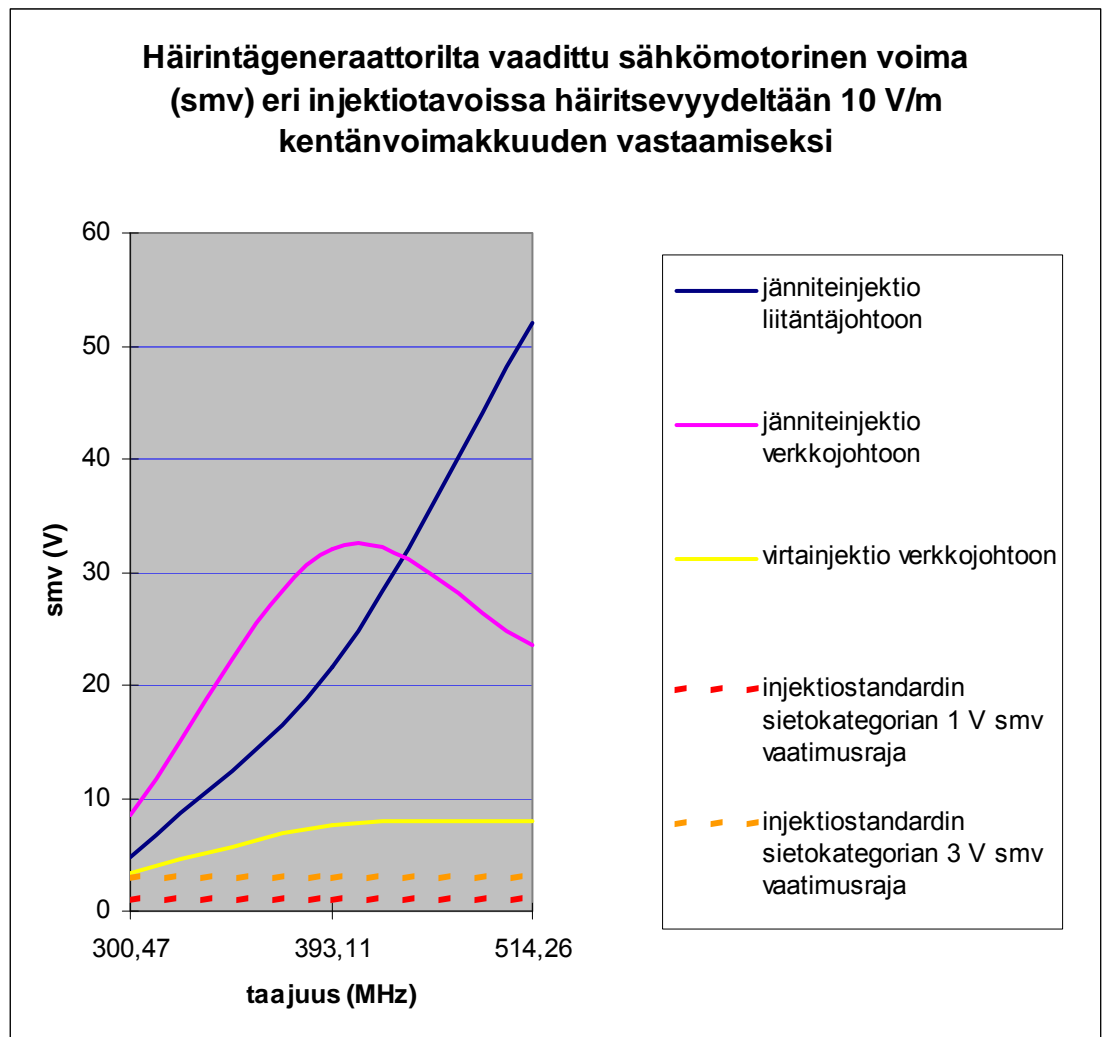
Edellisten tietojen perusteella voitiin taulukkolaskentaohjelmaa käyttäen tehdä kuvaaja. Ohjelma teki seuraavanlaisen kuvaajan (kuva 35):



Kuva 35. Virtainjektiossa verkkojohtoon häiritsevyydeltään 10 V/m:n kentänvoimakkuutta vastaava häiriögeneraattorin sähkömotorinen voima (smv) voltteina taajuuden suhteen

4.4 Injektiotapojen yhdistetyt tulokset

Kaikki saadut tulokset yhdistettiin ja syötettiin taulukkolaskentaohjelmalle. Ohjelmalla piirrettiin kuvaaja, jossa työn kolmen eri injektointitapauksen tasot näkyvät samassa kuvassa. Lisäksi päätettiin (syntyvästä virheestä huolimatta) tulosten havainnollistamiseksi hiukan pyöristää muutoin kulmikkaita kuvaajia (kuva 36).



Kuva 36. Eri injektio tapojen häiritsevyydeltään 10 V/m:n kentänvoimakkuutta vastaava häiriögeneraattorin sähkömotorinen voima (smv) voltteina taajuuden suhteen, tarkemmat arvot on esitelty taulukoissa 2 ja 3. Kuvaajan käyriä on pyöristetty asian havainnollistamiseksi.

5 TÄSSÄ INSINÖÖRITYÖSSÄ KÄYTETYT LAITTEET

Tämän insinööri työn aikana käytettiin koekytkentää, johon liitettyä jännitelähdettä altistettiin säteilevälle ja injektoidulle häiriölle. Kaikki työssä käytetyt laitteet esitellään seuraavassa, koska haluttiin, että mittaukset olisivat tarvittaessa toistettavissa.

- jännitelähde: *GW Instek Laboratory DC Power Supply Model GPS-3030DD*, s/n 8060760 (kuva 37)



Kuva 37. Jännitelähde eli työn testattava laite

- reostaatti: etulevyssä merkinnät 3,1 A ja 32 Ω . Valmistaja ei käy ilmi. Samassa kuvassa reostaatin kanssa on meneillään myös säädön asettelu oikeaan arvoon Fluke 75 III Multimeterillä, s/n 71521126 (kuva 38).

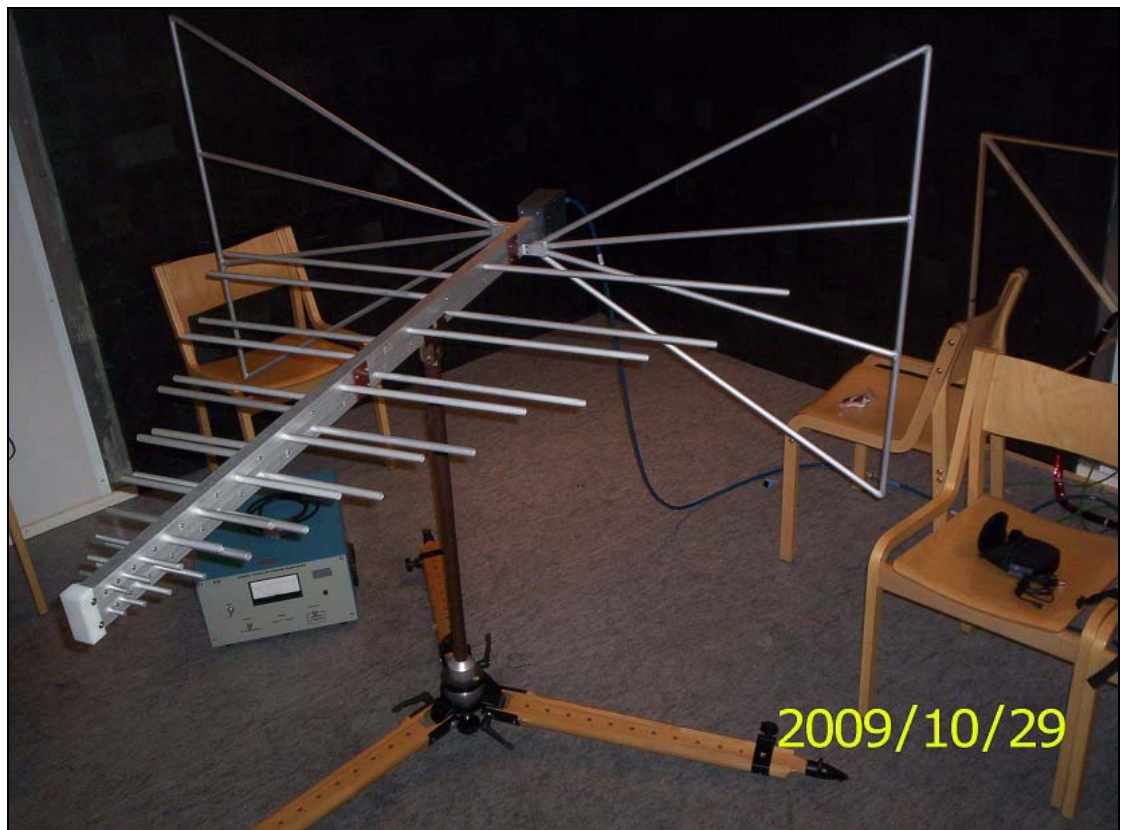


Kuva 38. Säätvastus eli reostaatti, kuvassa myös säädön asettelu kohdalleen Fluke-yleismittarilla

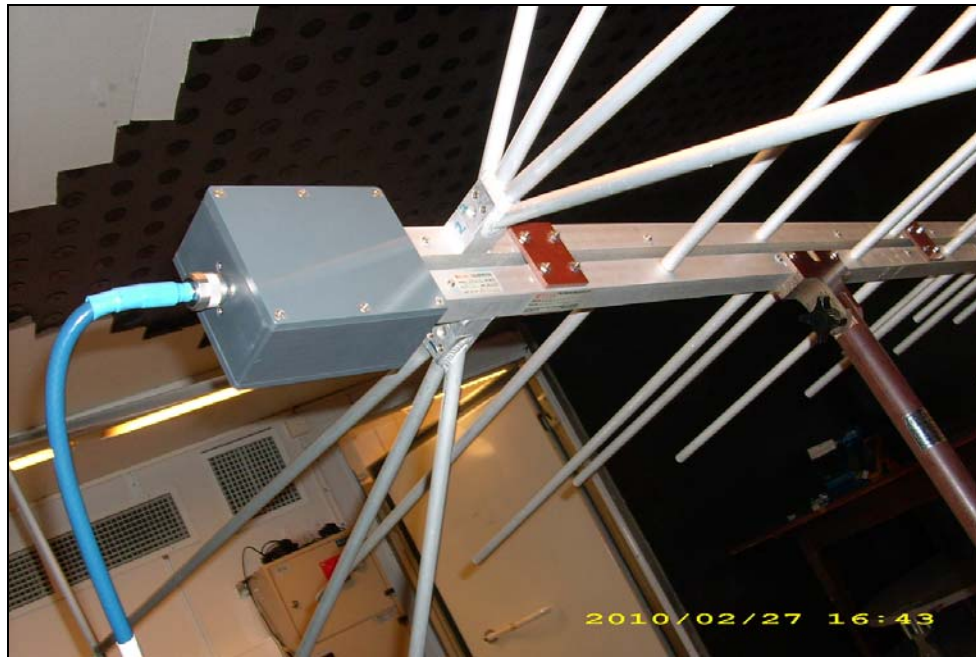
- liitäntäjohtimet: merkinnöin PVC 0,75² – 12 A ja banaaniliittimissä CE-merkinnät. Johtimien valmistaja ei käy ilmi. Liitäntäjohtimissa ferriitit (kuva 48). Valmistaja FerriShield. Tyyppi ei käy ilmi.

Säteilevän häiriön sietotestissä käytettiin seuraavia laitteita:

- häirintäantenni (kuvat 39 ja 40): ns. Bilog-tyyppinen, koostuen 20:sta elementtiparista takaosan heijastimiseen. Valmistaja ja malli: EMCO The Electro-Mechanics Co., model no. 3143, s/n 9504-1119 (tiedot tyyppikilvestä).



Kuva 39. Häirintäantenni häiriösuojatussa huoneessa



Kuva 40. Yksityiskohta häirintäantennista

- antennikaapelit: merkinnöin Suhner Sucoflex ja Sucoflex 104PEA. Käytettyjen kaapelien s/n:t olivat 24838/4PEA, 24839/4PEA ja 24841/4PEA.
- kentänvoimakkuusanturi (kuva 41): *Amplifier Research mod. FP4000 Isotropic Field Probe 10 kHz - 1 000 MHz*, s/n 23960. Anturiin liitettyssä valokuitukaapeliparissa näkyivät merkinnät Spectral Specialty Optics Co. Avon, CT ja Fiber Optic Cable Lot No. 21787.



Kuva 41. Kentänvoimakkuusanturi

- keinoverkko eli LISN (kuva 42): Rohde&Schwarz ESH 3-Z5 Two-Line V-Network (Zweileiter-V-Netz nachbildung), s/n 826789/005



Kuva 42. Testissä käytetty keinoverkko (LISN)

- tarkkailukamera (kuva 43): Ikegami CCD Color Camera, mod. ICD-803P, s/n 1C03442. Ikegami Tsushniki Co., Ltd Japan. Kamerassa kiinni linssi Cosmical/Pentax TV Zoom Lens H15ZME-1, s/n 38500, jossa merkinnät 8 - 120 mm, 1:16 ja Asahi Precision Co., Ltd Japan (tiedot tyyppikilvistä).



Kuva 43. Tarkkailukamera häiriösuojatussa huoneessa testin aikana

Säteilevän häiriön sietotestin aikana huoneen ulkopuolella käytettiin seuraavia laitteita:

- normaali PC-tietokone, jossa käytössä Sietotesti.exe -niminen LabVIEW-pohjainen ohjelma. Pääohjelma edellisessä oli Sietotesti.vi (koko 484 kt) + lukuisia aliohjelmiä.
- Optiikkamuunnin (kuva 44): Muunnin, joka muuntaa kentänvoimakkuusanturin valokuidun informaation jännitetasoksi tietokoneelle. Valmistaja ja malli oli *Amplifier Research model IF4000A Fiber Optic Modem Interface*, s/n 23806.



Kuva 44. Optiikkamuunnin: muunnin, joka muuntaa valokuituinformaation tietokoneen ymmärtämiksi jännitetasojen vaihteluiksi eli biteiksi.

Jänniteinjektiossa käytettiin seuraavia laitteita:

- jänniteinjektio liitäntäjohtoon: koekytkenässä (kuva 12) laitteiden välillä kytkentäelin *CDN L-801 M1* (kuva 45), jossa yksittäinen banaaniliitin sisäänmeno ja ulostuloa varten



Kuva 45. KytKentäelin CDN L-801 M1

- jänniteinjektio verkkojohtoon: koekytKentä (kuva 13), jossa verkon ja testattavan laitteen välillä kytKentäelin CDN L-801 M2/M3 (kuva 46), s/n 2272, 230 V syöttö sisään ja ulos (jännite ulos testattavalle laitteelle banaaniliittimin). Tyypikilpeen oli painettu tiedot HF-Input 0,15...230 MHz, HF-Power-Dissipation 6 W max. (100 ohm).



Kuva 46. CDN L-801 M2/M3-kytKentäelimiä

Molemmissa kytkentäelimissä oli merkintä Coupling-Decoupling-Network 801-6 IEC 61000-4-6. Molempien valmistaja on Lüthi Elektronik-Feinmechanik AG.

Virtainjektiossa liitäntäjohtoihin voidaan käyttää virtamuuntajaa *Bulk Current Injection Probe*. Käytettävissä ollut yksilö oli P/N F-120-9A, tyyppikilpeen oli painettu tiedot s/n 485, max. CW Input: 100 Watts (30 min), bandwidth 10 kHz - 230 MHz (kuva 47). Tämä osoittaa, ettei virtamuuntaja soveltunut korkeammille taajuuksille (ks. liite 4).



Kuva 47. Virtamuuntajat, vasemmalla Bulk Current Injection Probe ja oikealla RF Current Probe. Molempien valmistaja on Fischer Custom Communications Inc.

Virtainjektiossa verkkojohtoon käytettiin seuraavia laitteita: injektointilaite *Electromagnetic Injection Clamp type EM 101* (s/n 35814), freq. range 0,15... 1 000 MHz (tiedot tyyppikilvestä). RF-häiriö syötettiin sisään N-liittimestä ja kannessa oli nuoli EUT:n suuntaan (kuvat 48 ja 49).



Kuva 48. Virtainjektointilaite Electromagnetic Injection Clamp type EM 101 (ylempi laite)



Kuva 49. Virtainjektointilaite EM 101 avattuna johtimen asettelemiseksi paikalleen
Virtainjektiotapauksissa mittaussilmukkaan (RF Current Probe) indusoituvaa jännitettä mitattiin Hameg-spektrianalysaattorilla, malli HM 5014-2 (kuva 50).



Kuva 50. Spektrianalysaattori Hameg HM 5014-2

Virtainjektiotapauksessa käytettiin seuraavaa mittaavaa virtamuuntajaa (tiedot tyyppikilvestä): *RF Current Probe P/N F-52*, s/n 310, bandwidth 10 kHz - 500 MHz (kuva 47).

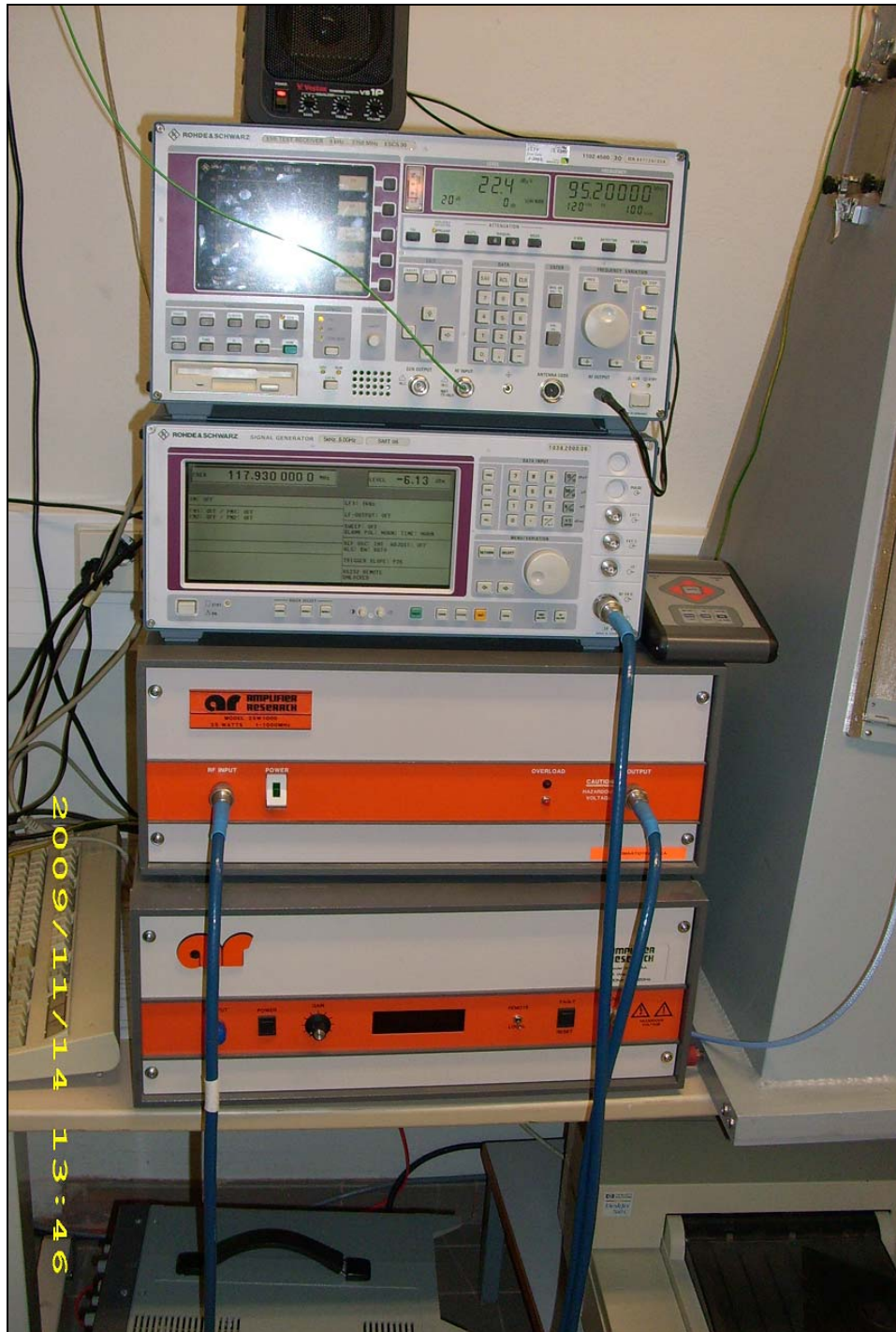
Häirintätavasta riippumatta koko työn ajan käytettiin seuraavia laitteita:

- häirintägeneraattori (kuva 51): signaaligeneraattori *Rohde&Schwarz Signal Generator 5 kHz...6,0 GHz SMT 06*, s/n 83397/002



Kuva 51. Häirintägeneraattori koko työn ajan, signaaligeneraattori Rohde&Schwarz Signal Generator 5 kHz...6,0 GHz SMT 06, s/n 83397/002

- tehovahvistin häiriögeneraattorin yhteydessä (kuva 52): *Amplifier Research model 25W1000, 25 W, 1 - 1 000 MHz, s/n 15887*



Kuva 52. Häirintäsignaalin generoiva laitteisto tässä työssä. Ylempi kuvan punaraitaisista laitteista on työssä käytetty tehovahvistin Amplifier Research model 25W1000, 25 W, 1 - 1 000 MHz, s/n 15887 ja sen yläpuolella tämän työn aikana käytetty häirintägeneraattori, signaaligeneraattori Rohde&Schwarz Signal Generator 5 kHz...6,0 GHz SMT 06, s/n 83397/002.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTAA

Kaikilla injektiotavoilla vaadittiin häirintägeneraattorilta yli 3 V sähkömotorista voimaa, jotta testattava laite olisi häiriintynyt yhtä paljon kuin säteilyn kentänvoimakkuudella 10 V/m. Näin ollen voidaan päätellä, että mittaukset kattavat 1 V:n ja 3 V:n smv:n sietokategoriat.

Koska lähtökohtina pidettiin immuniteettistandardin mukaisen säteilytystestauksen piikkejä ja niiden mukaisen häiriintyvyyden vastaavuuksia injektioiteissa, voidaan tuloksista todeta seuraavaa:

Taajuudella 300,47 MHz oli voimassa seuraava vastaavuus:

säteilyn kentänvoimakkuus 10 V/m \approx

4,792 V (smv) jänniteinjektio liitäntäjohtoon \approx

8,424 V (smv) jänniteinjektio verkkojohtoon \approx

3,308 V (smv) virtainjektio verkkojohtoon

Taajuudella 393,11 MHz oli voimassa seuraava vastaavuus:

säteilyn kentänvoimakkuus 10 V/m \approx

21,628 V (smv) jänniteinjektio liitäntäjohtoon \approx

32,026 V (smv) jänniteinjektio verkkojohtoon \approx

7,683 V (smv) virtainjektio verkkojohtoon

Taajuudella 514,26 MHz oli voimassa seuraava vastaavuus:

säteilyn kentänvoimakkuus 10 V/m \approx

52,000 V (smv) jänniteinjektio liitäntäjohtoon \approx

23,498 V (smv) jänniteinjektio verkkojohtoon \approx

7,953 V (smv) virtainjektio verkkojohtoon

Työn testattavan laitteen kannalta voidaan säteilevän häiriön immuniteettitestin (kentänvoimakkuudella 10 V/m) häiriövaikutukset saada aikaan injektioiteilla em. sähkömotorisen voiman arvoilla.

Injektiostandardien sietokategoriat sähkömotorisille voimille edellyttävät testattavalta laitteelta täysin virheetöntä toimintaa kategorian raja-arvoon saakka. Tämän työn testattava laite osoitti joitain vääristymiä etupaneelin volttimittarissaan häiriötasoa nostettaessa jo ennen raja-arvojen saavuttamista, joten em. vaatimus ei täyty sellaisenaan.

Tuloksista voidaan havaita, että injektioilla toteutetuilla häiriöillä on yhteistä taason (häiriösignaalin sähkömotorisen voiman) nousuvaatimus vastaavan vaikutuksen saamiseksi taajuuden noustessa verrattuna säteilevän häirinnän vaikutukseen. Kääntäen ajatellen tämä on hyvä asia: tulosten perusteella vakiosuuriset häiriöjännitteet haittaavat vähemmän korkeammilla taajuuksilla. Koekytkenässä häiriintyvän johdinpiirin impedanssi nousee taajuuden noustessa, mikä aiheuttaa sen, että piirissä kulkeva häiritsevä virta pienenee.

Häiriintyvä johdin ei (häirintätavasta riippumatta) ota kantaa itse häiriötapaan, vaan ainoastaan altistuu ja johtaa jännitteen eteenpäin. Eroavuuksia voi kuitenkin syntyä ainakin virtainjektion häviöllisyydestä johtuen, mutta jänniteinjektiossa puolestaan saattaa esiintyä resistansseista ja impedansseista johtuvia paikallisia eroja. Häiriintymiseen vaikuttavat lopulta testattavan laitteen ja koekytkenän resonanssikohdat.

Periaatteellinen ero säteilevän ja injektoidun häiriön välillä on seuraava: säteilevän häiriön sietotestissä koko kytkentä altistuu (siis *sekä* testattava laitteisto virtapiireineen *että* johtimet), kun injektointitapauksessa altistetaan ainoastaan laitteiden ulkopuolisia johtimia, siis periaatteessa ilman kokonaisvaltaisen kentän vaikutuksia. Tämän lähtökohtaisen eron vaikutus on mitä ilmeisimmin laitekohtainen.

Työssä esitetty korrelaatio pätee tarkalleen ainoastaan kyseessä olevalle laitteelle sen yksilöllisen teknisen toteutustapansa takia. Säteilevän häirinnän tapauksessa tuloksiin vaikuttavat juuri kyseiselle laitteelle ominaiset

virtasilmukat. Sarjatuotannon laitteet pyritään pitämään tasalaatuisina, mitä vaaditaan hyväksyttäviltä laitteilta. Toleransseista ja muista muuttujista johtuen kukin laite on kuitenkin yksilö, enemmän tai vähemmän jopa saman mallisarjan sisällä.

Työssä käytettyjen laitteiden täsmällinen käyttäytyminen kalibroidun taajuusalueensa ulkopuolella on epävarmaa. Säteilevän häiriön häiritsevyyspiikit olivat tutkimuksen vertailukohtina ja piikit asettuivat yleisesti juuri ylemmille taajuuksille. Työssä esitetty korrelaatio voidaan hyväksyä, jos hyväksytään toiminta IEC 61000-4-6 -testausstandardin taajuusalueen ulkopuolella.

Työtä koskevien standardien noudattamisessa havaittiin joitain ongelmia. Työn kannalta oleelliset standardit eivät esimerkkikuvineen täysin kata juuri tämän työn kaltaista tilannetta. Säteilevän häiriötestin yhteydessä vaadituista ferriiteistä ei esitetä täsmällisiä vaatimuksia. Jänniteinjektiossa huomiota kiinnitettiin kytkentäelimen kunnolliseen maadoitukseen, mistä injektiostandardi ei esitä siitäkään yksikäsitteisiä vaatimuksia. Sama standardi ei myöskään kerro mitään aukotonta siitä, miten käyttö sähkö on tuotava testattavalle laitteelle, millä seikalla olisi merkitystä koekytken johdinsiirrin induktanssin kannalta.

Edellä esitetyt seikat huomioiden antavat tulokset kuitenkin käsityksen vallitsevasta korrelaatiosta ainakin tämän työn testattavan laitteen osalta. Työssä edellä mainittu teoria ja periaatteet ovat universaaleja ja testeihin liittyviä standardeja noudatettiin niin tarkoin kuin oli tässä työssä mahdollista.

LÄHTEET

/1/ [*Kaukokenttä*, verkkodokumentti hakusanalla, viitattu 17.3.2010]. Saatavissa: <http://www.ee.oulu.fi/~jari/EMCST/LH2-lisamateriaali.pdf>.

/2/ [*SI-opas*, Suomen Standardoimisliitto, verkkodokumentti, viitattu 3.12.2009]. Saatavissa: <http://www.sfs.fi/standard/si-opas.pdf>.

/3/ [*Immunity requirements related to design choices*, Tim Williams verkkodokumentti, viitattu 14.10.2009]. Saatavissa: <http://www.compliance-club.com/pdf/Issue84.PDF>.

/4/ Williams, Tim, *EMC for Product Designers, Meeting the European EMC Directive*. 2nd edition. Oxford, Englanti: Newnes, Reed International and Professional Publishing Ltd. 1996.

/5/ Williams, Tim, *EMC for Product Designers, Meeting the European EMC Directive*. 4th edition. Oxford, Englanti: Newnes, Reed International and Professional Publishing Ltd. 2007.

/6/ *European standard EN50082-2*, March 1995. Electromagnetic compatibility, Generic immunity standard, Part 2: Industrial environment. CENELEC.

/7/ Tuominen, Teemu, 2005. *Sähkömagneettisen kentän siedon mittaaminen automaattisesti LabVIEW:n ohjaamana*. Helsingin ammattikorkeakoulu Stadia. Insinööriyö. Viitattu 10.2.2010.

LIITTEET

Liite 1 Testaustandardin mukaisen säteilevän häiriön immunitteettitestauksen mittausautomaation tuottama tekstipohjainen tulostus alkuperäisine arvoineen (5 sivua). Sarakkeissa vasemmalta oikealle: kyseinen taajuus, säädetty tehoasetus, kentänvoimakkuus ja äärimmäisenä oikealla taajuutta vastaava tunnistusarvo

Liite 2 KytKentäelin CDN L-801 M1:n periaatteellinen kytkentäkaavio, noudettu 10.12.2009 osoitteesta <http://www.schwarzbeck.de/Datenblatt/k801m1.pdf>

Liite 3 KytKentäelin CDN L-801 M2/M3:n periaatteellinen kytkentäkaavio ja ominaiskäyrät datalehdessä (2 sivua), noudettu 25.03.2010 osoitteesta <http://www.schwarzbeck.de/Datenblatt/k801m2m3.pdf>

Liite 4 Virtainjektiossa häiriötä syöttävän silmukan (*Bulk Current Injection Probe*) häviökäyrät 100 Ω :n ja 300 Ω :n impedansseilla (2 sivua)

Liite 5 Virtainjektointilaite EM 101:n (*Electro-Magnetic Injection Clamp EM 101*) spesifikaatiot (2 sivua)

Liite 6 Virtainjektiota mittaavan silmukan (*RF Current Probe/VHF/UHF Current Probe*) ominaiskäyrä

Liite 7 Työn testauksissa käytetyn Amplifier Research -tehovahvistimen spesifikaatiot (valmistajan esite)

| | | | |
|--------|-------|-------|-----|
| 80.00 | -5.00 | 01.06 | 099 |
| 80.80 | -5.00 | 00.96 | 099 |
| 81.61 | -5.00 | 01.08 | 098 |
| 82.42 | -5.00 | 01.11 | 098 |
| 83.25 | -5.00 | 00.97 | 099 |
| 84.08 | -5.00 | 01.03 | 099 |
| 84.92 | -5.00 | 01.09 | 098 |
| 85.77 | -5.00 | 01.18 | 098 |
| 86.63 | -5.00 | 01.21 | 098 |
| 87.49 | -5.00 | 01.27 | 099 |
| 88.37 | -5.00 | 01.36 | 099 |
| 89.25 | -5.00 | 01.37 | 099 |
| 90.15 | -5.00 | 01.27 | 098 |
| 91.05 | -5.00 | 01.31 | 098 |
| 91.96 | -5.00 | 01.40 | 098 |
| 92.88 | -5.00 | 01.49 | 098 |
| 93.81 | -5.00 | 01.47 | 098 |
| 94.74 | -5.00 | 01.41 | 099 |
| 95.69 | -5.00 | 01.41 | 099 |
| 96.65 | -5.00 | 01.51 | 099 |
| 97.62 | -5.00 | 01.59 | 098 |
| 98.59 | -5.00 | 01.79 | 098 |
| 99.58 | -5.00 | 01.99 | 098 |
| 100.57 | 0.000 | 03.16 | 099 |
| 101.58 | 0.000 | 03.22 | 098 |
| 102.59 | 0.000 | 03.20 | 098 |
| 103.62 | 0.000 | 03.18 | 099 |
| 104.66 | 0.000 | 03.21 | 098 |
| 105.70 | 0.000 | 03.27 | 098 |
| 106.76 | 0.000 | 03.39 | 098 |
| 107.83 | 0.000 | 03.61 | 099 |
| 108.91 | 0.000 | 03.60 | 099 |
| 110.00 | 0.000 | 03.65 | 099 |
| 111.10 | 0.000 | 03.91 | 099 |
| 112.21 | 0.000 | 03.93 | 099 |
| 113.33 | 0.000 | 04.24 | 098 |
| 114.46 | 0.000 | 03.95 | 099 |
| 115.61 | 0.000 | 03.66 | 098 |
| 116.76 | 0.000 | 03.67 | 099 |
| 117.93 | 0.000 | 03.93 | 098 |
| 119.11 | 0.000 | 03.73 | 099 |
| 120.30 | 0.000 | 03.49 | 093 |
| 121.50 | 0.000 | 03.68 | 099 |
| 122.72 | 0.000 | 03.97 | 099 |
| 123.95 | 0.000 | 04.24 | 098 |
| 125.18 | 0.000 | 04.54 | 099 |
| 126.44 | 0.000 | 05.00 | 099 |
| 127.70 | 0.000 | 05.66 | 099 |
| 128.98 | 0.000 | 06.29 | 098 |
| 130.27 | 0.000 | 06.37 | 100 |
| 131.57 | 0.000 | 06.04 | 100 |
| 132.89 | 0.000 | 05.60 | 100 |
| 134.22 | 0.000 | 04.92 | 099 |
| 135.56 | 0.000 | 04.41 | 099 |
| 136.91 | 0.000 | 05.02 | 099 |

| | | | |
|--------|-------|-------|-----|
| 138.28 | 0.000 | 04.78 | 099 |
| 139.66 | 0.000 | 04.21 | 099 |
| 141.06 | 0.000 | 03.90 | 099 |
| 142.47 | 0.000 | 03.66 | 099 |
| 143.90 | 0.000 | 03.58 | 099 |
| 145.34 | 0.000 | 04.01 | 099 |
| 146.79 | 0.000 | 05.63 | 099 |
| 148.26 | 0.000 | 07.60 | 099 |
| 149.74 | 0.000 | 07.32 | 099 |
| 151.24 | 0.000 | 06.12 | 099 |
| 152.75 | 0.000 | 05.04 | 099 |
| 154.28 | 0.000 | 04.71 | 099 |
| 155.82 | 0.000 | 04.91 | 099 |
| 157.38 | 0.000 | 05.20 | 099 |
| 158.95 | 0.000 | 04.75 | 099 |
| 160.54 | 0.000 | 04.18 | 099 |
| 162.15 | 0.000 | 03.88 | 099 |
| 163.77 | 0.000 | 04.09 | 099 |
| 165.41 | 0.000 | 04.61 | 099 |
| 167.06 | 0.000 | 05.56 | 099 |
| 168.73 | 0.000 | 05.88 | 099 |
| 170.42 | 0.000 | 05.91 | 100 |
| 172.12 | 0.000 | 06.00 | 102 |
| 173.84 | 0.000 | 05.96 | 102 |
| 175.58 | 0.000 | 05.84 | 101 |
| 177.34 | 0.000 | 05.34 | 100 |
| 179.11 | 0.000 | 05.77 | 100 |
| 180.90 | 0.000 | 05.66 | 100 |
| 182.71 | 0.000 | 05.58 | 100 |
| 184.54 | 0.000 | 05.94 | 099 |
| 186.38 | 0.000 | 06.62 | 099 |
| 188.25 | 0.000 | 07.50 | 099 |
| 190.13 | 0.000 | 07.79 | 099 |
| 192.03 | 0.000 | 06.78 | 099 |
| 193.95 | 0.000 | 06.08 | 099 |
| 195.89 | 0.000 | 05.80 | 099 |
| 197.85 | 0.000 | 05.65 | 099 |
| 199.83 | 0.000 | 05.96 | 099 |
| 201.83 | 0.000 | 06.45 | 100 |
| 203.84 | 0.000 | 06.45 | 100 |
| 205.88 | 0.000 | 06.25 | 101 |
| 207.94 | 0.000 | 05.96 | 102 |
| 210.02 | 0.000 | 05.19 | 103 |
| 212.12 | 0.000 | 04.31 | 103 |
| 214.24 | 0.000 | 04.03 | 102 |
| 216.39 | 0.000 | 04.84 | 101 |
| 218.55 | 0.000 | 05.41 | 102 |
| 220.73 | 0.000 | 05.26 | 102 |
| 222.94 | 0.000 | 06.61 | 104 |
| 225.17 | 0.000 | 07.68 | 104 |
| 227.42 | 0.000 | 06.91 | 102 |
| 229.70 | 0.000 | 06.07 | 100 |
| 231.99 | 0.000 | 05.65 | 099 |
| 234.31 | 0.000 | 05.55 | 099 |
| 236.66 | 0.000 | 06.09 | 100 |

| | | | |
|--------|-------|-------|-----|
| 239.02 | 0.000 | 06.04 | 102 |
| 241.41 | 0.000 | 06.27 | 102 |
| 243.83 | 0.000 | 07.24 | 102 |
| 246.27 | 0.000 | 07.61 | 100 |
| 248.73 | 0.000 | 06.27 | 099 |
| 251.22 | 0.000 | 06.03 | 099 |
| 253.73 | 0.000 | 06.46 | 099 |
| 256.27 | 0.000 | 07.48 | 099 |
| 258.83 | 0.000 | 08.25 | 098 |
| 261.42 | 0.000 | 09.99 | 099 |
| 264.03 | 0.000 | 09.68 | 100 |
| 266.67 | 0.000 | 08.32 | 101 |
| 269.34 | 0.000 | 07.87 | 101 |
| 272.03 | 0.000 | 08.23 | 101 |
| 274.75 | 0.000 | 09.35 | 102 |
| 277.50 | -1.29 | 09.99 | 104 |
| 280.27 | -3.14 | 10.00 | 105 |
| 283.08 | -2.69 | 10.00 | 106 |
| 285.91 | -0.47 | 10.01 | 105 |
| 288.77 | 0.000 | 09.48 | 108 |
| 291.65 | 0.000 | 08.19 | 112 |
| 294.57 | 0.000 | 07.81 | 115 |
| 297.52 | 0.000 | 09.10 | 127 |
| 300.49 | -3.41 | 09.99 | 137 |
| 303.50 | -2.78 | 10.00 | 134 |
| 306.53 | 0.000 | 09.64 | 117 |
| 309.60 | -0.52 | 10.01 | 125 |
| 312.69 | -3.12 | 09.99 | 117 |
| 315.82 | -5.28 | 09.99 | 112 |
| 318.98 | -5.31 | 10.01 | 110 |
| 322.17 | -0.93 | 09.99 | 122 |
| 325.39 | 0.000 | 08.78 | 122 |
| 328.64 | 0.000 | 09.84 | 118 |
| 331.93 | -0.70 | 10.00 | 112 |
| 335.25 | -0.89 | 10.01 | 106 |
| 338.60 | -2.37 | 10.07 | 102 |
| 341.99 | -4.35 | 10.02 | 101 |
| 345.41 | -0.24 | 09.82 | 101 |
| 348.86 | -2.21 | 10.07 | 101 |
| 352.35 | -4.81 | 09.98 | 101 |
| 355.87 | -6.14 | 09.99 | 102 |
| 359.43 | -1.53 | 10.05 | 101 |
| 363.03 | 0.000 | 08.06 | 100 |
| 366.66 | 0.000 | 09.61 | 100 |
| 370.32 | -3.63 | 10.01 | 100 |
| 374.03 | -5.10 | 09.98 | 099 |
| 377.77 | -4.61 | 10.01 | 099 |
| 381.54 | -3.70 | 10.01 | 100 |
| 385.36 | -5.32 | 09.98 | 104 |
| 389.21 | -7.65 | 09.99 | 108 |
| 393.11 | -7.42 | 10.01 | 119 |
| 397.04 | -5.12 | 10.03 | 115 |
| 401.01 | -2.68 | 10.03 | 114 |
| 405.02 | -2.44 | 09.99 | 108 |
| 409.07 | -7.18 | 09.98 | 106 |

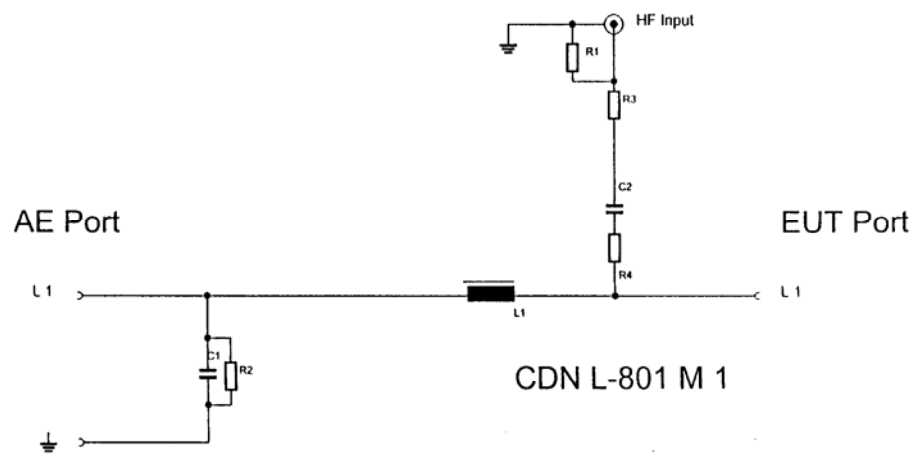
| | | | |
|--------|-------|-------|-----|
| 413.16 | -8.30 | 09.98 | 103 |
| 417.29 | -4.97 | 10.00 | 102 |
| 421.46 | -4.83 | 10.00 | 104 |
| 425.68 | -6.81 | 09.99 | 103 |
| 429.93 | -8.33 | 09.99 | 101 |
| 434.23 | -6.33 | 10.02 | 100 |
| 438.58 | -3.69 | 10.01 | 099 |
| 442.96 | -5.09 | 09.99 | 099 |
| 447.39 | -6.89 | 09.99 | 099 |
| 451.87 | -6.26 | 10.00 | 100 |
| 456.38 | -4.04 | 10.02 | 101 |
| 460.95 | -0.80 | 10.02 | 101 |
| 465.56 | -1.93 | 10.00 | 101 |
| 470.21 | -4.62 | 09.98 | 099 |
| 474.92 | -4.02 | 10.01 | 099 |
| 479.66 | -1.37 | 10.03 | 101 |
| 484.46 | -3.66 | 09.99 | 103 |
| 489.31 | -4.43 | 10.00 | 102 |
| 494.20 | -0.64 | 09.97 | 100 |
| 499.14 | -2.46 | 09.99 | 100 |
| 504.13 | -4.81 | 09.98 | 102 |
| 509.17 | 0.000 | 09.32 | 114 |
| 514.26 | 0.000 | 09.01 | 118 |
| 519.41 | -6.26 | 09.98 | 108 |
| 524.60 | -9.00 | 09.97 | 102 |
| 529.85 | -8.87 | 09.99 | 102 |
| 535.15 | -9.58 | 09.99 | 103 |
| 540.50 | -10.0 | 09.99 | 104 |
| 545.90 | -9.37 | 10.01 | 104 |
| 551.36 | -8.32 | 10.01 | 102 |
| 556.88 | -9.54 | 09.99 | 100 |
| 562.44 | -11.6 | 09.99 | 099 |
| 568.07 | -9.78 | 10.01 | 100 |
| 573.75 | -8.93 | 10.00 | 100 |
| 579.49 | -11.1 | 09.99 | 100 |
| 585.28 | -10.5 | 10.00 | 099 |
| 591.13 | -10.0 | 10.00 | 099 |
| 597.05 | -11.2 | 10.00 | 099 |
| 603.02 | -9.20 | 10.01 | 100 |
| 609.05 | -9.31 | 10.01 | 102 |
| 615.14 | -8.95 | 10.00 | 103 |
| 621.29 | -8.29 | 10.01 | 102 |
| 627.50 | -8.75 | 10.00 | 100 |
| 633.78 | -10.4 | 09.99 | 099 |
| 640.11 | -9.32 | 10.00 | 100 |
| 646.51 | -9.58 | 10.00 | 101 |
| 652.98 | -12.6 | 09.99 | 101 |
| 659.51 | -13.5 | 09.99 | 102 |
| 666.10 | -11.9 | 09.99 | 101 |
| 672.77 | -12.3 | 09.99 | 099 |
| 679.49 | -9.26 | 10.01 | 100 |
| 686.29 | -8.37 | 10.01 | 101 |
| 693.15 | -9.53 | 09.99 | 099 |
| 700.08 | -6.56 | 10.02 | 099 |
| 707.08 | -6.01 | 10.01 | 099 |

| | | | |
|---------|-------|-------|-----|
| 714.15 | -6.91 | 09.98 | 099 |
| 721.30 | -4.37 | 10.01 | 099 |
| 728.51 | -5.69 | 09.99 | 100 |
| 735.79 | -7.55 | 09.99 | 099 |
| 743.15 | -5.93 | 10.02 | 099 |
| 750.58 | -4.29 | 10.01 | 099 |
| 758.09 | -5.18 | 09.99 | 099 |
| 765.67 | -6.83 | 10.01 | 099 |
| 773.33 | -5.34 | 10.01 | 099 |
| 781.06 | -5.45 | 10.00 | 099 |
| 788.87 | -9.70 | 09.97 | 099 |
| 796.76 | -10.5 | 09.99 | 099 |
| 804.73 | -11.6 | 09.98 | 099 |
| 812.77 | -10.0 | 10.00 | 099 |
| 820.90 | -11.3 | 10.00 | 099 |
| 829.11 | -11.6 | 09.99 | 099 |
| 837.40 | -10.5 | 10.01 | 099 |
| 845.78 | -10.4 | 10.01 | 099 |
| 854.23 | -8.95 | 10.01 | 099 |
| 862.78 | -7.27 | 10.02 | 101 |
| 871.40 | -8.66 | 10.00 | 100 |
| 880.12 | -9.52 | 09.98 | 100 |
| 888.92 | -8.50 | 10.00 | 099 |
| 897.81 | -9.03 | 10.00 | 099 |
| 906.79 | -8.12 | 10.02 | 100 |
| 915.85 | -4.47 | 10.03 | 099 |
| 925.01 | 0.000 | 08.41 | 099 |
| 934.26 | -2.75 | 09.98 | 099 |
| 943.61 | -3.72 | 09.99 | 099 |
| 953.04 | -3.12 | 10.01 | 099 |
| 962.57 | -5.73 | 09.98 | 099 |
| 972.20 | -7.51 | 10.00 | 100 |
| 981.92 | -8.20 | 10.00 | 099 |
| 991.74 | -4.03 | 10.03 | 100 |
| 1001.66 | -1.54 | 10.02 | 100 |

Coupling-Decoupling Network C D N L-801 M 1

IEC 61000-4-6

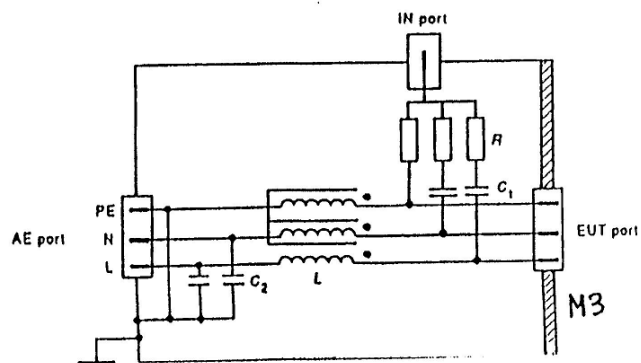
| | |
|----------------------|------------------|
| AE Port | 4mm Banana |
| EUT Port | 4mm Banana |
| Leads | one |
| Max. Voltage | 240 V |
| Max. Current | 6 A |
| IN Port | BNC 50 Ohm |
| Frequency range | 0,15 ... 230 MHz |
| HF Power Dissipation | 4 Watt |



Coupling-Decoupling Network C D N L-801 M 2/M3

IEC 61000-4-6

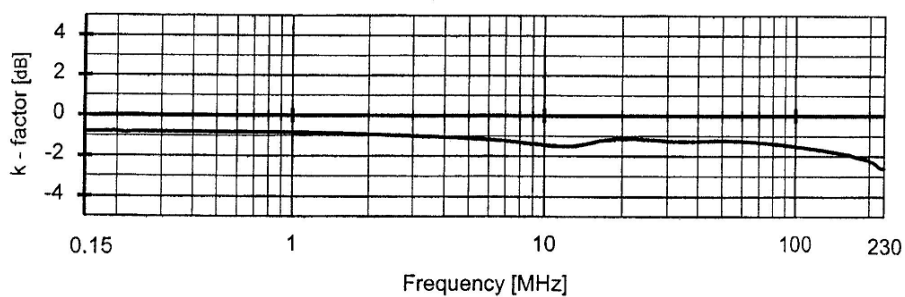
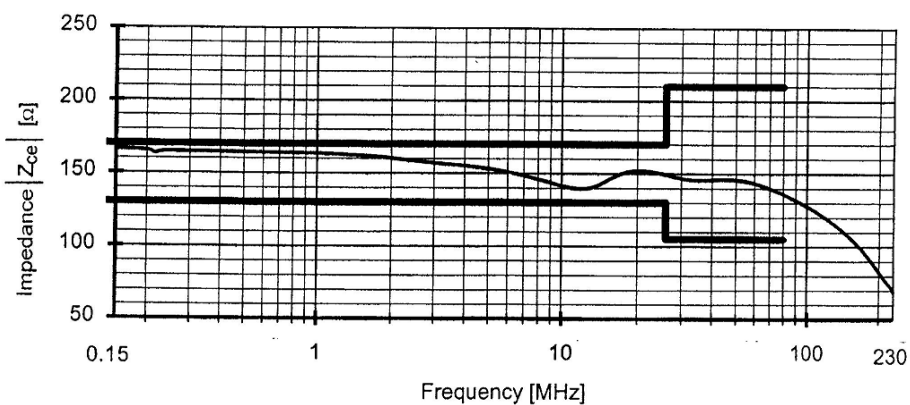
| | |
|----------------------|---------------------------------------|
| AE Port | IEC320/C14 |
| EUT Port | 4mm Banana |
| Leads | L+N+PE (M3) or switchable L+N (M2) |
| Mains | 240 V |
| Max. Current | 16 A |
| IN Port | BNC 50 Ohm |
| Frequency range | 0,15 ... 230 MHz |
| HF Power Dissipation | 6 Watt |



**CDN Impedance and K-factor
in the frequency range 150 kHz - 230 MHz
in a test setup according to IEC 61000-4-6**

Lüthi Elektronik-Feinmechanik AG
CH 4402 Frenkendorf

CDN L-801 M2/M3
Ser. Nr.: 2087
(measured with switch position M3)



Equipment used:

Network Analyzer Typ ZVR Inv. Nr. 4110
50 Ω to 150 Ω Adaptor Inv. Nr. 4159
50 Ω to 150 Ω Adaptor Inv. Nr. 4160

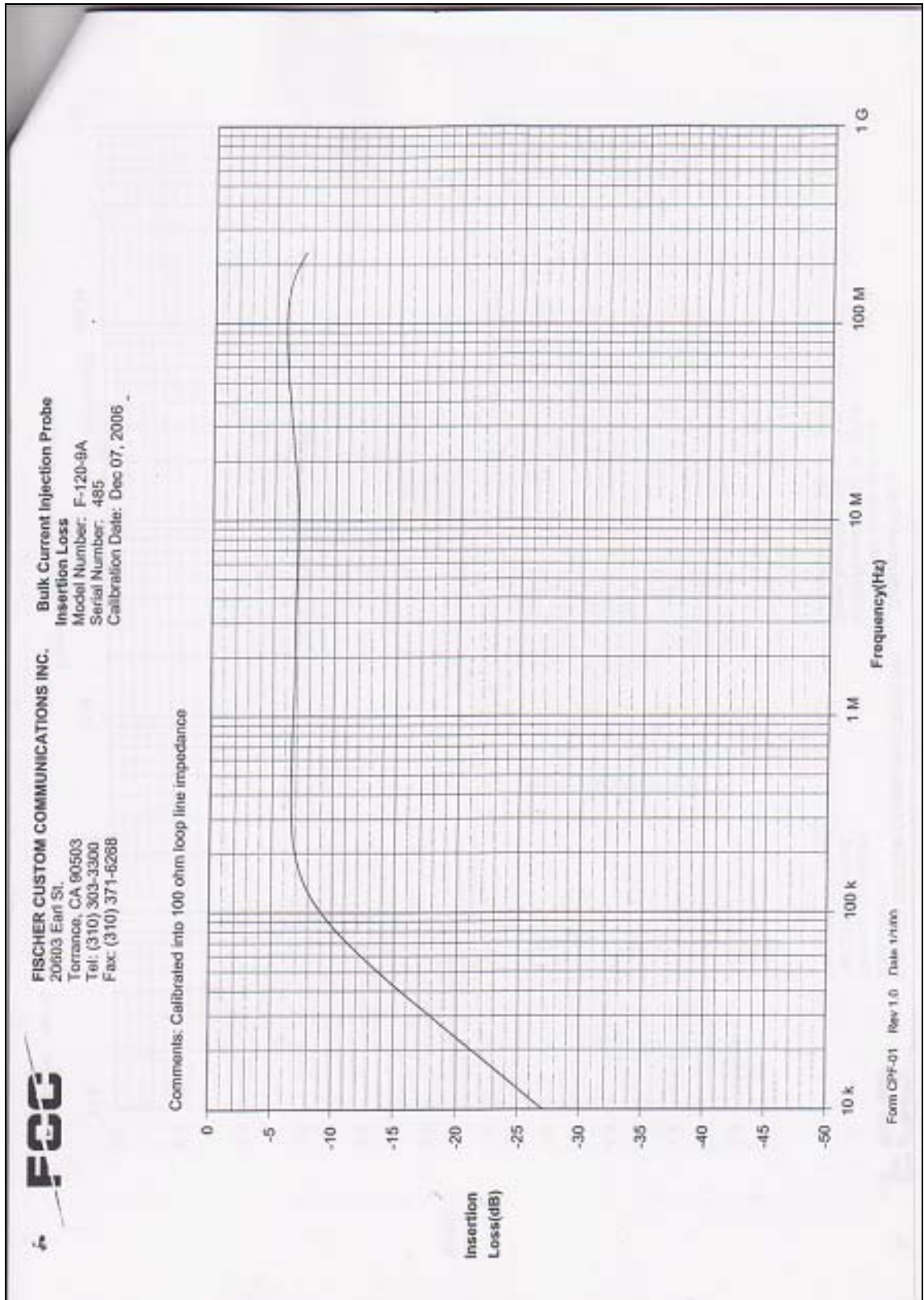
Location:

Measurement Impedance
Reference for K-factor

EB15

Date and time:
2004.10.21 08:48
2004.10.21 08:43

This is a computer created document and will not be signed.

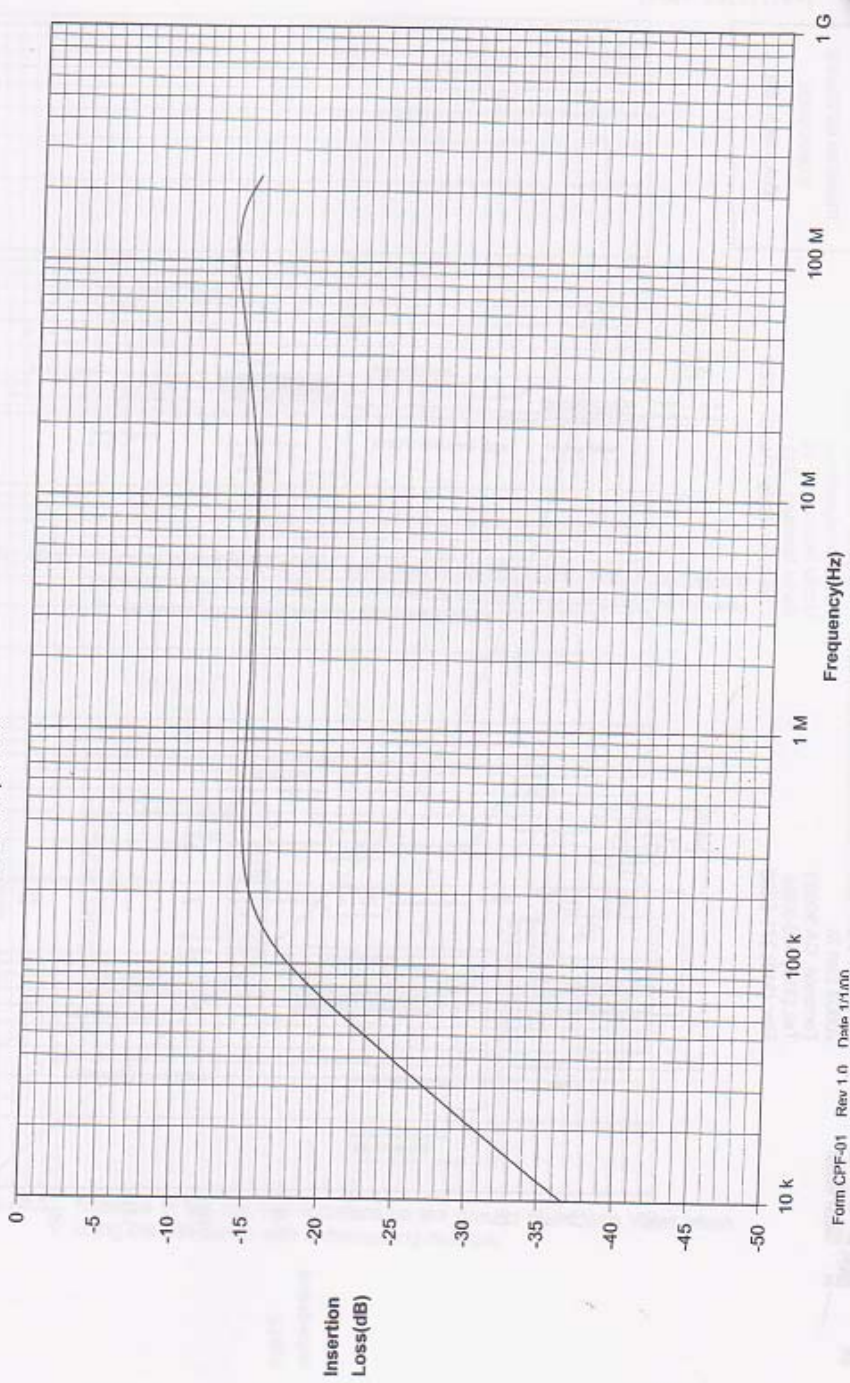




FISCHER CUSTOM COMMUNICATIONS INC.
20603 Earl St.
Torrance, CA 90503
Tel: (310) 303-3300
Fax: (310) 371-6268

Bulk Current Injection Probe
Insertion Loss
Model Number: F-120-9A
Serial Number: 485
Calibration Date: Dec 07, 2006

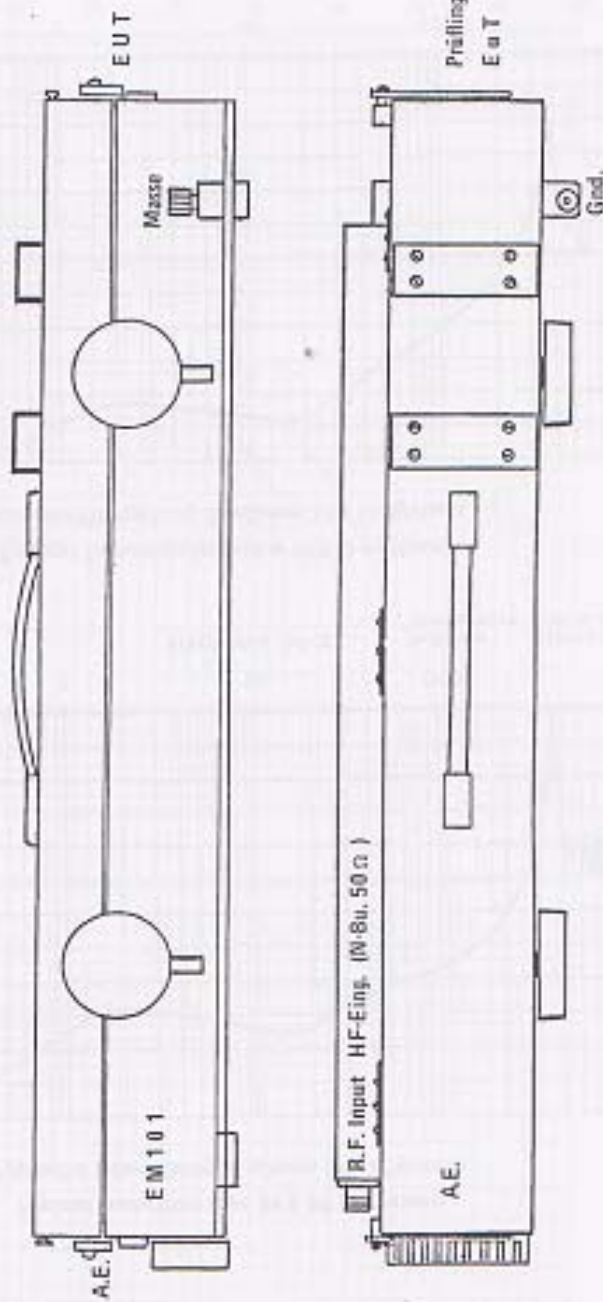
Comments: Calibrated into 300 ohm loop line impedance

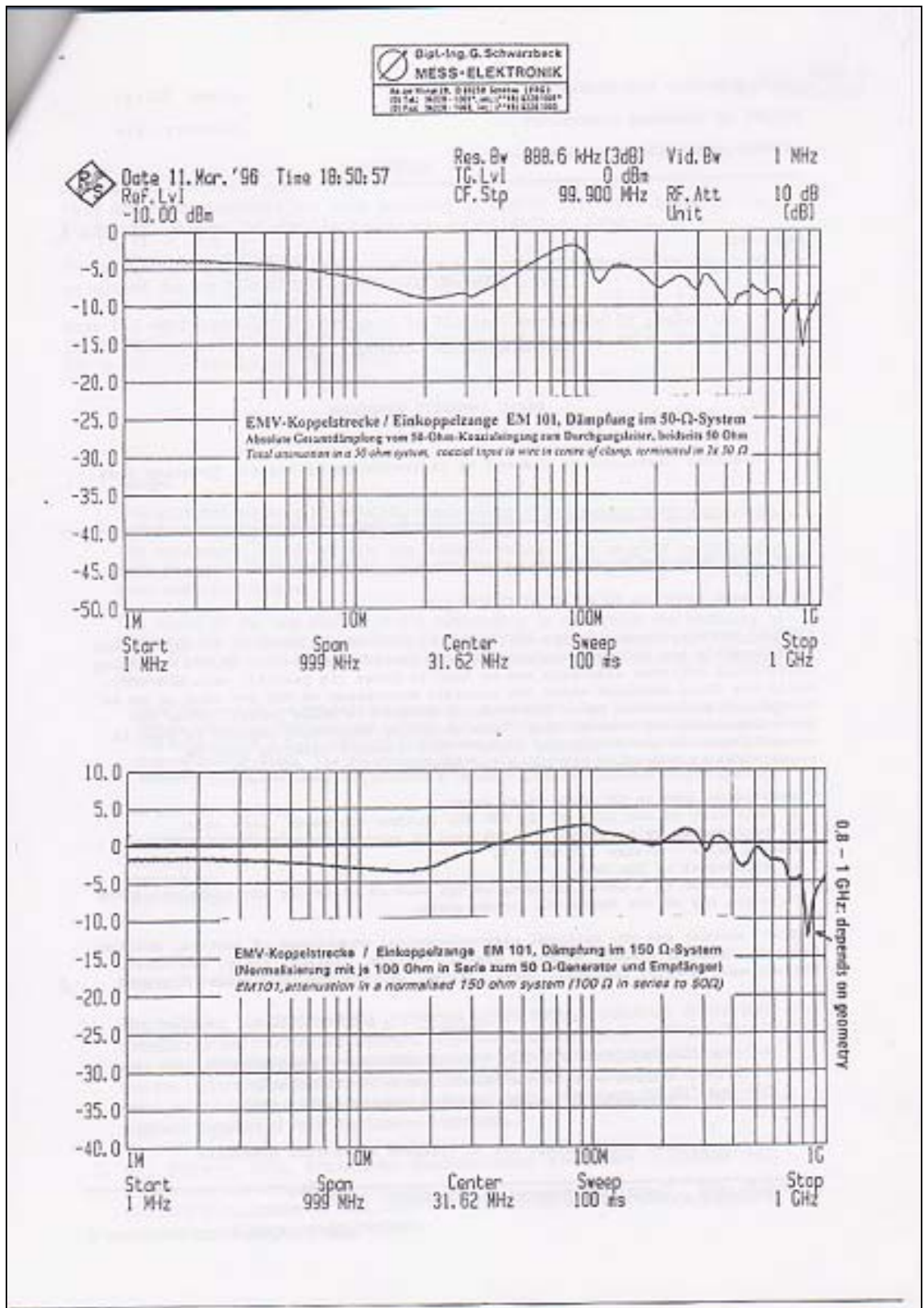


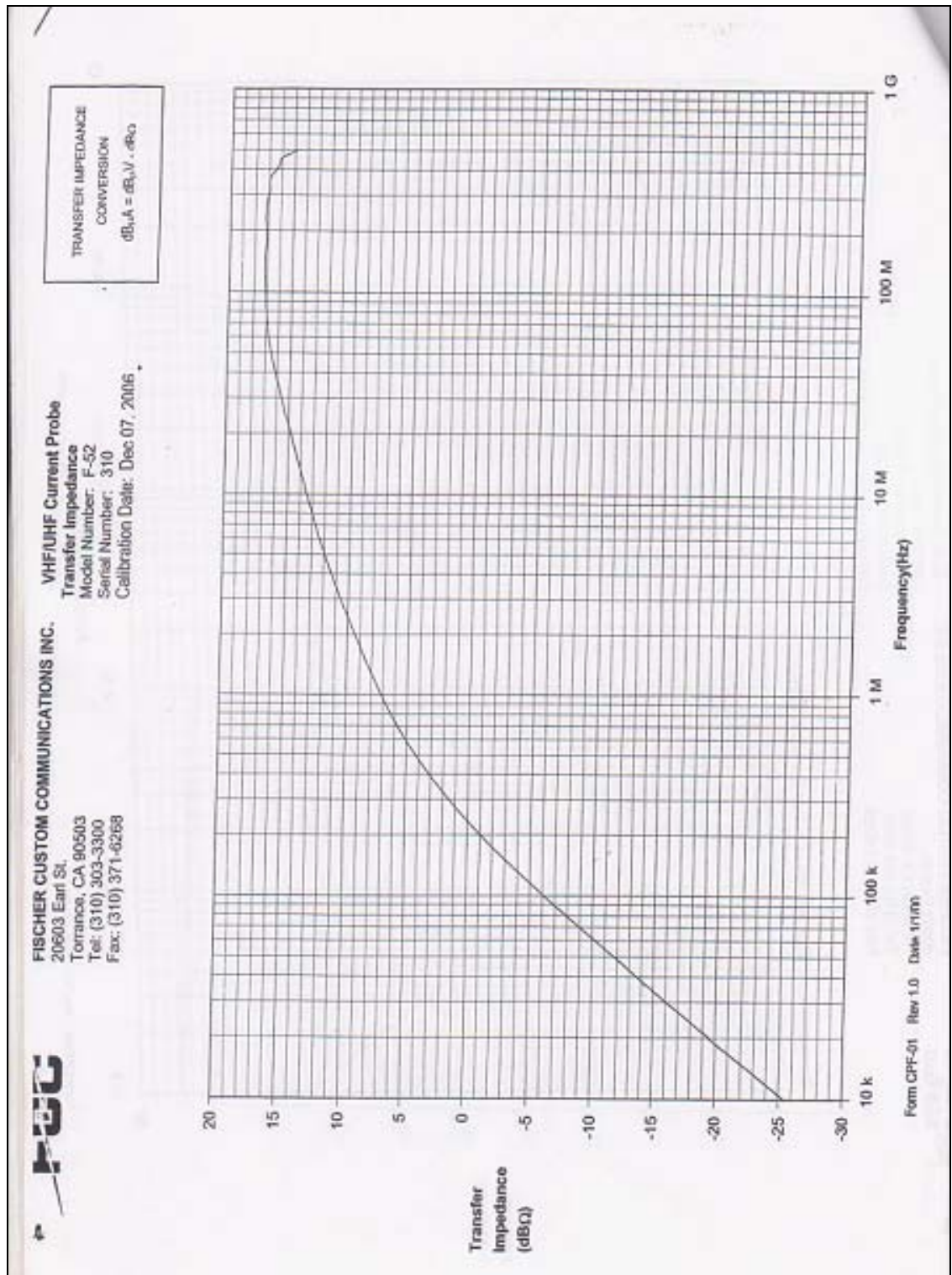
Form CPF-01 Rev 1.0 Date 1/1/00



EMV-Koppelstrecke / Einkoppelzange EM 101, 0,15--1000 MHz
EMC Injection Clamp EM 101, 150kHz-1GHz, 100 watt CW, burst 4 kV50ns
 IEC 1000-4-6 (burst 4-3), IEC 801-6, main advantages: very broad frequency range, high power (equivalent to 100 V/m field strength), directivity above 15 MHz, protects auxiliary equipment, easy and quick testing of EUT's with multi-conductor cables without connections







Specifications

| | 25W1000 | 40WD1000 |
|--|--|---|
| Power output, cw typical minimum | 40 watts 25 watts | 50 watts 40 watts |
| Power output, cw linear (less than 1 dB compression into 50 ohms) | 20 watts minimum | 30 watts minimum |
| Flatness | ± 1.5 dB maximum; ± 1.0 dB typical | ± 1.5 dB maximum; ± 1.0 dB typical |
| Frequency response (instantaneous) | 1 to 1000 MHz | dc to 1000 MHz |
| Input for rated output | 1.0 milliwatt max. | 1.0 milliwatt max. |
| Power gain (at maximum setting) | 44 dB minimum | 48 dB minimum |
| Gain control range | N/A | N/A |
| Input impedance | 50 ohms; VSWR 2.0:1 max. | 50 ohms; VSWR 2.0:1 max. |
| Output impedance | 50 ohms nominal | 50 ohms nominal |
| Mismatch tolerance (ability to operate without damage, foldback, or oscillation with any magnitude and phase of source and load impedance) | 100% | 100% |
| Class of operation | A | A, 0.5-1000 MHz; AB, dc-0.5 MHz |
| Modulation capability (ability to reproduce faithfully AM, FM, or pulse modulation appearing on input signal) | 100% | 100% |
| Noise figure | noise floor data on request | noise floor data on request |
| Harmonic distortion | Minus 20 dBc max. at 20 watts | Minus 20 dBc max. at 35 watts |
| Third-order intercept point | 52 dBm typical | 56 dBm typical |
| Primary power (select via internal taps) | 100/110/120/200/208/220/ 240 Vac ± 5%, 50/60 Hz, single-phase, 750 W max. | 90 to 132; 180 to 264 Vac, 50/60 Hz, single-phase, 800 W max. |
| RF connectors | Type N female | Type N female |
| Cooling | Forced air (self-contained fans) | Forced air (self-contained fans) |
| Weight | 34.5 kg (76 lb) | 29 kg (64 lb) |
| Dimensions (W x H x D) | 50.3 x 20.3 x 45.7 cm (19.8 x 8.0 x 18.0 in.) | 50.3 x 24.9 x 45.7 cm (19.8 x 9.8 x 18.0 in.) |
| Additional features | IEEE-488 remote control available. | Covers dc to 1 GHz in two bands: low band dc to 0.5 MHz; high band 0.5 MHz to 1000 MHz. Manual automatic, or remotely controlled band selection. IEEE-488 remote control available. |
| Typical power curves | <p>Model 25W1000</p> <p>Typical CW Output</p> <p>Typical Linear at 1dB Compression</p> <p>POWER (watts)</p> <p>FREQUENCY (MHz)</p> | <p>Model 40WD1000</p> <p>Typical CW Output</p> <p>Typical Linear at 1dB Compression</p> <p>POWER (watts)</p> <p>FREQUENCY (Hz)</p> |
| | <p>88.3 mm (3.47 in.)</p> <p>20.3 mm (0.8 in.)</p> <p>45.7 mm (1.8 in.)</p> | <p>88.3 mm (3.47 in.)</p> <p>24.9 mm (0.98 in.)</p> <p>45.7 mm (1.8 in.)</p> |
| | <p>Specifications subject to change without notice. © Copyright 1994, Amplifier Research</p> | |