

RADIOHÄIRIÖIDEN VAIMENTAMINEN HAKKURITEHOLÄHTEESSÄ

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU

Tietotekniikan koulutusohjelma

Tietokone-elektroniikka

Opinnäytetyö

Kevät 2006

Samuli Kumpulainen

Lahden ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan koulutusohjelma

KUMPULAINEN, SAMULI: Radiohäiriöiden vaimentaminen
hakkuriteholähteessä

Tietokone-elektroniikan opinnäytetyö, 48 sivua, 20 liitesivua

Kevät 2006

TIIVISTELMÄ

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin radiohäiriöiden vaimentamista hakkuriteholähteessä. Työn tavoitteena oli tutkia johtuvia ja säteileviä sähkömagneettisia häiriöitä sekä niiden syntyä, toimintaa ja vaimentamista. Käytännön työvaiheessa selvitettiin kondensaattoreiden sijoittelun tai kuristimen mallin vaikutus laitteessa esiintyviin sähkömagneettisiin johtuviin häiriöihin.

Käytännön mittaukset tehtiin Murrelektronik Power Oy:n tuotekehityslaboratoriossa. Tutkittava laite oli Murrelektronik Power Oy:n teholähde 85163. Se liitettiin LISN-keinoverkon ja spektrianalysointilaitteen kautta pc-tietokoneeseen, jossa Dos-pohjaisella Tektronix-testiohjelmalla ajettiin A-luokan laitteille tarkoitettu CISPR-peak-testi. Testi testasi laitteen häiriöt neljällä eri taajuusalueella 140 kHz – 30 MHz välillä.

Mittaukset suoritettiin neljässä vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin alku-peräistä laitetta. Toisessa vaiheessa kondensaattorit siirrettiin toiselle puolelle kuristinta. Kolmannessa ja neljännessä mittauksessa tehtiin molemmat edellä mainitut vaiheet, mutta käytettiin eri kuristinta.

Opinnäytetyön tulosten perusteella tutkittava laite alitti sen johtuville sähkömagneettisille häiriöille asetetut raja-arvot kaikissa neljässä testissä. Parhaimmaksi vaihtoehdoksi osoittautui testin kolmas vaihe, jossa vain kuristin vaihdettiin. Tuloksista voidaan päätellä, että komponenttien valinta ja sijoittelu vaikuttaa laitteessa esiintyviin johtuviin sähkömagneettisiin häiriöihin.

Avainsanat: radiohäiriö, sähkömagneettinen häiriö, EMI, EMC, sähkömagneettinen yhteensopivuus, eromuotoinen häiriö, yhteismuotoinen häiriö

Lahti University of Applied Sciences
Faculty of Technology

KUMPULAINEN, SAMULI: Attenuation of radio frequency interference in
switch mode power supply

Bachelor's thesis in Computer Electronics, 48 pages, 20 appendices

Spring 2006

ABSTRACT

This Bachelor's thesis deals with the attenuation of electromagnetic interference in switch mode power supply. The objective was to examine conducted and radiated electromagnetic interference, and also how it is generated, how it functions and how it can be attenuated. In the practical part of the thesis the goal was to study how the placement of capacitors and the type of the choke affect the conducted common-mode electromagnetic interference in the device.

The measurements for this study were done in the product development laboratory of Murrelektronik Power Ltd. The device which was measured was switch mode power supply 85163 made by the company. It was connected to a PC computer through an LISN artificial network and a spectrum analyzer. The DOS-based Tektronix Commercial EMI Test Software had been installed to the computer. The CISPR peak test of the Tektronix test software was run in the mode intended for class A products. The test measured interference at four different frequency ranges between 140 kHz and 30 MHz.

Measurements were performed in four phases. In the first phase, the original device was examined. In the second phase the capacitors were moved to the other side of the choke. In the third and fourth phases, the first and the second phases were repeated with a different choke.

According to the results of this thesis, the measured device passed the placed limits for conducted EMI in all four phases of test. The best results came from the third phase of the test, where the choke was changed. From the results one can conclude that the selection and placement of components have an effect on the electromagnetic interference in a device.

Keywords: radiated interference, electromagnetic interference, EMI, EMC, electromagnetic compatibility, differential noise, common mode noise

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	1
2 SÄHKÖMAGNEETTISET HÄIRIÖT	2
2.1 Johtuvat häiriöt	5
2.2 Säteilevät häiriöt	8
3 STANDARDIEN ASETTAMAT VAATIMUKSET HÄIRIÖIDEN POISTOLLE	10
4 SÄHKÖMAGNEETTISTEN HÄIRIÖIDEN VAIMENTAMINEN	14
4.1 Eromuotoisten johtuvien häiriöiden vaimentaminen.....	14
4.2 Yhteismuotoisten maahäiriöiden vaimentaminen	17
4.3 Muita yhteismuotoisen häiriön lähteitä	20
4.4 Yhteismuotoinen ja eromuotoinen suodatin samassa piirissä	22
4.5 Säteilevien häiriöiden vaimentaminen.....	24
4.6 Komponentit sähkömagneettisia häiriöitä vaimentavissa suodattimissa.....	25
4.7 Jäähdytinlevyt.....	27
4.8 Ferriittiset materiaalit vaimentamisessa	28
4.9 Mittausmenetelmät	29
5 LABORATORIOMITTAUKSET	31
5.1 Testi 1: teholähde 85163 ilman muutoksia.....	33
5.2 Testi 2: kondensaattorien siirtäminen.....	33
5.3 Testi 3: EPCOS-kuristimen vaihto	34
5.4 Testi 4: kondensaattorien siirtäminen.....	35
6 TULOKSET.....	37
6.1 Testi 1: teholähde 85163 ilman muutoksia.....	37
6.2 Testi 2: kondensaattorien siirtäminen.....	38
6.3 Testi 3: EPCOS-kuristimen vaihto	40
6.4 Testi 4: kondensaattorien siirtäminen.....	41

7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	43
LÄHTEET	47
LIITTEET	49

1 JOHDANTO

Sähköiset laitteet ovat vuorovaikutuksessa ympäristönsä kanssa. Ei-toivottua sähkömagneettista toimintaa laitteen ja ympäristön välillä tai laitteen osien välillä kutsutaan sähkömagneettisiksi häiriöiksi. Radiohäiriöt ovat radiotaajuisia sähkömagneettisia häiriöitä. Niihin kuuluvat johtuvat ja säteilevät häiriöt.

Murrelektronik Power Oy on Lahdessa toimiva elektroniikka-alan yritys, joka suunnittelee, kehittää ja valmistaa hakkuriteholähteitä teollisuussovelluksiin. Asiakkaina yrityksellä on suuria teollisuusyrityksiä. Murrelektronik Power Oy:llä on tuotannossa tällä hetkellä yli 50 erilaista teholähdettä.

Hakkuriteholähteissä sähkömagneettiset häiriöt johtuvat nopeasti muuttuvien virtojen ja jännitteiden muodostamista kentistä. Häiriöiden poistaminen on tärkeää jo laitteen suunnitteluvaiheessa, jotta laite toimisi turvallisesti. Nämä häiriöt ovat hyvin pienien energioiden ilmiöitä ja liittyvät tiiviisti sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen (EMC). EMC-suunnittelun tarkoituksena on poistaa häiriöitä.

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan sähkömagneettisia häiriöitä hakkuriteholähteissä. Työn aluksi selvitetään lähdemateriaalin pohjalta sähkömagneettisten häiriöiden syntyä ja toimintaa sekä sitä, kuinka niitä pystyttäisiin erilaisilla komponentti- ja suunnitteluratkaisuilla vaimentamaan. Käytännön mittauksilla selvitetään johtuvien häiriöiden vaimentamista hakkuriteholähteen sisääntulossa.

Tutkittava laite on Murrelektronik Power Oy:n teholähde 85163. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää tulopiirin kondensaattoreiden ja kuristimen vaikutusta johtuviin sähkömagneettisiin häiriöihin. Työssä tehtävät komponentti-muutokset ovat kondensaattoreiden paikan vaihtaminen ja yhteismuotokuristimen mallin vaihtaminen alkuperäisestä PREMO-merkkisestä kuristimesta EPCOS-merkkiseen. Opinnäytetyön mittaukset tehdään Murrelektronik Power Oy:n toimeksiantona yrityksen tuotekehityslaboratorion tiloissa.

2 SÄHKÖMAGNEETTISET HÄIRIÖT

Sähkömagneettiset häiriöt (electromagnetic interference, EMI) ovat ei-toivottua sähkömagneettista vuorovaikutusta laitteen itsensä osien kesken tai laitteen ja ympäristön välillä. Jotta laite toimisi turvallisesti ja luotettavasti, tulee jo suunniteltaessa ottaa huomioon erilaisten häiriöiden synty- ja etenemistavat. (Oinonen 2004.) Ne häiriötyypit, joihin pääsääntöisesti kiinnitetään huomiota, etenevät joko johtumalla eli galvaanisesti tai sähkömagneettisena säteilynä. Huomioon tulisi kuitenkin ottaa myös pelkkä häiritsevä magneettikenttä, häiritsevä sähkökenttä ja liiallinen lämmönkehitys. Minkä takia ei voida rajoittaa suunnittelua vain pelkkien direktiivien rajoittamiin vaatimuksiin. Esimerkiksi isot, puhtaasti magneettiset kentät voivat sekoittaa antureita ja äänipäitä. Pelkkää sähkökenttää puolestaan esiintyy, kun staattista sähköä purkautuu. (Reitmaa 1998, 4.)

Ihminen voi latautua jopa muutamaan kilovolttiin ja näin aiheuttaa toisio-
purkauksen heikosti suunnitellun laitteiston sisällä (Reitmaa 1998, 4). Joka-
päiväisessä elämässä havaittavia häiriöitä ilmenee muun muassa kännykän
soidessa, kun se aiheuttaa häiriöitä tavallisen lankapuhelimen tai PC-monitorin
toiminnassa. Televisio voi aiheuttaa häiriöitä tietokoneen näyttöön, jos ne on
sijoitettu liian lähelle toisiaan. (Hyrkäs 2001, 2)

Sähkömagneettiset häiriöt (EMI) voidaan jaotella tapauskohtaisesti neljään
pääryhmään. Näitä ryhmiä ovat RF-emissio, ESD, säteilevät häiriöt ja johtuvat
häiriöt. (ABB Oy 2000, 10.) Tässä opinnäytetyössä käsitellään säteileviä ja
johtuvia häiriöitä sekä niiden syntyä ja toimintaa hakkuriteholähteissä.

Sähkömagneettiset häiriöt liittyvät tiiviisti sähkömagneettiseen yhteen-
sopivuuteen (electromagnetic compatibility, EMC), ja ne ovat hyvin pienien
energioiden ilmiöitä. Juuri häiriöiden takia yhteensopivuuden suunnittelu on
tärkeää. EMC-suunnittelun tarkoituksena on poistaa sähkömagneettiset häiriöt.
Mammano & Carsten (2003, 1-1) määrittelevät sähkömagneettisen häiriön
seuraavalla tavalla: ”Yhden elektronisen laitteen osan aiheuttama häiriö toisen

laitteen toiminnassa sähkömagneettisen energian siirron yhteydessä. Sähkömagneettinen yhteensopivuus tarkoittaa siis sitä, ettei laitteistossa esiinny sähkömagneettisia häiriöitä. (Mammano & Carsten 2003, 1-1.)

Mammanon ja Carstenin (2003, 1-1) mukaan sähkömagneettiset häiriöt käsittävät kolme tunnusmerkkiä. Häiriöillä on lähde (a source), joka tuottaa sähkömagneettista energiaa. Häiriöt kytkeytyvät jotakin kautta (a coupling means), eli energia kulkeutuu jotenkin laitteista toisiin. Näiden kahden lisäksi on piiri, joka kärsii häiriöistä (a victim circuit). Sen toiminta häiriintyy kytkeyty-neestä energiasta. Jotta sähkömagneettisia häiriöitä voitaisiin havaita, tarvitaan nämä kaikki ominaisuudet. Poistamalla yksi näistä poistetaan koko häiriö. (Mammano & Carsten 2003, 1-1.)

Hakkuriteholähteissä häiriöt johtuvat nopeasti muuttuvien virtojen ja jännitteiden muodostamista kentistä. Sähkömagneettisten kenttien tunnistamiseksi tarvitsee vain tietää, että sähköinen häiriö voi johtua piirien osien välisestä sähköisestä tai magneettisesta kytkeytymisestä. (Mammano & Carsten 2003, 1-2.)

Magneettikentät aiheuttavat muuttuvien virtojen johtimessa jännitteiden indusoitumista toisiinsa seuraavan kaavan 1 mukaan, jossa e on indusoitunut jännite.

$$e = M \bullet di / dt , \quad (1)$$

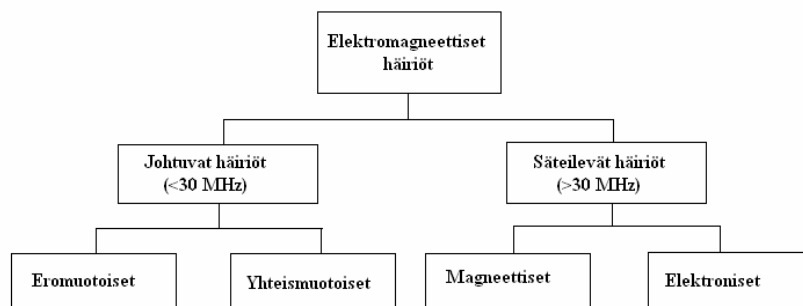
M on häiriölähteen ja häiriötä vastaanottavan ”uhrin” välinen keskinäisinduktanssi. di/dt on piirin aiheuttaman virranmuutoksen suhde muutokseen kuluneeseen aikaan eli virran nousunopeus. (Mammano & Carsten 2003, 1-2.)

Vastaavalla tavalla elektroniset sähkökentät aiheuttavat muuttuvilla jännitteillä piirin pinnalla indusoituvan virran vuotamista toiseen johtimeen seuraavan kaavan 2 mukaisesti:

$$i = C \bullet dv / dt , \quad (2)$$

jossa i on indusoitunut virta ja C on häiriön lähteen ja vastaanottavan piirin välinen kapasitiivinen kytkeytyminen. dv/dt on piirin aiheuttaman jännitteenmuutoksen suhde muutokseen kuluneeseen aikaan eli jännitteen nousunopeus. (Mammano & Carsten 2003, 1-2.)

Häiriön siirtymistä laitteesta tai sen osasta toiseen voidaan kuvata kahdella toisistaan riippumattomalla kytkeytymismuodolla. Energia voi siirtyä joko säteilemällä laitteistosta itsestään aiemmin kuvattujen magneettisten tai sähköisten kenttien välityksellä tai johtumalla sisääntulosta, ulostulosta tai ohjauslinjasta, joka yhdistää laitteiston muuhun maailmaan, jossa nämä linjat voivat sitten muuttua säteilijöiksi. Mammano ja Carsten (2003, 1-2) kuvaavat nämä toisistaan erilliset häiriömuodot seuraavalla tavalla: ”Häiriökytkeytymisen tehokkuus on taajuusriippuvaista – mitä suurempi taajuus, sitä suurempi mahdollisuus, että on kyse säteilevistä häiriöistä.” Yleisesti nämä kaksi häiriö-tyyppiä on lajiteltu taajuuden mukaan niin, että käännekohtana on 30 MHz. Alle 30 MHz:n olevat taajuudet lasketaan johtuviksi häiriöiksi ja vastaavasti taajuudet yli 30 MHz luokitellaan säteileviksi häiriöiksi. (Mammano & Carsten 2003, 1-2.) Kuviossa 1 on esitetty häiriöiden jaottelu johtuviin ja säteileviin häiriöihin.



KUVIO 1. Sähkömagneettiset häiriöt luokiteltuna johtuviin ja säteileviin häiriöihin

2.1 Johtuvat häiriöt

Johtuvilla häiriöillä tarkoitetaan häiriötä aiheuttavia signaaleja, jotka siirtyvät laitteesta toiseen johtumalla kaapeleita tai johdotuksia pitkin. Jatkuvasta tilasta toiseen siirryttäessä esiintyy muutosilmiö, jota kutsutaan transientiksi. Se syntyy, kun sähköisessä piirissä tapahtuu nopea virran tai jännitteen muutos. (ABB Oy 2000, 10.)

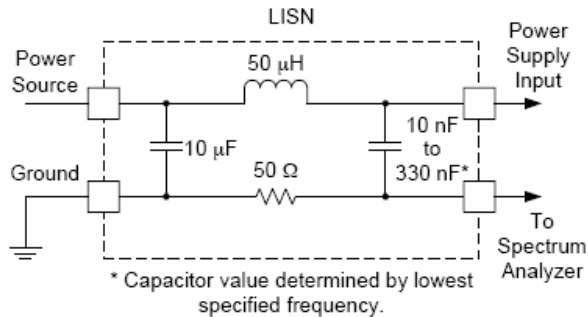
Johtuvilla häiriöillä on kaksi etenemismuotoa: eromuotoinen (differential-mode) ja yhteismuotoinen (common-mode). Eromuotoinen etenemismuoto tarkoittaa, että kahden johtimen välillä on jännite U_h ja koko johdinta pitkin kulkeva virta I palaa toista johdinta pitkin takaisin. Johtimissa kulkevat virrat ovat samansuuruiset, mutta vastakkaismerkkiset. Tämänkaltainen häiriöjännite syntyy esimerkiksi magneettikentässä kahden johtimen välille silloin, kun toiseen johtimeen indusoituu voimakkaampi jännite. (ABB Oy 2000, 11.)

Yhteismuotoisessa etenemismuodossa puolestaan johtimien välillä ei ole jännitettä, vaan jännite on sama maatasoon nähden molemmissa johtimissa. Tässä tapauksessa johtimien virrat ovat yhtä suuret ja samanmerkkiset. Häiriövirta kytkeytyy vierekkäin kulkeviin johtimiin, esimerkiksi kun magneettikenttä indusoi kaikkiin johtimiin yhtä suuren häiriövirran. (ABB Oy 2000, 11.)

Nämä kaksi häiriöiden johtumismuotoa ovat hakkuriteholähteissä luonnostaan mukaan kuuluvia perustekijöitä. Laitteen sisäisen tehon vaihtelun johdosta siinä on äkillisiä virran muutoksia sekä sisääntulo- että ulostulojohtimissa. Näin ollen jäljellä oleva hurina ja kytkentäpiikit esiintyvät yhteismuotoisissa häiriöiden lähteissä. Virta vuotaa niistä kaksisuuntaisesti ensin yhteen pisteeseen ja siitä toista pitkin takaisin. (Mammano & Carsten 2003, 1-4.)

Tarkastellessa johtuvia häiriöitä teholähteen sisääntulon voimajohtimissa laitteessa pitää erottaa suuremman taajuuden signaalit sisääntulovirrasta. Tämän-tyylistä laitetta kutsutaan nimellä LISN (Line Impedance Stabilization Network),

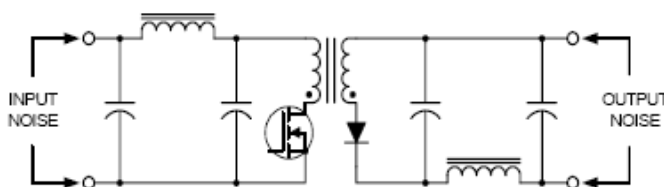
eli keinoverkko. Sen rakenne selviää alla olevasta kuvioista 2. (Mammano & Carsten 1-4.)



KUVIO 2. 120/240 VAC, 60 Hz LISN piiri (Mammano & Carsten 2003, 1-4)

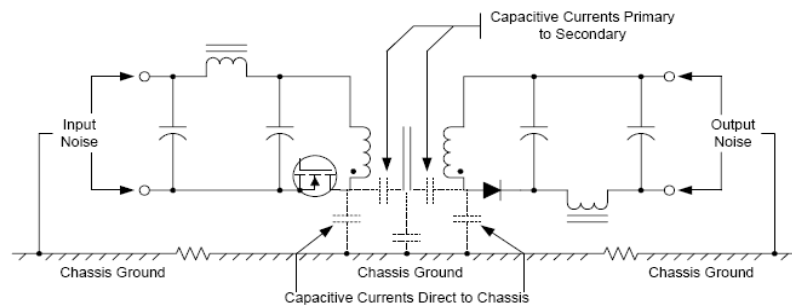
Kuvan mukaisen keinoverkon avulla pystytään mittaamaan spektrianalysaattorilla 50-Ω lähdeimpedanssin läpi kulkeva häiriövirta eristämällä mittauksesta kaikki suurtaajuiset sivuvirtakytkennot, joita verkossa voi ilmetä. Keinoverkko liitetään yleensä kaikkiin sisääntulon verkkojohtimiin ja kohinasignaalit mitataan suhteessa maatasoon. (Mammano & Carsten 2003, 1-4.)

Laitteen sisäiset tehokytkennot aiheuttavat äkillisiä virranmuutoksia ajan suhteen eromuotoisen virran molemmissa sisääntuloissa ja ulostuloissa. Tämä on esitetty kuviossa 3. Ideaaliset sisääntulo- ja ulostulosuodattimet suodattaisivat suurtaajuisia häiriöitä, mutta käytännössä täydellinen suodattaminen on mahdotonta. (Mammano & Carsten 2003, 1-4.)



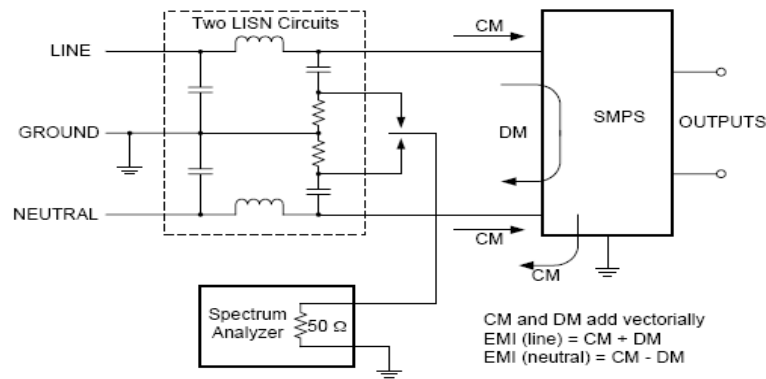
KUVIO 3. Eromuotoisen häiriön muodostuminen (Mammano & Carsten 2003, 1-5)

Teholähteiden nopeasti muuttuvien jännitteiden lähteet voivat kytkeä häiriöitä hajakapasitanssin kautta suojamaahan. Tämä selviää kuvioista 4. Tällaiset yhteismuotoiset häiriöt, jotka ovat kytkeytyneet maahan kaikista teholähteen liitäntäpisteistä, mitataan suhteessa maatasoon. (Mammano & Carsten 2003, 1-5.)



KUVIO 4. Muuttuvat jännitteet kytkeytyvät suojamaahan hajakapasitanssin kautta (Mammano & Carsten 2003, 1-5)

Kuvio 5 seuraavalla sivulla näyttää yksinkertaisen mallin sekä yhteismuotoisten että eromuotoisten häiriöiden kytkeytymisestä teholähteen sisääntulossa. Samaan kuvaan on liitetty myös kaksi LISN-piiriä sarjaan signaalijohtimien välille. Kuvassa CM tarkoittaa yhteismuotoista etenemismuotoa ja DM eromuotoista etenemismuotoa. Voimansiirtojohtimessa keinoverkon polaaraisuus mitataan CM + DM, kun taas nollajohtimessa CM – DM. Kaikkien sisääntulojen kokonaishäiriöt on mitattava. Ei nimittäin voida olettaa, että molemmissa sisääntuloissa kulkevat yhteismuotoisen ja eromuotoisen häiriön arvot olisivat identtisiä, virran monien kulkeutumismahdollisuuksien takia tehonlähteen sisällä. (Mammano & Carsten 2003, 1-5.)



KUVIO 5. Eromuotoiset ja yhteismuotoiset häiriövirrat teholähteen sisääntuloissa (Mammano & Carsten 2003, 1-5)

2.2 Säteilevät häiriöt

Säteilevillä häiriöillä tarkoitetaan radiotaajuisia häiriöitä. Ne voidaan jakaa kahteen ryhmään, kapeakaistaisiin ja laajakaistaisiin häiriöihin. Kapeakaistaisia häiriöitä ovat erilaisista radiolähettimistä peräisin olevat kantoaalto. Laajakaistaisia häiriöitä puolestaan synnyttävät suurin osa sähkölaitteista. (ABB Oy 2000, 10.)

Säteilevät häiriöt syntyvät, kun häiriöenergia johtuu johtimessa tai piirilevyllä aiheuttaen magneettikentän. Jos johtimen ja jonkin toisen johtimen välillä on tällöin keskinäisinduktanssia tai kapasitiivista kytkeytymistä, säteilevä häiriö muuttuu takaisin johtuvaksi häiriöksi, mutta toiseen kohteeseen. Tämän takia voidaan todeta, että mikä tahansa johde voi muuttua antenniksi, joka voi lähettää tai vastaanottaa säteileviä häiriöitä. (Mammano & Carsten 2003, 1-12.)

Koska säteilevät häiriöt käsittävät yli 30 MHz olevat taajuudet, niiden tutkiminen on huomattavasti hankalampaa kuin johtuvien häiriöiden. Näin suurilla taajuusalueilla testilaitteiden osuus on paljon ratkaisevampi kuin pienemmillä taajuuksilla ja testausympäristö asettaa omat vaatimuksensa. Ympäristön tulee olla tarkasti hallittavissa. Tämä tarkoittaa sitä, että tilana tulee käyttää radio- taajuuksilta suojattua huonetta, joka on suojattu ulkoisilta häiriöiltä. Säteileviä häiriöitä testattaessa tärkeitä edellytyksiä ovat antennin tyyppi, sen etäisyys ja

suuntaus testilaitteeseen nähden sekä tapa, jolla säteilyn kulmaa mitataan. Radiotaajuisia häiriöitä mitattaessa on mitattava myös teholähteen sisääntulo- ja ulostuloliitännät, sillä näissä pisteissä suurtaajuiset johtuvat energiat voivat tuottaa radiotaajuisen kentän ja yhdistää sen kokonaishäiriöön. (Mammano & Carsten 2003, 1-12.)

Johtuvien häiriöiden tavoin säteilevät häiriöt voidaan jakaa kahteen alaryhmään riippuen siitä, kuinka energia on tuotettu. Se voi olla tuotettu joko sähkökentässä tai magneettikentässä. Sähkökenttä syntyy jännitteen vaihtelusta ajan suhteen johtavilla pinnoilla. Magneettikenttä syntyy virran vaihtelusta ajan suhteen johtimissa. Tällä perusteella säteilevät häiriöt jaetaan lähikenttään (near-field) ja kaukokenttään (far-field). Lähikentällä tarkoitetaan lähde lähellä olevia kenttiä. Näissä tapauksissa tulee ottaa huomioon sekä sähkökentät että magneettikentät erikseen, sillä kentät ovat erittäin voimakkaita. Kaukokenttä on tämän alueen takana, ja siinä sähkökentät ja magneettikentät yhdistyvät yhdeksi sähkömagneettiseksi säteilyksi. Lähi- ja kaukokenttien raja määritellään häiriöenergian aallonpituuden mukaan, joka saadaan kaavasta 3. Siinä λ on aallonpituus. (Mammano & Carsten 2003, 1-13.)

$$\lambda / 2\pi \tag{3}$$

Mammanon ja Carstenin (2003, 1-13) mukaan teholähteitten tapauksessa on turvallista olettaa, että suurimmat ongelmat rajoittuvat lähikenttään.

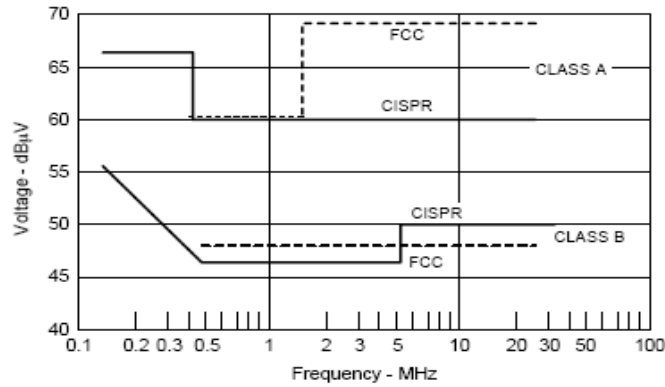
Lähikentässä oletetaan yleisimmin, että jos lähde on korkeajännitteinen ja matalavirtainen, siinä syntyvä kenttä on ensisijaisesti sähkökenttä. Vastaavasti magneettikenttä syntyy virran ollessa korkea ja jännitteen matala. Näistä magneettikenttä on vallitseva. (Mammano & Carsten 2003, 1-13.)

3 STANDARDIEN ASETTAMAT VAATIMUKSET HÄIRIÖIDEN POISTOLLE

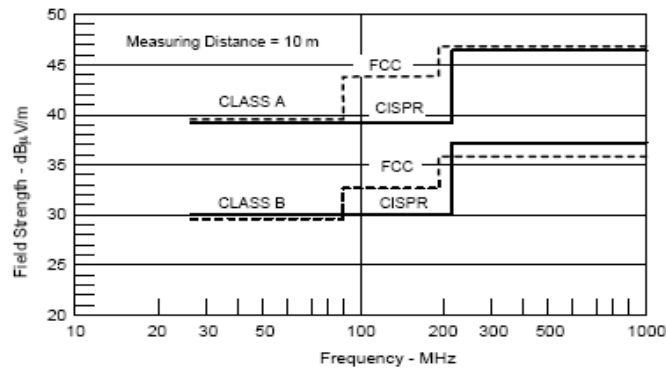
Erilaatuisten sähkömagneettisten häiriöiden poistolle on asetettu ympäri maailmaa erilaisia vaatimuksia eli standardeja. Lähestulkoon jokaisella valtiolla on omat vaatimuksensa häiriöiden vaimentamisesta. Lisäksi laitteita voidaan luokitella niiden tyyppin ja käyttötarkoituksen mukaan. Käyttötarkoituksen mukaan luokitellut laitteet jaetaan kahteen luokkaan. Nämä luokat ovat luokka A ja luokka B. Luokka A pitää sisällään teollisuuskäyttöön ja kaupalliseen käyttöön tarkoitettuja laitteistoja. Luokka B käsittää kuluttajakäyttöön tarkoitettuja laitteita. B-luokan laitteistojen vaatimukset ovat yleensä tiukempia kuin A-luokan, sillä kotikäytössä olevat laitteet ovat yleisimmin lähempänä toisia laitteita. Kotikäyttöisissä laitteissa on yleensä myös vähemmän toimintoja käytettävänä kuin luokan A laitteissa. (Mammano & Carsten 2003, 1-3.)

Yhdysvalloissa sähkömagneettisten häiriöiden rajoitusten kontrolloinnista vastaa Federal Communications Commission (FCC). Kansainvälisesti häiriöiden laatuvaatimuksia asettaa IEC (International Electrotechnical Commission), joka on julkaissut EU:n perustandardit emissioille (EN50081). Lisäksi ranskalaisjohtoinen komitea CISPR (Comite International Special des Perturbations Radioelectriques) on vaikutusvaltainen laatuvaatimusten asettaja. (Mammano & Carsten 2003, 1-3.)

FCC:n ja CISPR:n häiriöille asettamien vaatimusten välillä on jonkin verran eroja raja-arvoissa. CISPR:n johtuville häiriöille asettamat arvot ovat pienemmillä taajuuksilla ja säteilevien häiriöiden testauksessa käytettävät välimatkat lyhyempiä. CISPR:n vaatimus mittaetäisyydestä on 10 metriä, kun puolestaan FCC:llä vastaava etäisyys vaihtelee kolmesta metristä 30 metriin. Seuraavista kuvioista sivulla 11 käy ilmi FCC:n ja CISPR:n raja-arvojen erot johtuvissa (kuvio 6) ja säteilevissä häiriöissä (kuvio 7), kun oletetaan FCC:n vaatimuksetkin 10 metriin. (Mammano & Carsten 2003, 1-3.)



KUVIO 6. Johtuvien häiriöiden rajat (FCC Part 15 vs. CISPR 22) (Mammano & Carsten 2003,1-4)



KUVIO 7. Säteilevien häiriöiden rajat (FCC Part 15 vs. CISPR 22) (Mammano & Carsten 2003, 1-4)

Näissä määrittelyissä annetut arvot ovat johtuvilla häiriöillä muotoa $\text{dB}\mu\text{V}$ suoraan mitattuina. Säteilevillä häiriöillä arvot esitetään yksikössä $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$, mikä tarkoittaa kentän voimakkuutta mitattuna antennin avulla. Arvot ovat desibeli-arvoja, jotka ovat todellisen mitatun jännitteen ja yhden mikrovoltin suhde. Laskukaava tälle toimitukselle on seuraavanlainen:

$$\text{dB}\mu\text{V} = 20\log_{10}\left[\frac{V}{1.0\mu\text{V}}\right] \quad (4)$$

Kaava 4 toimii sekä voltilla että voltia/metrillä (Mammano & Carsten 2003, 1-4).

Hyvin matalien energian määrien vuoksi laatuvaatimukset häiriöille on asetettu erittäin pieniin arvoihin. FCC:n asettamissa laatuvaatimuksissa yhden megahertsin taajuudella mitattuna jo 20 nW sähkömagneettista häiriötä aiheuttaa hylkäämisen. (Mammano & Carsten 2003, 1-2.)

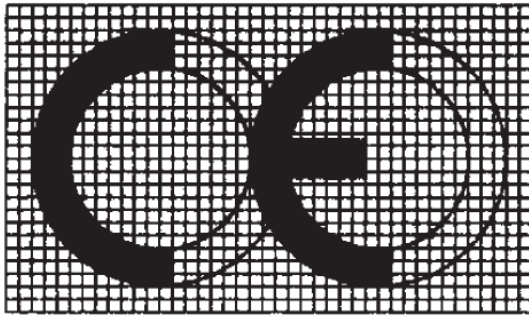
FCC:n asettamien määritysten mukaan vain vaihtovirran sisääntulolinjat ovat merkittäviä johtuvien häiriöiden kannalta, sillä niissä häiriövirta voi suurimmalla todennäköisyydellä kytkeytyä muihin järjestelmiin. Kuten aikaisemmin on todettu, johtuvien häiriöiden enimmäistaajuus on 30 MHz. Minimiarvo voi kuitenkin vaihdella standardin asettajasta riippuen. Yhdysvalloissa ja Kanadassa minimitaajuudeksi on yleisesti asetettu 450 kHz, mutta kansainvälisissä laatu-standardeissa se on yleensä 150 kHz. Lisäksi joissakin teleliikenteen ohjearvoissa vaaditaan testausta jopa 10 kHz:iin asti. (Mammano & Carsten 2003, 1-3.)

Radiotaajuisten häiriöiden alaraja on siis 30 MHz ja yläraja voi vaihdella muutamasta sadasta megahertsistä jopa gigahertsiin tai korkeammalle. Johtuvat häiriöt voidaan testata tavallisissa laboratorio-olosuhteissa spektrianalysointilaitteilla, mutta säteileville häiriöille tilat asettavat huomattavasti suuremmat vaatimukset. Ne vaativat, että mittaukset suoritetaan vapaassa tilassa. Tämän vuoksi mittaukset suoritetaan yleensä niille tarkoitetuissa paikoissa, joissa testin kulkua voidaan rajoittaa ja kontrolloida tarkasti. (Mammano & Carsten 2003, 1-3.)

CE-merkki

EU-direktiivien mukaisesti valmistettuihin laitteisiin tulee kiinnittää CE-merkki, joka on yhteiseurooppalainen vaatimustenmukaisuusmerkki. CE-merkki on viranomaisille tarkoitettu eräänlainen ”passi”, jonka turvin tuote voi vapaasti liikkua ETA-alueella. Vapaus tässä tapauksessa tarkoittaa kuitenkin vain direktiivin sisällään pitämää soveltamisalaa. CE-merkki ei kuitenkaan aina takaa vapaata liikkuvuutta. Esimerkiksi radiolähetinlaite voi kuulua direktiivin soveltamisalaan, mutta CE-merkki ei kaikissa tapauksissa yleensä riitä. Eri maiden telehallinnot voivat asettaa muita lisävaatimuksia ja ehtoja, kuten esimerkiksi laitekohtaisia käyttöluvia CE-merkityille laitteille. (EMC-direktiivin soveltaminen 1993, 10.)

CE-merkkiä voidaan käyttää vain sellaisissa tuotteissa, jotka vastaavat niitä direktiivejä, joissa edellytetään merkin käyttöä. Toisin sanoen sellaista tuotetta, jota mikään direktiivi ei koske, ei voida merkitä CE-merkillä, vaikka tuote olisikin täysin turvallinen. CE-merkki ei myöskään ole tae tuotteen korkeasta laadusta, vaan ilmaisee, että laite täyttää direktiivin mukaiset vaatimukset. Merkin käytön vastuu on laitteen valmistajalla, joka voi merkitä tuotteensa parhaaksi katsomallaan tavalla, kunhan merkintä täyttää sille asetetut vaatimukset. (EMC-direktiivin soveltaminen 1993, 10) CE-merkinnän vähimmäiskorkeus on 5 mm. Jos merkkiä pienennetään tai suurennetaan, sen on noudatettava alla olevan kuvion 8 mitta-suhteita. (Directive 2004/108/EC of the European Parliament and of the Council, 12.)



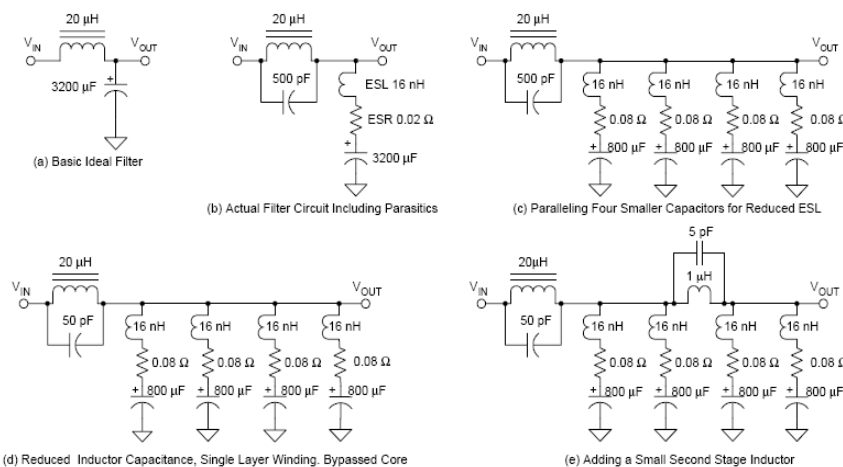
KUVIO 8. CE-merkin mittasuhteet (Directive 2004/108/EC of the European Parliament and of the Council, 12.)

4 SÄHKÖMAGNEETTISTEN HÄIRIÖIDEN VAIMENTAMINEN

Hakkuriteholähteissä sähkömagneettiset häiriöt ovat merkittävä huolenaihe tehonlähteiden nopeasti muuttuvien jännitteiden ja virtojen aallonmuotoihin kuuluvien korkeiden taajuuksien vuoksi. Sähkömagneettisten häiriöiden poisto vaatii äkillisesti muuttuvien virtojen ja jännitteiden aiheuttamien sähköisten kenttien tunnistamisen. (Mammano & Carsten 2003, 1-1.)

4.1 Eromuotoisten johtuvien häiriöiden vaimentaminen

Suodattimet ovat ensimmäinen keino, millä suojautuminen johtuvia häiriöitä vastaan kannattaa aloittaa. Kuviossa 9 esitetään kytkentöjä, joita voidaan käyttää suodattimien suunnittelussa. (Mammano & Carsten 2003, 1-6.)



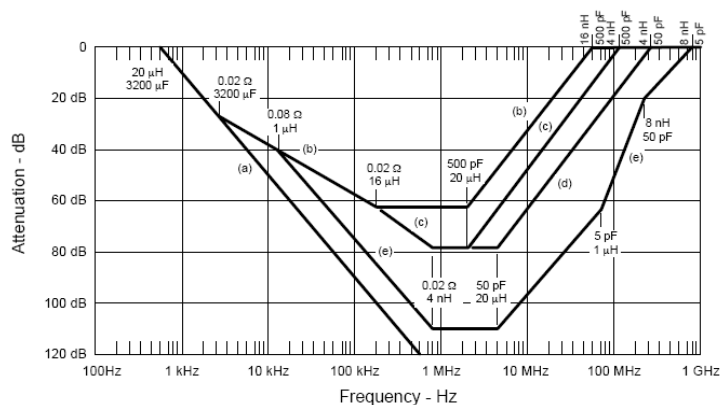
KUVIO 9. Eromuotoisen häiriön minimointi suodattimella vaatii huolellista paneutumista loisvärähtelyyn (Mammano & Carsten 2003, 1-6)

Näiden suodattimien ominaisuuksia tutkitaan jännitteen vaimenemisena pisteiden V_{IN} ja V_{OUT} välillä. Tässä tapauksessa V_{IN} on energian lähde ja V_{OUT} on tehonlähteen sisääntulo. Todellisuudessa nämä suodattimet vaimentavat virtaa, joka

kulkee V_{OUT} -pisteestä tehollähteeseen ja virtaa V_{IN} -pisteessä energianlähteestä. (Mammano & Carsten 2003, 1-6.)

Suojauttaessa eromuotoisia häiriöitä vastaan tulee suodatin kytkeä eromuotoisten vetojen väliin. Niinpä tarkasteltaessa kuvion 9 a-kohtaa tulee ideaalisen LC-suodattimen kondensaattorin negatiivinen napa kytkeä paluujohtimeen eikä maahan. On myös muistettava, ettei ideaalista suodatinta ole olemassa muuten kuin teoriassa. Todellisuudessa suodatin sisältää myös kelan yli muodostuvan hajakapasitanssin vaikutukset. (Mammano & Carsten 2003, 1-6.) Kuvion 9 b-kohdasta nähdään havainnollisesti kondensaattorin kanssa sarjaan piirretyt sen aiheuttamat sarjainduktanssit (ESL) ja sarjaresistanssit (ESR) eli kondensaattorin sijaiskytkennät. Sarjainduktanssi on kondensaattorin sisäistä induktanssia, ja sarjaresistanssi pitää sisällään kondensaattorin eristehäviöt sekä johdinresistanssin. (ABB Oy 2000, 20.)

Loisarvoja voidaan pienentää asettamalla useita pienempiä kondensaattoreita rinnan sen sijaan, että asetetaan yksi isompi. Kuvio 10 esittää kuinka ideaalinen suodatin toimisi ja kuinka suodatin todellisuudessa toimii. Kuvaajassa on piirrettynä käyrät kuvion 9 suodattimista. (Mammano & Carsten 2003, 1-7.)



KUVIO 10. Eromuotoisen häiriön suodattimen taajuuden vaimentuminen erilaisilla suodatinratkaisuilla (Mammano & Carsten, 1-6)

Kuvaaja a esittää ideaalista suodatinta. Kuvaajasta b huomataan, kuinka suodattimen todellinen toiminta on huomattavasti ideaalista heikompaa. Sen suodatus jää parhaimmillaankin hieman alle 60 dB. Vastaavasti kuvaaja c todistaa, kuinka pienempien kondensaattoreiden sarjaan kytkentä parantaa jonkin verran suodattimen ominaisuuksia. (Mammano & Carsten 2003, 1-7.)

Hajakapasitanssia voidaan vähentää sovittamalla suodattimeen yksikerroksinen kela, jonka käämin alku ja loppupäät ovat mahdollisimman kaukana toisistaan. Tässäkin tapauksessa tulee kuitenkin ottaa huomioon kelan varauskyky käämistä sydämeen. Tämä johtuu siitä, että sydän toimii myös johtimena, jolloin hajakapasitanssi käämistä sydämeen aiheuttaa samankaltaisen vaikutuksen kuin rinnankytketyillä käämeillä. Kuvioiden 9 ja 10 d-kohdat ilmaisevat, kuinka tarkoin asetetulla kelalla voidaan merkittävästi vähentää suodattimen toimintaan vaikuttavaa hajakapasitanssia. Asettamalla rinnankytkettyjen kondensaattoreiden väliin kela (kuvio 9 b) saavutetaan yleensä merkittävä vaimennus, kuten kuviosta 10 b ilmenee. (Mammano & Carsten 2003, 1-7.)

LC-suodattimia voidaan tutkia myös resonanssiominaisuuksien pohjalta. Yksinkertainen suodatin on resonoiva, ja sen luonnollinen taajuus saadaan kaavan 5 mukaan, jossa f_r on resonanssitaajuus.

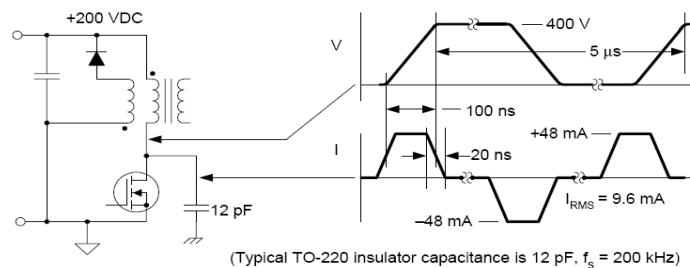
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5)$$

Tähän laskutoimitukseen liittyy kolme ongelmaa. Sisääntulojännitteen askeltava sovellus voi aiheuttaa kondensaattorin jännitteen kiertämisen arvoon, joka voi olla lähes kaksinkertainen sisääntulojännitteeseen nähden. Näin ollen se voi vahingoittaa kondensaattorin perässä olevaa muuntajaa. Toinen merkittävä ongelma ilmenee, jos sisääntulon verkkojohtimessa on mahdollisuus suurtaajuiseen häiriöön. Tällöin mikä tahansa suodattimen resonanssitaajuudelle osuva häiriön osatekijä vahvistuu hyvyysluvun ”Q” verran. Kolmas ongelma on, että suodattimen efektiivinen lähtöimpedanssi, jos sitä ei vaimenneta, kasvaa resonanssitaajuudella ja kasvattaa värähtelyjen kirjoa suodatinta seuraavan muuntimen tuloimpedanssissa. Kaikkien kolmen häiriön vaimentaminen on

tärkeää. Hyvä lähtökohta vaimentamiselle on lisätä sarjaankytketyt vastus ja kondensaattori (ns. RC-piiri) suodattimen kondensaattorin yli. (Mammano & Carsten 2003, 1-7.)

4.2 Yhteismuotoisten maahäiriöiden vaimentaminen

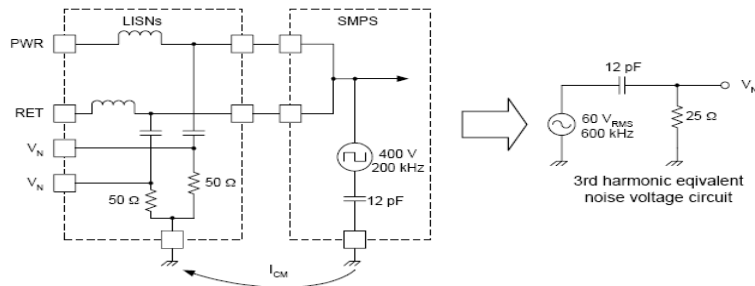
Kuten aikaisemmin on todettu, yhteismuotoiset häiriöt aiheutuvat pääsääntöisesti maahan johtuvasta hajakapasitanssista. Kuviossa 11 on esitetty yksinkertaistettu esimerkki päähäiriön lähteestä. Tyypillinen yhteismuotoinen häiriö syntyy kun FET-transistorin nielujännitteen aallonmuoto kytkeytyy kapasitiivisesti runkomaadoitettuun jäähdytinlevyyn. (Mammano & Carsten 2003, 1-8.)



KUVIO 11. Tyypillinen yhteismuotoinen häiriö FET-transistorin nielujännitteen aallonmuodon kytkeytyessä kapasitiivisesti runkomaadoitettuun jäähdytinlevyyn (Mammano & Carsten 2003, 1-8).

Kuvassa on epäsymmetrinen tehon esitys kytkentöjä vaihtelevasta FET-transistorista, joka vuorottelee muuntajan ajamisen ja sen 2 V:n reset-jännitteen estämisen välillä. Tällöin voidaan olettaa, että 200 kHz:n kytkentätaajuudella FET:n nielujännite vaihtelee 400 voltia. Sen nousu- ja laskuaika on 100 ns, kuten kuviosta käy ilmi. Jos esimerkiksi tässä tapauksessa FET on TO-220 koteloitu ja kiinnitetty maadoitettuun jäähdytinlevyyn niin, että välissä on eriste, voi kytkeytyvä hajakapasitanssi nielusta maahan olla 12–32 pF välillä. (Mammano & Carsten 2003, 1-8.)

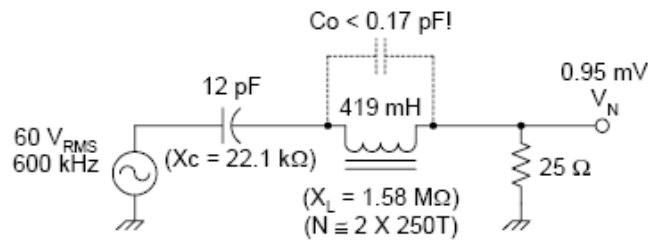
Kuvio 12 havainnollistaa, kuinka häiriövirta kulkeutuu takaisin tehojohtimiin kahden $50\ \Omega$:n rinnankytketyn keinoverkkovastuksen läpi. Samalla se aiheuttaa häiriötä jokaiseen keinoverkon ulostuloon. (Mammano & Carsten 2003, 1-8.)



KUVIO 12. Suojamaahan indusoituneella virralla on paluureitti LISN-piiriin ulostulon impedanssin kautta (Mammano & Carsten 2003, 1-9)

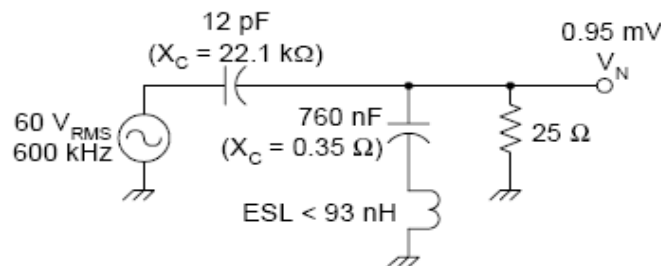
CM-suodattimen liittäminen sarjaan virran kulkureitin kanssa on ratkaisu edellä esitetylle ongelmalle. Liittäminen tapahtuu helpoiten käyttämällä kuvion 12 tapaista häiriöjännitepiiriä. Piiri on kehitetty käynnistymään 400 V:n huipusta-huippuun aallonmuodolla FET-transistorin nielujohtimessa. Tässä tapauksessa 50 % aallon jaksosta on 200 V ja kytkentätaajuus on 200 kHz, joka vastaa FCC:n määrittelemiä raja-arvoja. Tarkempaa huomiota kiinnitetään kolmanteen yliaaltoon merkittävimpänä tekijänä häiriöihin. Tämä signaali tuottaa lähes 68 mV häiriöjännitettä rinnankytkettyjen keinoverkkovastusten yli. Verrattaessa tuota arvoa FCC:n asettamaan 600 kHz:n taajuuden 1 mV:n arvoon huomataan sen olevan merkittävän suuri A-luokan laitteille (B-luokan laitteille arvo on jopa 250 μV). (Mammano & Carsten 2003, 1-9.)

Jotta 68 mV:n suuruista häiriötä voitaisiin vaimentaa alle 1 mV:iin, täytyy lisätä suodatin, jonka vaimennus 600 kHz:ssä on 37 dB. Se voidaan tehdä muun muassa lisäämällä yhteismuotokuristin. Kuviossa 13 seuraavalla sivulla on esimerkki häiriöjännitepiiristä, johon on liitetty CM-kuristin. Kuvioon on laskettu tarvittava induktanssi. Kuvioista näkyy, että jos tarvittava induktanssi olisi 419 mH, ei kuristimen yli menevä hajakapasitanssin tulisi maksimissa olemaan kuin 0,17 pF, jotta saavutettaisiin 37 dB:n vaimennus. (Mammano & Carsten 2003, 1-9.)



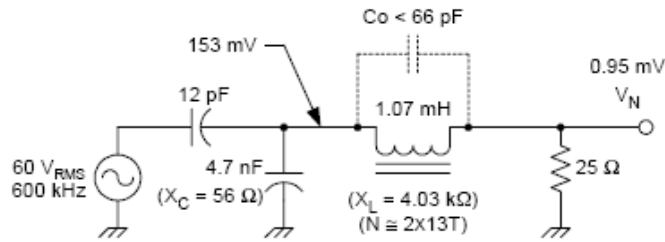
KUVIO 13. CM-kuristin häiriöjännite piirissä (Mammano & Carsten 2003, 1-9)

Toinen vaihtoehto on rinnankytketty kondensaattori vähentämään 25Ω kuorman impedanssia alle $1,0 \text{ mV}$ rajan. Edellisen tapauksen mukaisesti laskettuna saadaan tarvittavaksi kondensaattorin arvoksi 760 nF , jonka loisinduktanssi (93 nH) vastaa vaimennuksen vaatimuksia. Alla olevassa kuvion 14 ratkaisussa on kuitenkin seuraavanlainen ongelma: jos tehonlähteen sisääntulo on vaihtovirtaa, siihen liittyy yleensä turvallisuusmääritys, joka rajoittaa sisääntulolinjan kondensaattorin arvon alle 10 nF . (Mammano & Carsten 2003, 1-9.)



KUVIO 14. Rinnankytketty kondensaattori häiriöjännitepiirissä (Mammano & Carsten 2003, 1-9)

Paras ratkaisu edellä esitettyjen ongelmien parantamiseksi on liittää häiriöjännitepiiriin sekä kela että rinnankytketty kondensaattori. Tällöin tulee molemmilla komponenteilla arvoja laskettaessa ottaa huomioon myös oletettavat loisarvot. Ratkaisumalli tälle vaihtoehdolle nähdään kuvioista 15. (Mammano & Carsten 2003, 1-9.)



KUVIO 15. Sekä kela että kondensaattori häiriöjännitepiirissä (Mammano & Carsten 2003, 1-10)

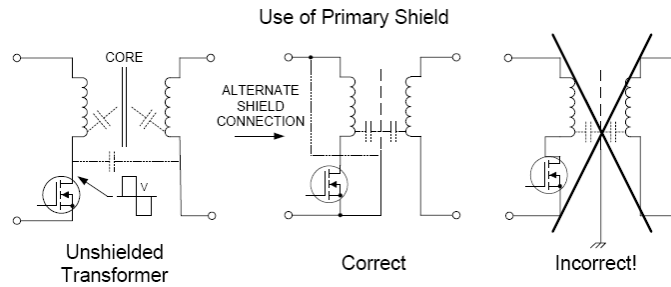
Kuviossa 15 näkyvä kela on useimmiten yksisydäminen ja käämitty kahdesta käämistä vastakkain siten, että tehonlähteen sisääntulovirran aiheuttama vuo kumoutuu, eikä näin vaikuta sydämen kyllästymiseen (Mammano & Carsten 2003, 1-9).

4.3 Muita yhteismuotoisen häiriön lähteitä

Tehonkytkinten nieluliitännät eivät ole ainoita paikkoja, joissa korkeat jännitteet voivat aiheuttaa maahäiriöitä. Jäähdytinlevyt muodostavat toisen ongelma-alueen, sillä turvallisuusrajoitusten mukaisesti ne eivät saa latautua korkeajännitteiseen potentiaaliin. Ongelma ratkeaa, jos jäähdytinlevy on niin pieni, että se saadaan suljettua kotelon sisälle ja siten yhdistettyä piiriin maahan laitemaan sijaan.

Tällainen sähköisesti maahan kytketty ja eristetty kiinnitysjalusta voi mahdollistaa suurempien ja maadoitettujen jäähdytinlevyjen käytön kytkemällä kapasitiivisesti kytkeytyneet häiriöt maahan. Siinä häiriöt on helpompi vaimentaa. (Mammano & Carsten 2003, 1-11.)

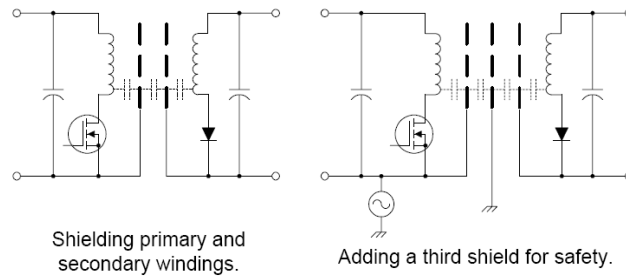
Muuntimilla sopiva tapa johtaa yhteismuotoiset häiriöt pois maasta on käyttää käämien välissä sähköstaattista suojausta. Käämien välisestä sähköstaattisesta suojusta on esimerkki seuraavalla sivulla olevassa kuviossa 16.



KUVIO 16. Sähköstaattinen suoja muuntajassa (Mammano & Carsten 2003, 1-11)

Kelojen välistä kapasitanssia (toisinaan nimetty eristys- tai kytkentäkapasitanssiksi) muuntajissa voidaan merkittävästi vähentää suojauksella käämien välissä. Kelojen välinen suoja, jota kutsutaan Faradayn suojaksi/häkiksi tai sähköstaattiseksi suojaksi, koostuu ohuesta johtavasta metallilevystä, joka on kerroksittain käämien päällä. Tämä voidaan yhdistää joko ensiö- tai toisiokäämin yleiseen pisteeseen, yleensä maa tai lähde on riittävä. (O'Hara 1998, 38.)

Sähköstaattinen suojaus voi oikein sovellettuna estää muuntajan läpi hajakapasitanssina kytkeytyvää ac-jännitettä muodostumasta yhteismuotoiseksi häiriöksi kääntämällä kytkeytyneen häiriön ensiöpuolen maajohtimeen. Suoja tulisi kytkeä korkeajännitteiseen johtimeen tai sen paluujohtimeen. Periaatteena on, että jos teho FET:n jännitteen nousunopeus on suurempi käynnistettäessä kuin suljettaessa, tulee suoja yhdistää paluujohtimeen. Jos taas suljettaessa nousunopeus on suurempi, yhdistetään suoja positiiviseen johtimeen. Kuvio 17 sivulla 22 esittää kaksi muuta vaihtoehtoa suojaukseksi. Oikeanpuoleisessa kuvassa suojat on asetettu sekä ensiö- että toisiokäämin väliin ja vasemman puoleisessa kuvassa mukaan on liitetty vielä kolmas suoja turvallisuuden lisäämiseksi. (Mammano & Carsten 2003, 1-12.)

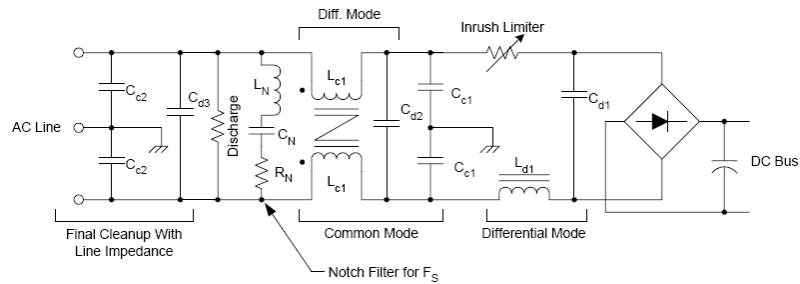


KUVIO 17. Vaihtoehtoisia suojausmenetelmiä (Mammano & Carsten 2003, 1-12)

Suoja ei yleensä vaikuta teho- ja pienentaajuuden sovelluksissa aallon muotoon, mutta signaalisovelluksissa voi tapahtua nousujan pienentyminen jos suoja on sovellettu suuren taajuuden signaaleille (suoja tarjoaa kapasitiivisen kytkeytymisen maahan ja niin ollen toimii alipäästösuodattimena). Korkean tehon hakkuri-teholähteissä tämä vaimentuminen kelojen välisessä kapasitanssissa on yleensä yhdistetty vuoto induktanssin nousuun, mikä voi rasittaa tehokomponentteja. Täysin kotelolla suojattuja muuntajia on saatavilla muun muassa verkkojännitesovelluksille. Suojan varsinainen hyöty on pääasiassa verkko-jännitteen matalien taajuuksien hurinan ehkäiseminen häiritsemästä komponentteja, jotka on sijoitettu lähelle muuntajia. Suoja voi antaa käämilangalle hiukan ylimääräistä vastustuskykyä radiotaajuisiin häiriöihin, mutta se ei ole sen alkuperäinen tarkoitus ja sen hyöty on pieni. (O'Hara 1998, 39.)

4.4 Yhteismuotoinen ja eromuotoinen suodatin samassa piirissä

Maksimikapasitanssi on rajoitettu. Niinpä tarvittava kapasitanssi jaetaan yleensä kahteen kondensaattoriin ja sijoitetaan sopivan kokoinen vastus sarjaan toisen kondensaattorin kanssa. Kuviossa 18 seuraavalla sivulla on esitetty suodatin-esimerkki, joka sisältää sekä yhteismuotoisen että eromuotoisen suodattimen. Kuvassa sisääntulon kuorma kulkee vasemmalta oikealle, AC-linjasta tehonlähteen sisääntulon tasasuuntaajaan. Häiriösignaali puolestaan kulkeutuu oikealta vasemmalle, tehonlähteen sisäisestä häiriölähteestä takaisin AC-linjan liitännään. Nämä liitännät ovat ulkoisia sisääntulotehon liitännöitä. (Mammano & Carsten 2003, 1-10.)



KUVIO 18. Sekä eromuotoisten että yhteismuotoisten häiriöiden suodattimet samaan johtuvien häiriöiden suodatuspiiriin liitettynä (Mammano & Carsten 2003, 1-10)

Kuvion 18 suodattimessa kondensaattori C_{d1} ja kela L_{d1} muodostavat ensisijaisen eromuotoisten häiriöiden suodattimen (DM-suodattimen). Kondensaattorit C_{c1} (2 kpl) ja kela L_{c1} muodostavat yhteismuotoisten maahäiriöiden suodattimen. Kelassa L_{c1} (ns. yhteismuotokuristin) on kaksi käämiä kierrettynä yhden sydämen ympärille. Kelan käämien välisen vuotoinduktanssin suodattimena ja samalla suurempitaajuisten DM-häiriöiden suodattimen osana toimii kondensaattori C_{d2} . L_N ja C_N muodostavat piirissä kaistanestosuodattimen (Notch) kytkentätaajuudella. Vastus R_N tarjoaa sekä vaimennusta että levittää hieman kaistaneston leveyttä. (Mammano & Carsten 2003, 1-10.) Kaistanestosuodatin on yksittäisen häiriön poistamiseen soveltuva kapeakaistainen suodatin. (Luukko 2004).

Kuvion 18 suodattimen kondensaattorit C_{d3} ja C_{c2} (2 kpl) on tarkoitettu suodatuksen viimeistelyyn. Ne on sijoitettu vasemmalla heti johtimien alkupäähän, johon LISN-piirien pari voitaisiin lisätä mittaamaan häiriötehoa. Nämä kondensaattorit suodattavat määrittelemätöntä AC-linjan impedanssia. Niiden suorituskykyä on vaikea ennustaa. (Mammano & Carsten 2003, 1-10.)

On olemassa myös muita komponentteja, joilla voidaan vaimentaa häiriöitä. Niitä ovat muun muassa sulakkeet ja muut sovelluksesta riippuvaiset laitteistot. (Mammano ja Carsten 2003, 1-10.) Kyseisiä komponentteja ei käsitellä tässä opinnäytetyössä.

4.5 Säteilevien häiriöiden vaimentaminen

Sähköinen kenttä syntyy jäähdyttimien ja magneettisten sydämien kaltaisilla pinnoilla, jotka toimivat antenneinein kytkeytyneen jännitteen johdosta. Näiltä kentiltä voidaan useimmiten suojautua oikeanlaisella koteloinnilla, jossa johtava materiaali kumoaa kentän muuttamalla sen virraksi. Johtavan koteloinnin avulla virta saadaan johdettua maadoitukseen, missä se yhdistyy johtuviksi häiriöiksi ja suodatetaan sen mukaisilla suodattimilla. (Mammano & Carsten 2003, 1-13.)

Magneetikentän aiheuttama sähkömagneettinen energia voi säteillä tehollisesti hajakenttänä muuntajien tai kelojen kautta. Häiriöitä voi säteillä myös äkillisesti muuttuvien virtojen kulkiessa johtavassa silmukassa aiheuttaen magneettisia kenttiä. Tällaisissa tapauksissa laitteen sisäiset johdotukset ovat tärkeässä osassa ja ne tulee ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa. (Mammano & Carsten 2003, 1-13.)

Magneetikentät eivät ole kovin helposti suojattavissa. Kenttää estämään tarvitaan magneettista materiaalia. Kyseinen materiaali on hyvin kallista, ja sen magneettiset ominaisuudet hiipuvat äkillisesti suurempitaajuisilla häiriöillä. Myös ei-magneettista materiaalia voidaan käyttää suojaamaan magneettisilta häiriökentiltä. Tässä tapauksessa magneettinen häiriö indusoi pyörrevirtaa vuotamaan koteloon, joka sitten puolestaan muodostaa häiriön purkavan magneetikentän. Tällaisessa tapauksessa kaikki aukkoaukot ja liitoskohdat voivat kuitenkin päästää yllättävän suuria määriä häiriöitä pakoon kotelosta. Näin ollen paras tapa estää tämänkaltaisia ongelmia on pyrkiä minimoimaan virtasilmukat ja magneetikentät itse häiriön lähteestä. (Mammano & Carsten 2003, 1-14.)

Hakkurikäyttöön suunnitelluissa muuntajissa häviöinduktanssi ensiö- ja toisio- käämien välillä voi olla haitallinen laitteen sähköiselle suorituskyvyllä, mutta se voi myös myötävaikuttaa magneetikenttiin. Häviöinduktanssi aiheuttaa poikittais-suuntaisen magneetikentän käämien välille. Muuntajan sydän voi ”kaapata” osan tästä häiriökentästä, mutta jäljelle jäävä kenttä muodostaa ympärillä olevaan tilaan säteilevän magneettisen dipolin. (Mammano & Carsten 2003, 1-14.)

4.6 Komponentit sähkömagneettisia häiriöitä vaimentavissa suodattimissa

Kelat ovat yleisesti käytettyjä energian varastointiin DC-DC muuntimissa, missä kelan mallilla voi olla huomattava merkitys piirin EMC-ominaisuuksiin.

Tehopiireissä paras vaihtoehto on rengaskela, lähes olemattoman häiriösäteilyn vuoksi. Joka tapauksessa jos rengaskela kyllästyy, korkean virran johtuvat häiriöt voidaan havaita. Yleensä puolamainen muoto on hyvä komp-romissi matalan häiriösäteilyn ja korkean kyllästymisvirran väliltä. Erityisesti LC-suodattimet on helposti järjestetty muodostamaan impedanssin ja sovituksen eri impedanssisten piirien välille, kuten esimerkiksi matalaimpedanssinen lähde ja korkeaimpedanssinen digitaalipiiri. Korkea impedanssi tulee kytkeä sarjakelan läpi, kun taas matalaimpedanssille riittää läpivienti kondensaattoriin rinnastettavan kelan läpi. Yksinkertainen passiivinen suodatin on helppo suunnitella ja toteuttaa, ja suurtaajuuden estäminen voidaan helposti hoitaa sarjaan kytketyillä suodattimilla. (O'Hara 1998, 33–34.)

CM-kuristimia (common mode) on yleensä pidetty keloina, sillä niiden pää-tarkoitus on suodattaminen, mutta niillä on identtinen rakenne muuntimien kanssa. CM-kuristimet on yleisimmin käämitty rengasmallisen sydämen ympärille säteily- ja herkkyysongelmien minimoimiseksi, koska ne saatetaan asettaa toisten suodatinkomponenttien ja signaalien I/O-porttien läheisyyteen. (O'Hara 1998, 40.)

Kuristimet on suunniteltu erityisesti häiriöiden vaimentamiseen ja suodattamiseen. Tärkeimpiä suodatuskohteita ovat ensiö- ja vuotoinduktanssit. Ensiöinduktanssi edellyttää eromuotoisen häiriön suodattimen, joka on samankaltainen kuin yksikierroskela. Vuotoinduktanssi tuottaa suodattimen yhteismuotoiselle häiriölle jokaisen vedon ja järjestelmän maan välille, jos se on kapasitiivisesti kytketty. Vuotoinduktanssi voi aiheuttaa myös yhteismuotoisen häiriön yksinkertaisen magneettisen absorption kahden vedon välille, kun sitä käytetään ilman referenssi-kondensaattoreita. Suodatuksen taso riippuu ylimääräisten kondensaattorien lisäämisestä tai hajakapasitanssista järjestelmässä. Helppo tapa suunnitella yhteismuotokuristimen toiminta on suodatin järjestelmissä, kuten verkkojännitesuodattimena. Verkkojännitesuodattimen tarkastelu tarjoaa hyvät lähtökohdat kaikkien

passiivisten suodattimien suunnitteluun. Ylimääräistä huomiota verkkojännite-suodattimessa vaatii maan vuotovirtavaatimukset. Se pitää ottaa huomioon jokaisessa suunnittelun vaiheessa, kun käytetään kondensaattoria johdattaessa radiotaajuisten häiriöiden suoja maahan. Jos suojavaa tai runko on yhteinen verkkojännitemaadoituksen kanssa, pitää vuoto summata turvallisten vuotovirtavaatimusten takaamiseksi. (O'Hara 1998, 40.)

Normien mukainen verkkojännitejohtimen suodatin koostuu yleensä viidestä komponentista: X-kondensaattorista sisääntulossa jännitteisen ja neutraalin vedon välissä, yhteismuotokuristimesta sisääntulon ja ulostulon välissä, X-kondensaattorista ulostulossa jännitteisen vedon ja nollavedon välissä ja lopulta Y-kondensaattoreista ulostulovetojen ja maadoituksen välissä. Verkkojännitelähde on kytketty sisääntulopuolelle ja laitteisto ulostulopuolelle. Monissa järjestelmissä on myös suositeltavaa lisätä iso purkuvastus varmistamaan, että kondensaattori on purettu, kun teho poistetaan. Tämä ehkäisee mahdollisen iskuriskin verkkojännitejaloissa. Syötettäessä virtaa suoraan lineaariseen muuntajaan tätä vastusta ei tarvita. (O'Hara 1998, 41.)

Verkkojännitesuodattimet toimivat kahdessa suodatustilassa, eromuotoisessa (AC-jännite syöttövetojen välissä) ja yhteismuotoisessa (AC-jännite syöttövedon ja maan välissä). Eromuotoinen tila suodattaa häiriötä syöttövetojen välillä. Yhteismuotoinen suodatin vähentää häiriötä maasilmuikoista ja maan vaihesiirtoja järjestelmän välillä. Vastaavanlainen piiri eromuotoiselle signaalille on normaali pi-suodatin (pi-filter). Siinä X-kondensaattorit hallitsevat piiriä ja yleensä niillä on merkittävästi korkeampi kapasitanssi kuin Y-kondensaattoreilla. Voimakas induktanssi jokaisessa johtimessa on yhteismuotokuristimen vuotoinduktanssia, ja niin ollen tämä on huomattavasti matalampaa kuin yleensä ilmoitettu yhden käämin yksikköinduktanssi. Signaalihohtimien suodattimissa, missä turvallisuusvaatimukset eivät ole niin kriittisiä, kaksijohtiminen kierretty käämi voi olla käytössä. Joka tapauksessa vuoto-induktanssia on edelleen hieman verrattaessa ensiöinduktanssiarvoon. (O'Hara 1998, 41.)

Kondensaattorien arvon valintamahdollisuus voi olla rajoitettu. Tyypillisesti X-kondensaattoreiden arvot ovat 1 nF – 2.2 µF. Kaksi X-kondensaattoria voi olla

eriarvoisia. Mikä voi olla jopa hyödyllistä, koska on epätodennäköistä, että verkkojännitejohdin ja järjestelmä ovat samassa impedanssissa. Tämän vuoksi suodattimien taajuustutkimus on vaikeampaa ilman takautuvaa simulointia, mutta sallii impedanssin täsmäämisen sekä sisääntulossa että ulostulossa. Suuren taajuuden signaaleille käytetään pienempiarvoisia kondensaattoreita. (O'Hara 1998, 41–42.)

Suodatettaessa hakkuriteholähdettä impedanssin tulisi olla noin 0.1Ω . X-kondensaattorit eivät ole suositeltavia. Kulmataajuutta ei ole niin helppo arvioida molemmissa haaroissa olevien kelojen vuoksi. Joka tapauksessa samanarvoisilla X-kondensaattoreilla ja hyvin pienillä y-kondensaattoreilla likiarvo voidaan johtaa kaavasta 6.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_L C_x}} \quad (6)$$

Kaksi X-kondensaattoria luo pi-suodattimen antamalla teoreettisen 60 dB/dekadi-vaimennuksen kulmataajuuden jälkeen. Yhteismuotoisilla häiriöillä vastaava piiri on yksinkertainen LC alipäästösuodatin, joka on liitetty sekä jännitteeseen että nollajohtimeen. Kulmataajuus yhteismuotoisille signaaleille saadaan alla olevasta kaavasta 7.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p 2C_y}} \quad (7)$$

Vaimennus on lähes 40 dB/dekadi perustuen 50Ω hajaimpedanssiin. (O'Hara 1998, 42.)

4.7 Jäähdytinlevyt

Vaikka jäähdytin ei ole sähköinen komponentti tai välttämättä yhdistettynä suoraan piiriin, se voi toimia sekä sähkömagneettisena suojana että kapasitii-

visena kytkentänä radiotaajuisille signaaleille. Kun jäähdytyslevy on yhteydessä aktiivisiin komponentteihin, kuten diodeihin ja transsitoreihin, jotka ovat sähköisesti eristetty mutta termisesti kytketty samaan jäähdytinlevyyn, jäähdytin aiheuttaa niiden välille kapasitiivista kytkeytymistä. Jos yksikään komponenteista on altistunut suuren taajuuden signaaleille tai on erityisen herkkä sähkömagneettisille häiriöille, tulee ehdottomasti sijoittaa eriste jäähdytinlevyn ja laitteen välille kytkeytymisen estämiseksi. Ohut levy kuparia ja paikallinen maakytkentä jäähdytin ja aktiivisten laitteiden välissä pitäisi vähentää kapasitiivista kytkeytymistä komponentin ja jäähdytin välillä noin 6 dB tai enemmän. (O'Hara 1998, 106.)

Vaihtoehtoisesti saattaa olla mahdollista yhdistää sähköisesti kaikki jäähdyttimet maahan. Kapasitiivisen kytkeytymisen vaikutus vuotovirtaan pitää ottaa huomioon erityisesti jos käytetty maadoitus on verkkojännitteen maakytkentä. Tämä järjestely voi nostaa koko piirin suojausta ilman erityisen suojan käyttöä ja ilman ylimääräisiä kustannuksia. Mitä tahansa metalloitua aluetta, kuten jäähdytinlevyjä, ei saisi jättää sähköisesti kellumaan. Ne tulisi yhdistää joko suoja- maahan tai piirinmaahan. Kelluvat metallikerroksiset alueet ovat potentiaalisia radiotaajuisen kytkeytymisen aiheuttajia ja voivat luoda resonanssia sekä säteillä sisäisesti laitteistoon. Ne voivat myös kuljettaa sisäistä häiriötä ulos laitteistosta. (O'Hara 1998, 107.)

4.8 Ferriittiset materiaalit vaimentamisessa

Ferriittihelmet ovat suoranaisesti yksikierroskeloja. Yhden kierroksen kelojen etu on hyvin suuren taajuuden vaimentamisen kantama (ferriittinen materiaali on kehitetty erityisesti suuren taajuuden toimintoihin) hyvin vähäisellä DC:n ja matalien taajuuksien (muutamia satoihin kHz asti) häviöillä. Ferriittihelmet ovat käteviä, koska ne voidaan asentaa johdatuksiin jälkeenpäin, kun laite on jo suunniteltu. Niin ollen suunnittelun loppuvaiheessa ilmeneviä suurtaajuisia ongelmia on helppo korjata. Huono puoli on se, että ferriittihelmillä on erittäin matala vaimennustaso. (O'Hara 1998, 31.)

Ferriittikiinnikkeet toimivat lähes samalla tavalla kuin helmet, paitsi että ne yleensä kiinnitetään kaapeliin. Ne vaimentavat sekä yhteismuotoista että eromuotoista häiriötä. Vaimennus tapahtuu tässäkin tapauksessa suurtaajuusella alueella ja kiinnike voidaan kiinnittää myös jälkikäteen. Vaikutus signaalien vääristymiseen pitää muistaa tässä tapauksessa varsinkin jos käytetään suurtaajuisia signaaleja kaapelissa sekä erityisesti käytettäessä epäsymmetrisiä signaaleja. (O'Hara 1998, 31)

Sekä helmet että kiinnikkeet ovat hyödyllisiä erityisesti sähköstaattisten purkausten hetkellisissä energianhäviöissä johdatuksissa ja kaapeleissa. Ferriitti suodattaa paljon nopeasti nousevareunaisia energioita ja vaimentaa johdatuksen tai kaapelin lopussa näkyviä hetkellisiä häiriöitä. Suurempia vaimennuksia saadaan käyttämällä suurempia ferriittihelmiä ja kiinnikkeitä tai lisäämällä niitä enemmän samaan johdatukseen tai kaapeliin. Markkinoille on tulossa useita pintaliitoshelmiä jotka sisältävät yksittäisen johtimen. Ne eivät ole enää yksinomaan jälkeinpäin lisättäviä. (O'Hara 1998, 33)

4.9 Mittausmenetelmät

Häiriöiden mitatut arvot voidaan ilmaista kolmella tavalla. Nämä ovat peak, quasi-peak ja keskiarvo (average). Eri taajuusalueiden ominaisarvot on ilmoitettu CISPR16-standardissa. Kantoaaltosignaali voi olla vaihtumisväliltään moduloitu, ja sekä kantoaallot että laajakaistainen häiriö voidaan pulssittaa. Mitattu taso eri modulaatioille riippuu käytetystä testausmenetelmästä. (Williams 1992, 54.)

Peak

Peak-menetelmä reagoi lähes silmäräpäyksessä signaalin huippuarvoihin eli piikkeihin ja purkaa ne lähes välittömästi. Jos vastaanotin on asetettu yksittäiselle taajuudelle, peak-menetelmällä mitattu tulos noudattaa signaalin kulkua tarkasti. CISPR-standardin asettamat määräykset häiriöille eivät hyväksy peak-menetelmää

testausmenetelmänä, mutta sen reagointinopeus sopii hyvin virheenmäärittelyyn tai nopeaan häiriöiden vilkaisuun. (Williams 1992, 55.)

Keskiarvo

Keskiarvomenetelmä mittaa signaalin häiriöitä keskiarvona. Jatkuvilla signaaleilla tämä tarkoittaa samaa kuin huippuarvo, mutta pulssitetuilla tai moduloiduilla signaaleilla keskiarvotaso on matalampi kuin peak-menetelmässä. Osa standardeista vaatii käytettäväksi keskiarvomenetelmää johtuvien häiriöiden mittauksessa. Tämän menetelmän raja-arvot ovat 10–13 desibeliä matalammalla kuin quasi-peak-menetelmässä. Helppo tapa tehdä keskiarvomittaus spektrianalysaattorilla on rajoittaa paikanilmaisimen kaistanleveys tarkasti matalimman odotetun modulaation tai pulssin taajuuden alapuolelle. (Williams 1992, 55.)

Quasi-peak

Quasi-peak menetelmä on peak-menetelmä painotetuilla lataus- ja purkuajoilla. Häiriöt matalammilla pulssien toistumistaajuuksilla ovat yksilöllisesti vähemmän häiritseviä radiovastaanotossa kuin korkeilla pulssin toistumistaajuuksilla. Tämän vuoksi quasi-peak-vaste jälkivaimentaa piikin vastetta matalammilla toistumistaajuuksilla. (Williams 1992, 55.)

Quasi-peak- tai keskiarvomenetelmällä mitattu pulssitettu signaali matalalla toimintajaksolla on tasoltaan huomattavasti matalammalla kuin sen peak-taso. Tämä johtuu toimintajaksosta riippuvaisesta osatekijästä ja quasi-peak-menetelmän suhteellisesta aikavakiosta sekä pulssin toistumistaajuudesta. Luotettavan mittaustuloksen saamiseksi tulisi tunnistimeen tulevan signaalin olla vääristymätön huomattavasti korkeammilla tasoilla kuin tunnistimen ulostulossa. Näin ollen, mitä matalampi pulssin toistumistaajuus on, sitä korkeampi signaalin peak-arvo ulostulotasossa tulee olemaan. (Williams 1992, 56.)

5 LABORATORIOMITTAUKSET

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin mittaamalla johtuvien häiriöiden vaimentamista hakkuriteholähteen sisääntulossa. Tutkimus tehtiin Murrelektronik Power Oy:n tuotekehityslaboratoriossa olevilla mittalaitteilla. Tutkittava laite oli malli 85163-tehonlähde, joka on A-luokan eli teollisuuskäyttöön tarkoitettu laite. Siinä tutkittiin tulopiirin kondensaattoreiden ja kuristimen vaikutusta johtuviin sähkömagneettisiin häiriöihin.

Mitattava laite liitettiin mittalaitteisiin LISN-keinoverkon kautta, joka oli liitettynä Tektronix spektrianalysointilaiteeseen. Spektrianalysointilaite oli liitettynä PC-tietokoneeseen, jossa oli asennettuna Tektronix-testiohjelma (Commercial EMI Test Software). Mittaustulokset tulostettiin näytöltä tietokoneeseen liitettyllä tulostimella. Tässä opinnäytetyössä mitattiin häiriöt sisääntulopiiristä ohjelman CISPR/VDE Conducted Emission Peak-testillä. Ohjelma tarjosi myös monia muita testausmahdollisuuksia, kuten esimerkiksi FCC:n standardien mukaisen testauksen tai quasi-peak-testin.

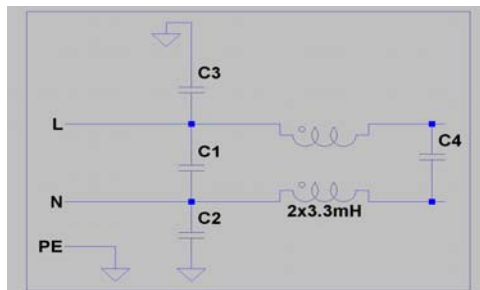
CISPR-standardin mukainen peak-testi testasi laitteen tulopiirin häiriöitä taajuusalueella 140 kHz – 30 MHz. Tektronix-testiohjelma ajettiin luokan A CISPR-peak-testillä. Testi testasi laitteen häiriöt neljällä eri taajuusalueella, jotka olivat osin päällekkäisiä. Taajuusalueet olivat testin ensimmäisessä vaiheessa 140 kHz – 3 MHz, toisessa vaiheessa 2,5 MHz – 11 MHz, kolmannessa vaiheessa 10 MHz – 20 MHz ja neljännessä vaiheessa 19 MHz – 30 MHz.

Kuviossa 19 seuraavalla sivulla on esitetty tämän opinnäytetyön tutkimuksissa käytetty mittalaitteisto. Alimmaisena kuvassa näkyy keinoverkko. Sen päällä oli tulostin, jolla kuvaajat tulostettiin. PC-tietokoneen alapuolella sijaitsi tietokoneeseen kytketty spektrianalysointilaite. Tietokoneessa oli auki Dos-pohjainen Tektronix-ohjelmisto. Laite kytkettiin LISN-keinoverkon välityksellä spektrianalysointilaiteeseen ja suoritettiin mittaukset.



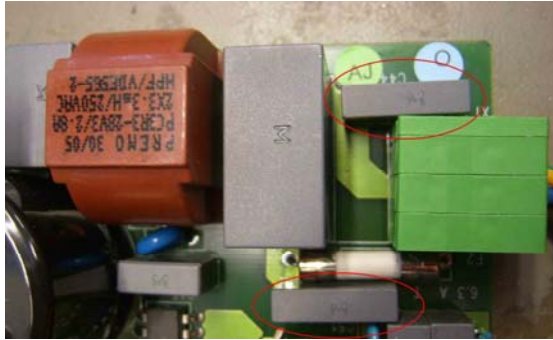
KUVIO 19. Mittalaitteisto

Tutkittavan laitteen 85163 sisääntulopiirin häiriösuodattimessa kaksi y2-kondensaattoria oli asetettu tilan puutteen vuoksi piirilevyllä tulo-kuristimen etupuolelle. Oikeaoppisesti niiden tulisi sijaita, kuten kuviossa 18 (sivulla 23) käy ilmi, kuristimen toisella puolella.



KUVIO 20. Kondensaattorit C2 ja C3 sijoitettuna "väärälle" puolelle kuristinta

Kuviossa 20 on esitetty supistettu piirikaaviokuva laitteen 85163 tulopiiristä. y2-kondensaattorit C2 ja C3 olivat kapasitanssiltaan 10 nF mellisoituja muovikondensaattoreita. Kuviossa 21 sivulla 33 esitettyyn sisääntulopiirin osaan on merkitty muutettavien kondensaattorien paikat. Nämä käsitellyt komponentit muodostavat teholähteen sisääntulossa yhteismuotoisten häiriöiden suodattimen, joten tässä työssä pyritään vaikuttamaan yhteismuotoisiin sähkömagneettisiin häiriöihin.



KUVIO 21. 85163:n tulopiiri

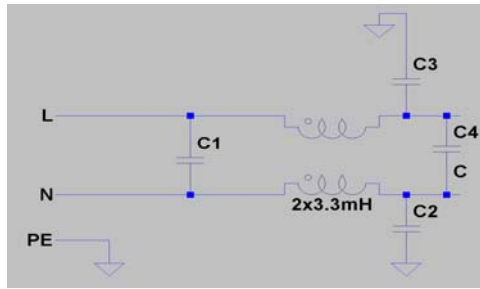
Laboratoriomittaukset koostuivat neljästä eri testistä, joissa tehtiin eri muutoksia laitteeseen 85163. Kukin neljästä testistä käsitti lisäksi kaksi eri mittaussvaihetta: mittaukset nollajohtimessa ja vaiheessa. Ensimmäinen mittaus suoritettiin laitteella ilman muutoksia. Toisessa mittaussvaiheessa kondensaattorit siirrettiin oikealle puolelle kuristinta. Kolmannessa ja neljännessä mittauksessa tehtiin samat vaiheet kuin edellä, mutta kuristin vaihdettiin uuteen EPCOS 2 x 15 mH:n kuristimeen. Kondensaattoreista on esitetty tarkemmat tekniset tiedot liitteessä 1 ja EPCOS-kuristimesta liitteessä 2.

5.1 Testi 1: teholähde 85163 ilman muutoksia

Ensimmäiseksi tutkittiin alkuperäistä laitetta 85163. Sen sisääntulopiiri on esitetty edellisessä luvussa. Kuvio 21 näkyy kondensaattoreiden paikat sekä sisääntulon yhteismuotoisten häiriöiden suodattimen kuristimen paikka piirile-vyllä. PREMO-kuristimen tarkemmat tekniset tiedot löytyvät liitteestä 3.

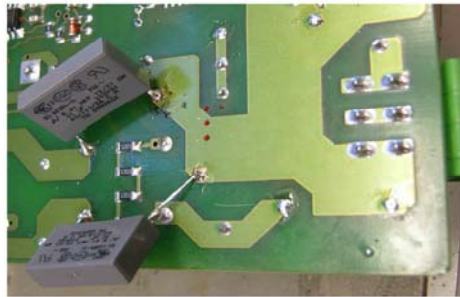
5.2 Testi 2: kondensaattorien siirtäminen

Mittauksien toisessa vaiheessa muutettiin kondensaattoreita. Muutoksen tarkoituksena oli tutkia kondensaattorien sijoittelun vaikutusta johtuviin häiriöihin. Kondensaattorit C2 ja C3 siirrettiin yhteismuotokuristimen toiselle puolelle. Kuvio 22 esittää muutoksen piirikaaviona.



KUVIO 22. Kondensaattorit C2 ja C3 "oikeaoppisella" paikallaan

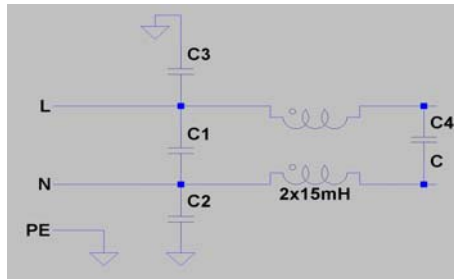
Kuviossa 23 näkyy kytkennän käytännöntoteutus. Piirilevyn niukan tilan takia kondensaattorit täytyi siirtää testin ajaksi toiselle puolelle levyä, kuviossa näkyvällä tavalla.



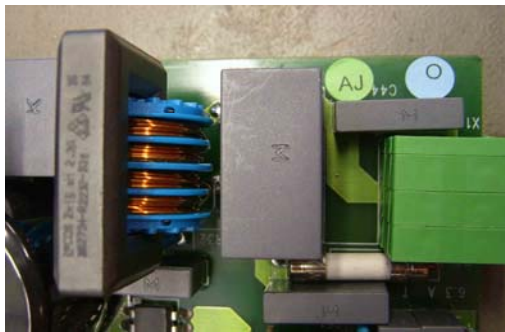
KUVIO 23. Kondensaattorit asetettuna koejärjestelyn mukaisesti paikoilleen piirilevyn toiselle puolelle

5.3 Testi 3: EPCOS-kuristimen vaihto

Kolmannessa testissä tutkittavaa laitetta muutettiin toisen kerran. Kondensaattorit asetettiin takaisin alkuperäisille paikoilleen ja alkuperäisen PREMO 2 x 3.3 mH kuristimen paikalle asetettiin uusi EPCOS 2 x 15 mH kuristin. Mittauksessa oli tarkoituksena tutkia pelkän kuristimen vaihdon vaikutusta häiriöihin. Kuviot 24 ja 25 esittävät muutoksenjälkeisen piirikavion ja kuvan piiri-kortille tehdystä käytännön muutoksesta.



KUVIO 24. EPCOS 2 x 15 mH kuristin piirikaaviossa

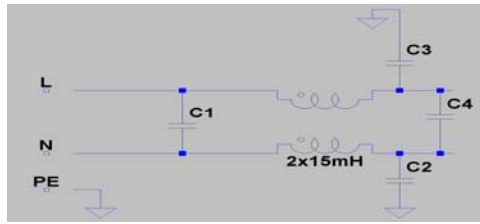


KUVIO 25. Kuristin vaihdettuna tulopiiriin

Verrattaessa kuviota 25 ensimmäisen mittauksen kuvioon 21 (sivu 33) huomataan kuristimen paikka piirilevyllä ja sen muutos mittausjärjestelyissä.

5.4 Testi 4: kondensaattorien siirtäminen

Neljännessä testissä vaihdettiin kondensaattorit C2 ja C3 esimerkisuodattimen mukaisille paikoille kuristimen toiselle puolelle. Esimerkkisuodatin on esitetty kuviossa 18 sivulla 23. Tässä mittauksessa tutkittiin muutoksen vaikutusta laitteessa esiintyviin häiriöihin. Kuviossa 26 on esitetty piirikaavio lopullisesta muutoksesta tulopiirissä, vaihdettaessa uusi kuristin vanhan tilalle ja asetettaessa kondensaattorit esimerkkitapausten mukaisesti kuristimen toiselle puolelle.



KUVIO 26. Tulopiiri lopullisessa muodossaan kuristin- ja kondensaattorimuutosten jälkeen

Kuviossa esitetty tulopiiri vastaa kuviota 22 muilta osin, mutta kuristin on muutettu PREMO 2 x 3.3 mH:n kuristimesta EPCOS 2 x 25 mH:n kuristimeen. Tässä koejärjestelyssä kondensaattorit sijoitettiin piirikortin toiselle puolelle kuviossa 23 esitettyyn tapaan.

6 TULOKSET

Mittaukset suoritettiin neljässä eri vaiheessa, joista jokaisesta saatiin kahdet tulokset, kahdesta eri johtimesta (N ja L1). CISPR-standardin mukainen peak-testi testasi laitteen tulopiirin häiriöitä taajuusalueella 140 kHz – 30 MHz neljällä eri kaistalla. Neljän eri taajuuskaistan tulokset on esitetty yhdessä.

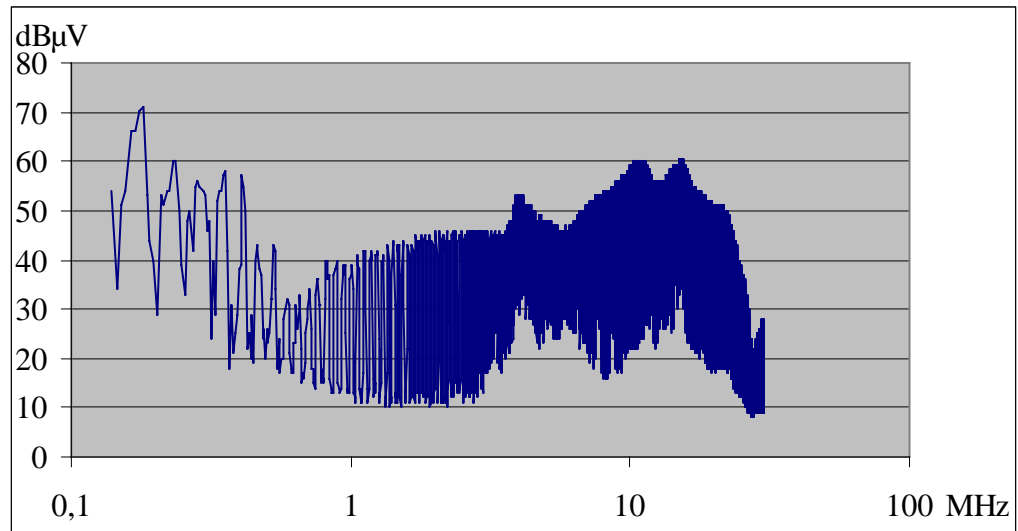
Jokaisessa testissä kahdessa eri johtimessa, eli nolla- ja vaihejohtimissa, saadut tulokset ovat hyvin samankaltaisia. Sen takia niiden tulokset esitellään yhtenä kokonaisuutena. Liitteenä olevissa testiraporttien osissa ovat vain merkittävimmät häiriökohdat. Kokonaisia raportteja ei esitetä niiden laajuuden takia.

6.1 Testi 1: teholähde 85163 ilman muutoksia

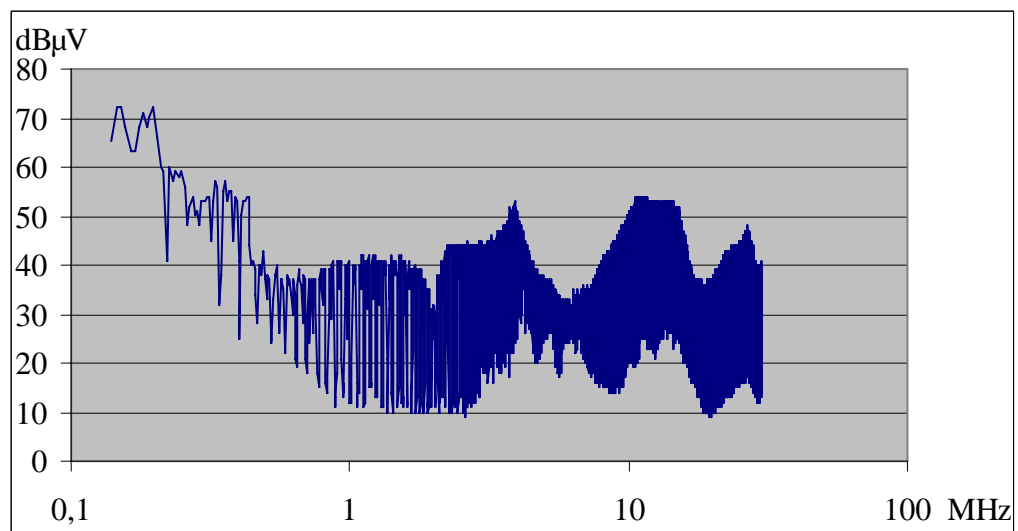
Teholähde 85163 läpäisi CISPR-peak-testin A-luokan laitteille asettamat rajat, kun laitteeseen ei ollut tehty muutoksia. Tämä näkyy liitteinä 4 ja 5 olevista kuvaajista, jotka on tulostettu testiohjelmasta. Häiriöt eivät missään vaiheessa testiä ylittäneet kuvaajaan merkittyyjä raja-arvoja. Merkittävämpien häiriöpiikki-kohtien arvot on esitetty liitteessä 6.

Matalilla taajuuksilla noin 180 kHz:n kohdalla häiriöpiikki nousi hieman yli 71 dB μ V. Kyseinen häiriöpiikki oli korkein ja se sijaitsi aivan testin alkupäässä. Muita korkeampia piikkejä testissä ilmeni kohdissa 230 kHz sekä hieman yli 10 MHz, jolloin piikit nousivat noin 60 dB μ V:iin.

Testiraporttien ilmoittamien häiriöpiikkien arvoilla piirrettiin kuvaajat. Nolla-johtimessa tehtyjen mittausten tuloksena saadut häiriöpiikit on esitetty kuviossa 27. Vaihejohtimessa saadut häiriöpiikit on esitetty kuviossa 28. Kuviot ovat seuraavalla sivulla.



KUVIO 27. Testissä 1 nolajohtimessa esiintyneet häiriöpiikit



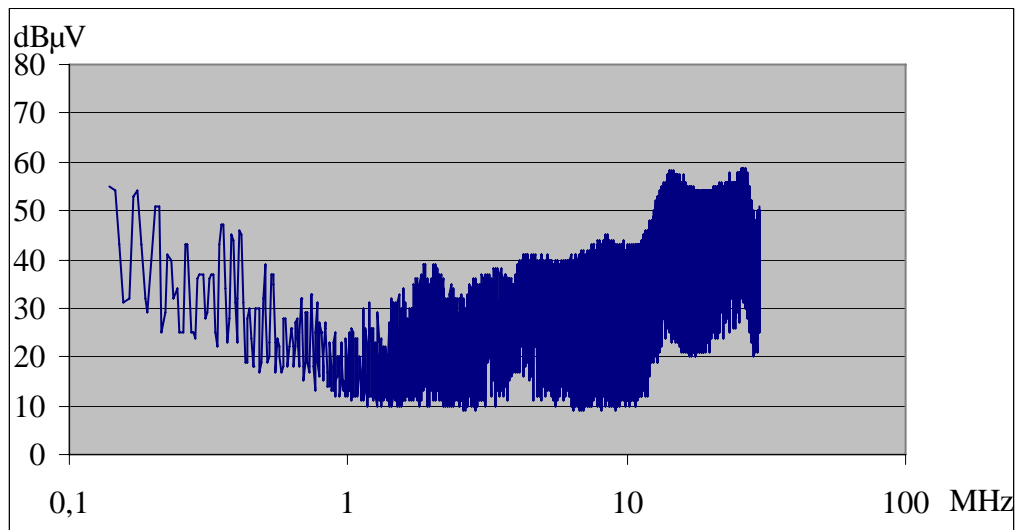
KUVIO 28. Testissä 1 vaihejohtimessa esiintyneet häiriöpiikit

6.2 Testi 2: kondensaattorien siirtäminen

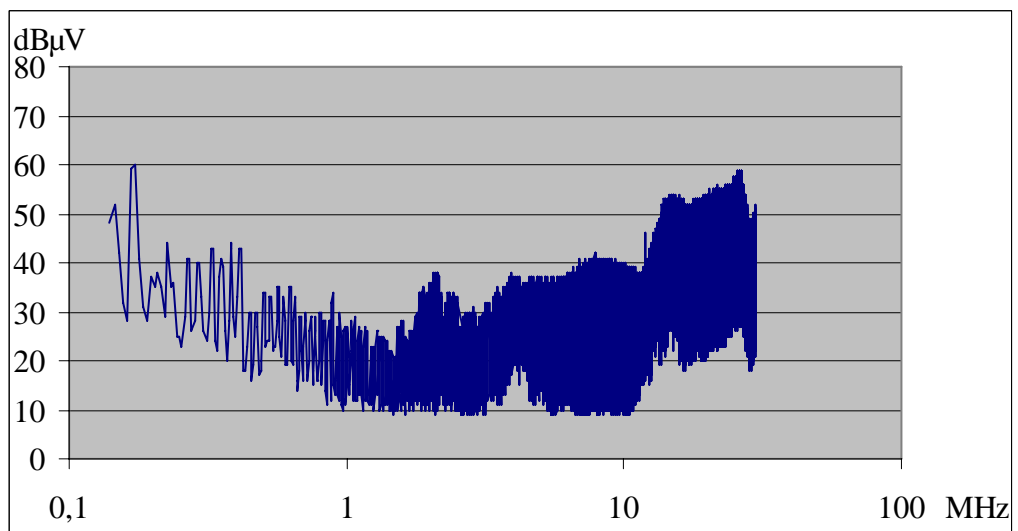
Ensimmäisen muutoksen jälkeen tehtyjen mittauksien tulokset läpäisivät CISPR-peak-testin A-luokan laitteille asettamat vaatimukset. Tämä käy ilmi liitteinä 7 ja 8 olevista testiohjelmasta tulostetuista kuvaajista ja liitteessä 9 esitetyistä merkittävimpien häiriöpiikkien arvoista. Korkeimmillaan piikit kävivät lähes 60

dB μ V:ssa noin 15 MHz:n ja 25 MHz:n taajuuksilla. Vaihejohtimessa noin 180 kHz:n kohdalla häiriöpiikki kävi 60dB μ V:ssa.

Kuviossa 29 on esitetty testiraportin mukaiset häiriöpiikit nollajohtimessa tehdyssä mittauksessa. Vaihejohtimessa mitatut häiriöpiikit on esitetty kuviossa 30.



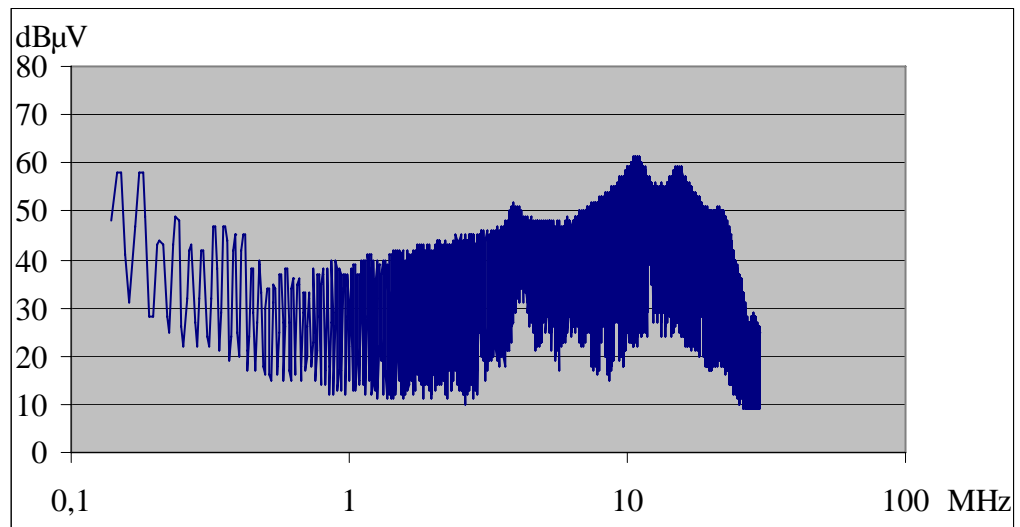
KUVIO 29. Testissä 2 nollajohtimessa esiintyneet häiriöpiikit



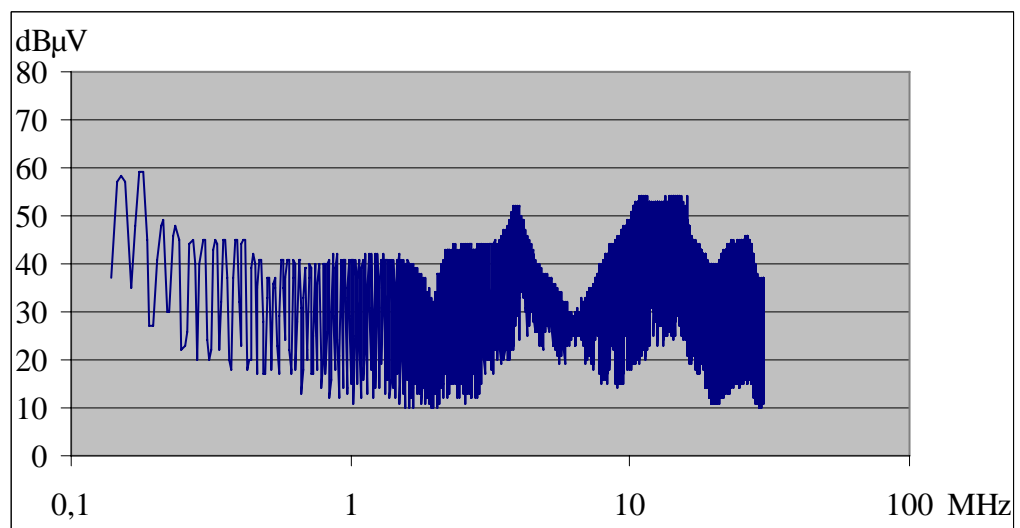
KUVIO 30. Testissä 2 vaihejohtimessa esiintyneet häiriöpiikit

6.3 Testi 3: EPCOS-kuristimen vaihto

Tutkittava teholähde läpäisi testin sen jälkeen, kun siihen oli vaihdettu EPCOS-kuristin. Tämä ilmenee liitteenä 10 ja 11 olevista kuvaajista ja liitteenä 12 olevista testiraporteista. Testiraportin mukaiset häiriöpiikit nollajohtimessa on esitetty kuviossa 31 ja vaihejohtimessa saadut häiriöpiikit kuviossa 32.



KUVIO 31. Testissä 3 nollajohtimessa esiintyneet häiriöpiikit

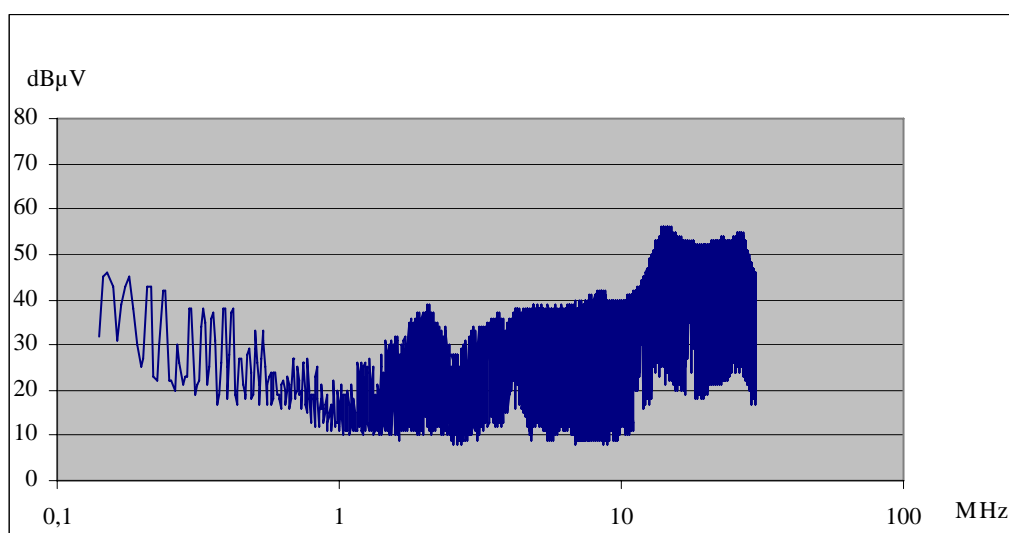


KUVIO 32. Testissä 3 vaihejohtimessa esiintyneet häiriöpiikit

Korkeimmillaan häiriöpiikit olivat 140 kHz:n ja 150 kHz:n kohdalla noin 58 dB μ V sekä hieman yli 10 MHz:n kohdalla noin 60 dB μ V. Muilla taajuuksilla häiriöt olivat kuvaajan mukaisesti 50 dB μ V:n alapuolella.

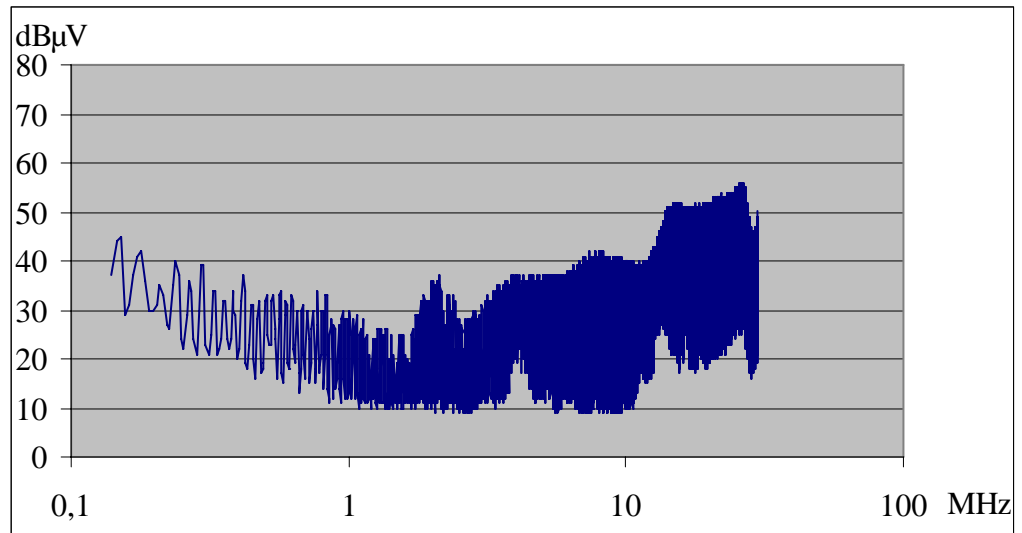
6.4 Testi 4: kondensaattorien siirtäminen

Kondensaattorien siirtämisen jälkeen teholähde läpäisi testin. Korkeimmat häiriöpiikit ilmenivät yli 15 MHz:n taajuusalueella, jossa ne nousivat noin 55 dB μ V:iin. Taajuusalueella 140 kHz – 10 MHz häiriöt pysyivät alle 50 dB μ V:ssa, kuten liitteinä 13 ja 14 sekä 15 olevista mittaustuloksista havaitaan.



KUVIO 33. Testissä 4 nollajohtimessa esiintyneet häiriöpiikit

Kuviossa 33 on esitetty testiraportin mukaiset häiriöpiikit nollajohtimessa tehdyssä mittauksessa. Vaihejohtimessa mitatut häiriöpiikit on esitetty kuviossa 34 seuraavalla sivulla.



KUVIO 34. Testissä 4 vaihejohtimessa esiintyneet häiriöpiikit

7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Komponenttien sijainnilla ja kuristimen mallilla ja koolla on merkitystä johtuvien häiriöiden muodostumisessa. Tämä käy ilmi edellä esitetyistä testiohjelman antamien testiraporttien pohjalta piirretyistä kuvaajista sekä liitteenä olevista testiohjelman esittämistä tietokoneen näytöltä tulostetuista kuvaajista. Vaikka laite sinällensä läpäisee testin jo ilman muutoksiakin, huomataan komponenttien sijoittelun ja suodatinpiirin yhteismuotokuristimen vaikuttavan huomattavasti.

Testin ensimmäisessä vaiheessa, jossa laitteeseen ei ollut tehty vielä lainkaan muutoksia, huomattiin selkeitä häiriöpiikkejä matalilla taajuuksilla noin 180 kHz:n kohdalla. Tämän jälkeen ne hieman tasoittuvat alle 60 dB μ V:n ja nousivat taas noin 10 MHz:n kohdalla. Häiriöiden tulisi kaikissa mittauksissa olla molemmissa johtimissa samankaltaisia sisääntulossa. Siitä huolimatta lähes kaikissa tapauksissa on havaittavissa pientä eroa johtimien välillä. Tämä johtuu peak-testin tyylistä mitata häiriöpiikkejä. Tästä syystä testiohjelma piirtää kuvaajaan piikit sillä hetkellä, kun se havaitsee ne. Tässä työssä keskityttiin tarkkailemaan johtimissa merkittävimpien piikkien kohdalla tapahtuneita häiriötason muutoksia eri komponenttimuutosten vaikutuksesta.

Ensimmäisen muutoksen osalta eli kondensaattoreitten siirtämisen PREMO:n kuristimen toiselle puolelle huomataan matalilla taajuuksilla tapahtuvan noin 15 dB μ V:n vaimennus. Loppuvaiheessa suuremmilla taajuuksilla on huomattavissa, että häiriöiden taso nousee hieman muutoksesta vuoksi. Yleisesti ottaen nähdään kuitenkin häiriötason putoavan lähes koko testialueella 140 kHz – 10 MHz.

Yhteismuotokuristimen vaihtaminen laitteeseen (testi 3), niin että kondensaattorit ovat asetettuna takaisin alkuperäisille paikoilleen leikkaa myös alkutilanteeseen verrattuna melko hyvin taajuusalueen alkupäätä ja keskivaihetta (140 kHz – 8 MHz). Loppupäässä vaikutusta ei ole havaittavissa verrattuna lähtötilanteeseen. Kondensaattoreiden vaiheessa kaksi aiheuttamaa nousua ei tässä tilanteessa havaita niiden ollessa taas toisella puolella kuristinta. Matalilla taajuuksilla

häiriöiden vaimeneminen oli luokkaa 11 dB μ V ja häiriöt pysyivät alle 50 dB μ V noin 4 MHz:iin asti.

Mittausten neljännessä vaiheessa (testi 4) häiriöiden taso taajuusalueella 140 kHz – 2 MHz oli matalammalla kuin missään muussa testin vaiheessa. Häiriöiden taso putosi reilusti alle 50 dB μ V:n jo heti testin alkupäässä. Vaimennusta tuli myös 15 – 20 MHz:n kohdalle, verrattuna muihin mittausvaiheisiin, noin 5 dB μ V. Tämän muutoksen kohdalla, kuten muutoksessa kaksi, jossa kondensaattorit siirrettiin yhteismuotokuristimen oikealle puolelle, testin loppupään korkeilla taajuuksilla (noin 30 MHz) häiriöiden taso nousi verrattuna testeihin, joissa kondensaattorit olivat alkuperäisillä paikoillaan.

Toisin sanoen, kullakin muutoksella kyettiin vaikuttamaan häiriöiden määrään pääasiallisesti pienemmillä taajuuksilla. suuremmat taajuudet aivan loppupäässä testiä pysyivät lähes muuttumattomina. Poikkeuksen tähän antoivat tulokset testeissä, joissa kondensaattorit olivat siirrettyinä kuristimen toiselle puolelle niin sanotusti oikeaoppisen yhteismuotosuodattimen mukaisesti. Kondensaattoreiden siirto aiheutti taajuusalueen loppupäähän lähelle 30 MHz:a häiriöiden lisääntymistä.

Kaikkien mittausten tulokset tarkastettiin manuaalisesti spektrianalysointin näytöltä huippukohtien osalta. Niin voitiin varmistaa mittauksen paikkansapitävyys quasi-peak testin arvoilla, vaikka itse ohjelma suoritti testin peak-testinä. Ohjelmallisesti käytettiin peak-testiä, sillä laitteen tiedettiin läpäisevän standardin vaatimat rajat, mutta haluttiin tutkia muutosten vaikutusta häiriöihin. Peak-testi oli tässä tapauksessa nopeampi suorittaa muutosten määrän takia. Quasi-peak testin tulos olisi hieman leikannut häiriöpiikkien huippuja ja vastaavasti leventänyt niitä. Tällöin häiriötaso olisi ollut hieman matalammalla. Edellä työssä esitetyt kuviot 6 ja 7 häiriöiden raja-arvoista poikkeavat liitteinä olevien mittaustulosten esittämistä raja-arvoista. Tämä johtuu siitä, että teoriassa esitetyt raja-arvot ovat keskiarvomittauksen raja-arvoja. Liitteissä näkyvät raja-arvot ovat puolestaan peakmittauksen raja-arvoja.

Tuloksista voidaan päätellä, että kondensaattorin siirtäminen leikkaa matalia taajuuksia, mutta se ei kykene suodattamaan suurempia taajuuksia. Tämä johtuu muutoksesta maatasoon nähden. Häiriöiden lisääntyminen kondensaattoreiden paikan muuttamisen yhteydessä voisi johtua myös vetojen pitenemisestä hiukan, sillä asetettaessa kondensaattorit toiselle puolelle piirilevyä piti niiden jalvoja pidentää, jotta ne saatiin yhdistettyä yhteiseen maatasoon. Myös juotoksen laatu, tässä tapauksessa itse juotettu, voi vaikuttaa häiriöihin.

Suurtaajuisten häiriöiden vaimentamiseen voitaisiin kokeilla liittää useampi suodatin sarjaan tai lisätä muuntajaan suojausta. Yksi vaihtoehto voisi olla kotelointiratkaisuilla, sillä 30 MHz eteenpäin menevät taajuudet siirtyvät jo säteilevien häiriöiden puolelle.

Kuristimen vaihdolla oli huomattavissa selkeästi matalien taajuuksien leikkautuminen yli 10 dB μ V. Lisäksi taajuusalueella lähes 10 MHz:iin asti oli nähtävissä häiriöiden vaimennusta. Tässä tapauksessa kuristimien rakenne-erot tulevat merkittävimmäksi tekijäksi. PREMO PC 3R3-28V2 oli induktanssiltaan 2 x 3.3 mH oleva toroidikuristin. EPCOS 2232-B30 oli 2 x 15 mH D Core-kuristin, jossa oli suorakaiteenmuotoinen suljettu sydän. Molemmat kuristimista olivat ferriittisydämisiä ja kaksikämmisiä. EPCOS:n kuristimen käämi oli suljettu polykarbonaattikäämi, joka oli jaettu neljään osaan. PREMO:n kuristimessa oli puolestaan kaksi symmetristä, kuparista käämiä. EPCOS kuristimessa oli korkeampi resonanssitaajuus kuin PREMO:n kuristimeen. Lisäksi kuristimien sydämien rakenteilla voi olla vaikutusta vuotoinduktanssiin.

Vaimennuksen tehoon kuristimilla oletettavasti vaikuttaa sydämen kyllästyminen eri vaiheessa sekä käämintätapa. Käämintätavalla on vaikutusta käämien välisiin ja käämien yli meneviin kapasitansseihin. EPCOS:n tapauksessa neljään osaan jaettuna olleet kaksi käämiä, joiden kaikkien neljän osan välissä oli suoja, vähensi nähtävästi käämien välistä kapasitanssia. Suodatuksen tasoon voitaisiin yrittää vaikuttaa myös lisäämällä ylimääräisiä kondensaattoreita.

Tuloksia tulkittaessa voidaan päätellä, että testin kolmas vaihe, jossa vain kuristin muutettiin, olisi paras ratkaisu häiriöiden vaimentamisessa. Tämä johtuu siitä, että

tässä testin vaiheessa häiriöt pysyivät parhaiten hallinnassa myös suuremmilla taajuuksilla ja pienemmät taajuudet vaimenivat vähintäänkin hyvin. Tutkimusta olisi mielenkiintoista jatkaa tästä eteenpäin ja yrittää ratkaista suurempien taajuuksien häiriöiden vaimentamista niin, että kondensaattorit voitaisiin asettaa ”oikeaoppisen” suodattimen tapaan. Lisäksi olisi mielenkiintoista jatkaa tutkimusta myös säteilevien häiriöiden osalta ja kaikin puolin perehtyä asiaan syvällisemmin.

LÄHTEET

ABB Oy. Teknisiä tietoja ja taulukoita – käsikirja [verkkodokumentti]. ABB, 2000 [viitattu 26.1.2006].

Saatavissa: [http://www.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/\\$file/060_0007.pdf](http://www.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/$file/060_0007.pdf)

DIRECTIVE 2004/108/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL [online]. Euroopan unioni, 2004 [viitattu 13.5.2006].

Saatavissa: http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/en/oj/2004/l_390/l_39020041231en00240037.pdf

EMC-direktiivin soveltaminen. 1993. Integraatitiedote 23. SETELI & MET.

Hyrkäs, M. Sovelletun elektroniikan laboratoriotyöt [online].

Sovelletun elektroniikan laboratorio, 2001 [Viitattu 15.5.2006].

Saatavissa: <http://sel18.hut.fi/301/4/hakkuriemc.pdf>

Luukko, J. Digitaalisen signaalinkäsittelyn työkurssi [online]. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2004 [viitattu 23.4.2006].

Saatavissa: <http://www.ee.lut.fi/courses/080569000/labra/tyo105/index.html>

Mammano, B. & Carsten, B. Understanding and Optimizing Electromagnetic Compatibility in Switchmode Power Supplies [verkkodokumentti]. Texas: Texas Instruments, 2003 [viitattu 5.2.2006].

Saatavissa: <http://focus.ti.com/lit/ml/slup202/slup202.pdf>

O'Hara, M. 1998. EMC at component and PCB level. Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford.

Oinonen, M. EMC-testaustyö [verkkodokumentti]. TTKK, 2004 [viitattu 21.2.2006]. Saatavissa:

<http://www.ele.tut.fi/teaching/74035/lk0405/emc/emc.html>

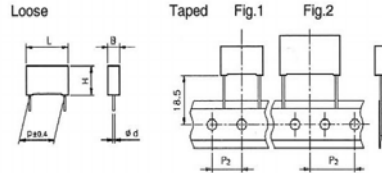
Reitmaa, I. 1998. Varma Digitaalielektroniikka – EMC-, vianehkäisy- ja häiriötorjuntatekniikka. 2. muuttamaton painos. Hakapaino, Helsinki.

Williams, T. 1992. EMC for Product Designers. 2. painos. Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford.

LIITE 1: Tulopiirin suodatinkondensaattorit

ARCOTRONICS

R.41



Y2 / X1 CLASS (EN132400) MKP Series METALLIZED POLYPROPYLENE FILM CAPACITOR
SELF-HEALING PROPERTIES

Typical applications: Interference suppression and «across-the-line» and «line to ground» applications. Suitable for use in situations where failure of the capacitor could lead to danger of electric shock.
PRODUCT CODE: R41

Note: R.41 series has replaced the R73 series (available only upon request). For new design we suggest the use of the R.41 series.

∅ d ± 0.05	p = 10	p = 15	15 < p ≤ 27.5	p = 37.5
	0.6	0.6	0.8	1

All dimensions are in mm.

GENERAL TECHNICAL DATA

Dielectric: polypropylene film.
Plates: metal layer deposited by evaporation under vacuum.
Winding: non-inductive type.
Leads: tinned wire.
Protection: plastic case, epoxy resin filled. Box material is solvent resistant and flame retardant according to UL94 V0.
Marking: Manufacturer's logo, series, capacitance, tolerance, rated voltage, capacitor class, dielectric code, climatic category, passive flammability category, manufacturing date code, approvals, manufacturing plant.
Climatic category: 40/110/56 IEC 60068-1
Operating temperature range: -40 to +110°C
Related documents: IEC 60384-14, EN132400.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Rated voltage (V_R): 300Vac; 50/60Hz
Capacitance range: 0.001µF to 1.0µF
Capacitance values: E6 series (IEC 60063 Norm).
Capacitance tolerances (measured at 1 kHz):
 ± 10% (K); ± 20% (M).
Dissipation factor (DF):
 tgδ × 10⁻⁴ at +25°C ± 5°C: ≤ 20 (15)* at 1kHz
 * Typical value

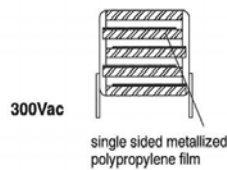
Insulation resistance:

Test conditions
 Temperature: +25°C ± 5°C
 Voltage charge time: 1 min
 Voltage charge: 100 Vdc

Performance
 ≥ 1 × 10⁵ MΩ (5 × 10⁵ MΩ)* for C ≤ 0.33µF
 ≥ 30000 s (150000 s)* for C > 0.33µF
 * Typical value

Test voltage between terminations (on all pieces):
 2500Vac for 1 s + 5000Vdc for 1 s at +25°C ± 5°C

Winding scheme



TEST METHOD AND PERFORMANCE

Damp heat, steady state:

Test conditions
 Temperature: +40 ± 2°C
 Relative humidity (RH): 93 ± 2%
 Test duration: 56 days
Performance
 Dielectric strength: no dielectric breakdown or flashover at 1500Vac/1 min
 Capacitance change |ΔC/C|: ≤ 5%
 Insulation resistance: ≥ 50% of initial limit.

Endurance:

Test conditions
 Temperature: 110°C ± 2°C
 Test duration: 1000 h
 Voltage applied: 1.7 × V_R + 1000Vac 0.1 s/h
Performance
 Dielectric strength: no dielectric breakdown or flashover at 1500Vac/1 min
 Capacitance change |ΔC/C|: ≤ 10%
 Insulation resistance: ≥ 50% of initial limit.

Resistance to soldering heat:

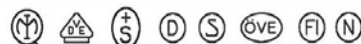
Test conditions
 Solder bath temperature: +260°C ± 5°C
 Dipping time (with heat screen): 10 s ± 1 s
Performance
 Capacitance change |ΔC/C|: ≤ 2%

APPROVALS

	ENEC-IMQ IEC 60384-14	Class Y2 / X1	File No. V4160
	CSA C22.2 N*1	Across-the-line or line-to-ground	File No. LR83890
	UL 1414	Across-the-line or line-to-ground	File No. E 97797
	GB IT 14472-1998	Class Y2 / X1	File No. pending

CSA and UL 1414 for 250Vac only.
 Approved according to IEC 60384-14:1993+ A1:1995 (EN132400:1994+A2:1998+A3:1998).
 According to IEC 60065.

(*) ENEC mark has replaced all the following European National marks:



ARCOTRONICS

R.41

Y2 / X1 CLASS (EN132400) MKP Series
METALLIZED POLYPROPYLENE FILM CAPACITOR
 SELF-HEALING PROPERTIES

Typical applications: Interference suppression and «across-the-line» and «line to ground» applications. Suitable for use in situations where failure of the capacitor could lead to danger of electric shock.

PRODUCT CODE: R41

Table 1 (for more detailed information, please refer to page 16).

Rated Cap.	300 Vac				Max dv/dt at 420Vdc (V/ μ s)	Part Number
	B	H	L	p		
1000 pF	4.0	9.0	13.0	10.0	800	R413F 1100 - - 00 -
1500 pF	4.0	9.0	13.0	10.0	800	R413F 1150 - - 00 -
2200 pF	4.0	9.0	13.0	10.0	800	R413F 1220 - - 00 -
3300 pF	5.0	11.0	13.0	10.0	800	R413F 1330 - - 00 -
4700 pF	5.0	11.0	13.0	10.0	800	R413F 1470 - - M1M
4700 pF	6.0	12.0	13.0	10.0	800	R413F 1470 - - 00 -
6800 pF	6.0	12.0	13.0	10.0	800	R413F 1680 - - 00 -
0.010 μ F	5.0	11.0	18.0	15.0	600	R413I 2100 - - 00 -
0.015 μ F	6.0	12.0	18.0	15.0	600	R413I 2150 - - 00 -
0.022 μ F	7.5	13.5	18.0	15.0	600	R413I 2220 - - 00 -
0.033 μ F	8.5	14.5	18.0	15.0	600	R413I 2330 - - 00 -
0.047 μ F	10.0	16.0	18.0	15.0	600	R413I 2470 - - 00 -
0.047 μ F	6.0	15.0	26.5	22.5	500	R413N 2470 - - 00 -
0.068 μ F	7.0	16.0	26.5	22.5	500	R413N 2680 - - 00 -
0.10 μ F	10.0	18.5	26.5	22.5	500	R413N 3100 - - 00 -
0.15 μ F	11.0	20.0	26.5	22.5	500	R413N 3150 - - 00 -
0.22 μ F	13.0	22.0	26.5	22.5	500	R413N 3220 - - 00 -
0.22 μ F	13.0	22.0	32.0	27.5	400	R413R 3220 - - 00M
0.33 μ F	14.0	28.0	32.0	27.5	400	R413R 3330 - - 00 -
0.47 μ F	18.0	33.0	32.0	27.5	400	R413R 3470 - - 00 -
0.68 μ F	18.0	33.0	32.0	27.5	400	R413R 3680 - - 00 -
0.47 μ F	13.0	24.0	41.5	37.5	300	R413W3470 - - 00 -
0.68 μ F	16.0	28.5	41.5	37.5	300	R413W3680 - - 00 -
1.0 μ F	20.0	40.0	41.5	37.5	300	R413W4100 - - 00 -

Mechanical version and packaging (Table 1)

Tolerance: K ($\pm 10\%$); M ($\pm 20\%$)

E12 Series available upon request

All dimensions are in mm.

Standard packaging style	Lead length (mm)	Taping style			Ordering code (Digit 10 to 11)
		P ₂ (mm)	Fig. (No.)	Pitch (mm)	
AMMO-PACK	12.70	1	10.0/15.0	DQ	
AMMO-PACK	19.05	2	22.5	DQ	
REEL \varnothing 355mm	12.70	1	10.0/15.0	CK	
REEL \varnothing 500mm	19.05	2	22.5/27.5	CK	
Loose, short leads	4 ⁺²			00	
Loose, long leads (p=10mm)	25 ⁺¹			JY	
Loose, long leads (p \geq 15mm)	25 ^{+2/-1} 30 ⁺⁵			50 40	

Note: Ammo-pack is the preferred packaging for taped version

LIITE 2: EPCOS-kuristin



Chokes for Power Lines

B82731

D Core Chokes

... B82734

Rated voltage 250 Vac
Rated current 0,35 to 4,6 A
Rated inductance 3,3 to 100 mH

Construction

- Current-compensated double choke with closed, rectangular ferrite core
- Closed polycarbonate coil former with 4 sections
- Without encapsulation
- 2-section winding
- Creepage distances and clearances > 3 mm

Features

- Coil former flame-retardant as per UL 94 V-0
- Recycleable owing to omission of encapsulation and glue
- High resonance frequency due to 2-section winding
- Low leakage due to closed core shape
- High pulse strength
- Low whirring noise
- Approx. 1 % stray inductance for symmetrical interference suppression

Applications

- Electronic ballasts for lamps
- Switch-mode power supplies for TV sets


Terminals

- Tinned
- Pins fitting standard PCB grid

Marking

Ordering code, rated current, rated inductance, mark of conformity, manufacturer, date of manufacture, marking for B82731-H: manufacturer, ordering code

Approvals

Approval marks	Standards
	EN 60938-2 UL 1283





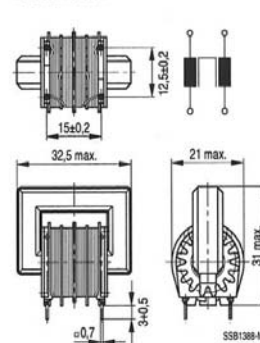
Chokes for Power Lines

B82734

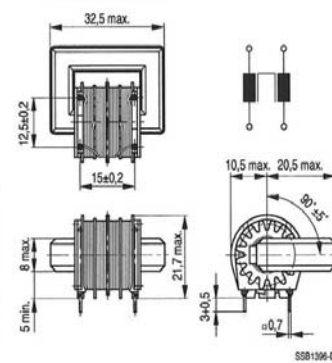
D Core Chokes

Dimensional drawings and pin configuration

Vertical version



Horizontal version



General technical data

Rated voltage V_R	250 Vac/dc
Test voltage V_T	1500 Vac, 2 s (line/line)
Rated current I_R	Referred to 50 Hz and 60 °C ambient temperature
Inductance tolerance	- 30/+ 50 %
Weight	Approx. 30 g

For further technical data see page 334

Characteristics and ordering codes

I_R A	L_R mH	L_S , typ μ H	R_{typ} m Ω	Ordering code	
				vertical version	horizontal version
1,3	47	250	560	B82734-R2132-B30	B82734-W2132-B30
1,4	39	210	460	B82734-R2142-B30	B82734-W2142-B30
1,7	27	140	320	B82734-R2172-B30	B82734-W2172-B30
2,3	15	80	185	B82734-R2232-B30	B82734-W2232-B30
2,6	10	53	130	B82734-R2262-B30	B82734-W2262-B30
3,2	6,8	35	85	B82734-R2322-B30	B82734-W2322-B30
4,6	3,3	17	46	B82734-R2462-B30	B82734-W2462-B30



Chokes for Power Lines

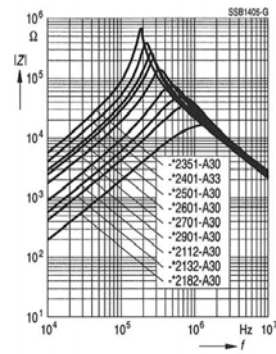
B82731

D Core Chokes

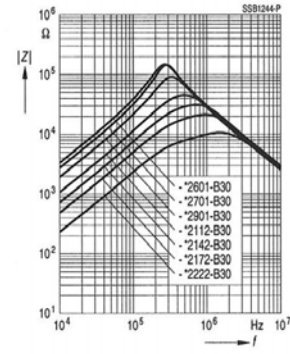
... B82734

Impedance $|Z|$ versus frequency f
(measured with windings in parallel)

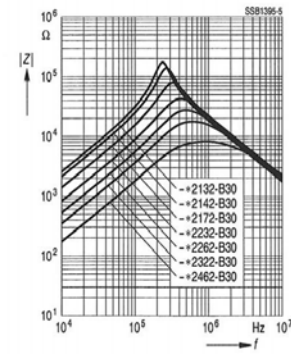
B82731-*
* = M or H



B82732-*
* = R or W





B82734-*
* = R or W



LIITE 3: PREMO-kuristin

TECHNICAL SHEET		SHEET	PR.	REFERENCE
CUSTOMER		DOSSIER	DESIGNED	DATE
MURR		FI-1449-00	A.CABEZAS	17/07/03
DESCRIPTION				EDITION
PC 3R3-28V2				2 nd
<p>1- DIMENSIONS in millimeters</p>				
<p>2- PIN CONFIGURATION</p>				
<p>PRELIMINARY SPECIFICATION</p>				

	TECHNICAL SHEET	SHEET	PR.	REFERENCE
	CUSTOMER	DOSSIER	DESIGNED	DATE
	MURR	FI-1449-00	A.CABEZAS	17/07/03
DESCRIPTION	REFERENCE			EDITION
PC 3R3-28V2				2nd
<p>3- CONSTRUCTION</p> <ul style="list-style-type: none"> - Current compensated double choke with toroidal ferrite core. - 2 symmetrical windings Copper wire: Class F Grade 1 - Potting box: Vertical plastic box. Material: FR50 from DUPONT - Creepage distances > 3 mm. <p>4- ELECTRICAL PARAMETERS</p> <p>4.1- INDUCTANCE</p> <p>L = 2x3,3 mH +50 / -30 %</p> <p>L leakage = 35 µH typical</p> <p>Test equipment: WAYNE KERR 3245 Test conditions: 1 KHz 10 mVac</p> <p>4.2- RATED CURRENT</p> <p>I = 2,8 A</p> <p>Referred to 50 Hz.</p> <p>4.3- RESISTANCE</p> <p>Rdc = 2x60 mΩ Typical (20°C)</p>				
PRELIMINARY SPECIFICATION				

	TECHNICAL SHEET	SHEET 3/3	PR. 19240	REFERENCE
	CUSTOMER MURR	DOSSIER FI-1449-00	DESIGNED A.CABEZAS	DATE 17/07/03
DESCRIPTION PC 3R3-28V2			REFERENCE	EDITION 2 nd

5- MATERIALS

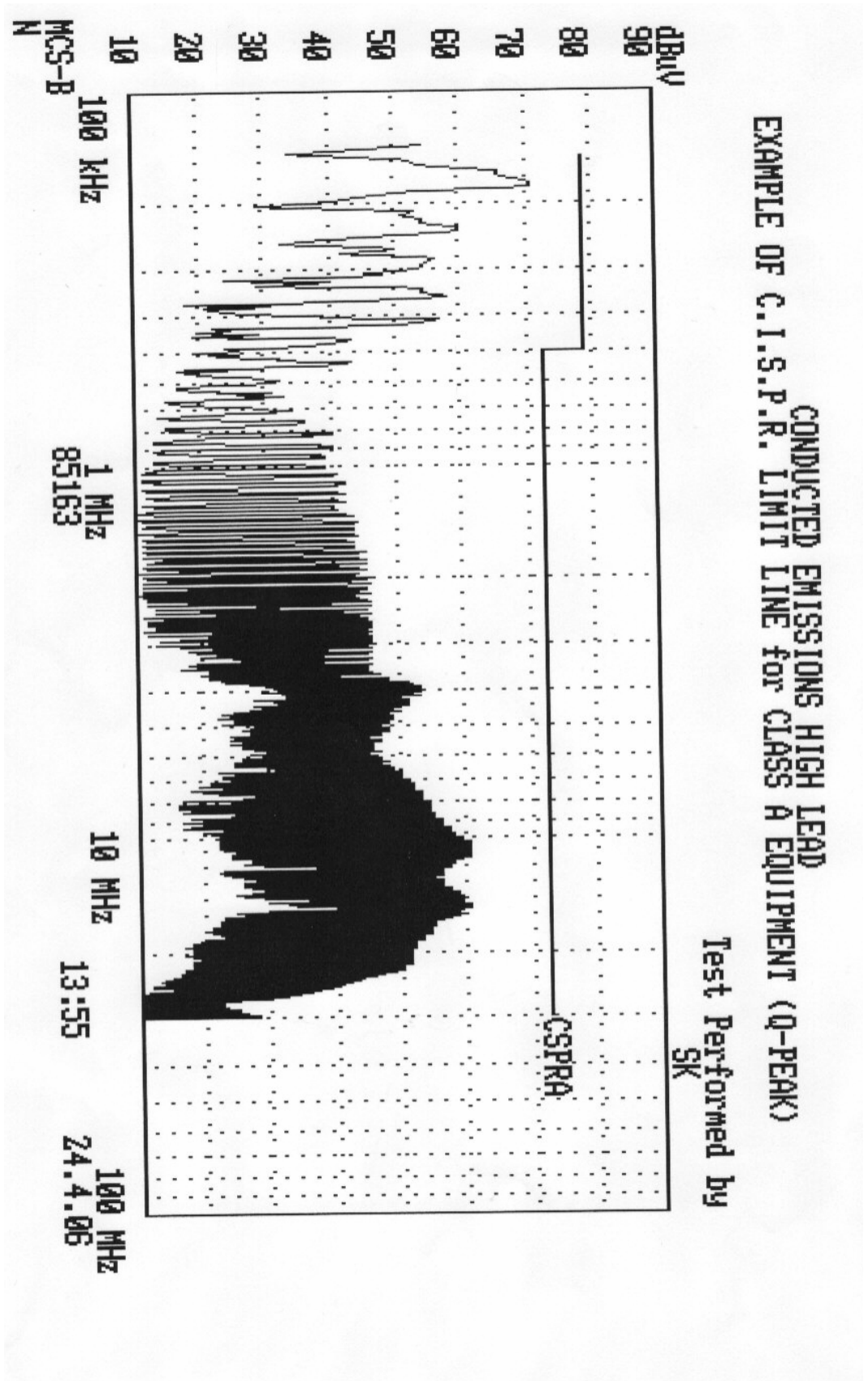
Material	Description	Manufacturer	UL File Number
Box	Format V2 / Material FR50	Dupont	E41938
Resin	Polyurethane bicomponent	Yantai Longda Resine	E209041
Wire	Copper wire / FG1	Wuxi Taihu Copper	E231066
Core coating	Epoxi		E186990

6- EDITIONS

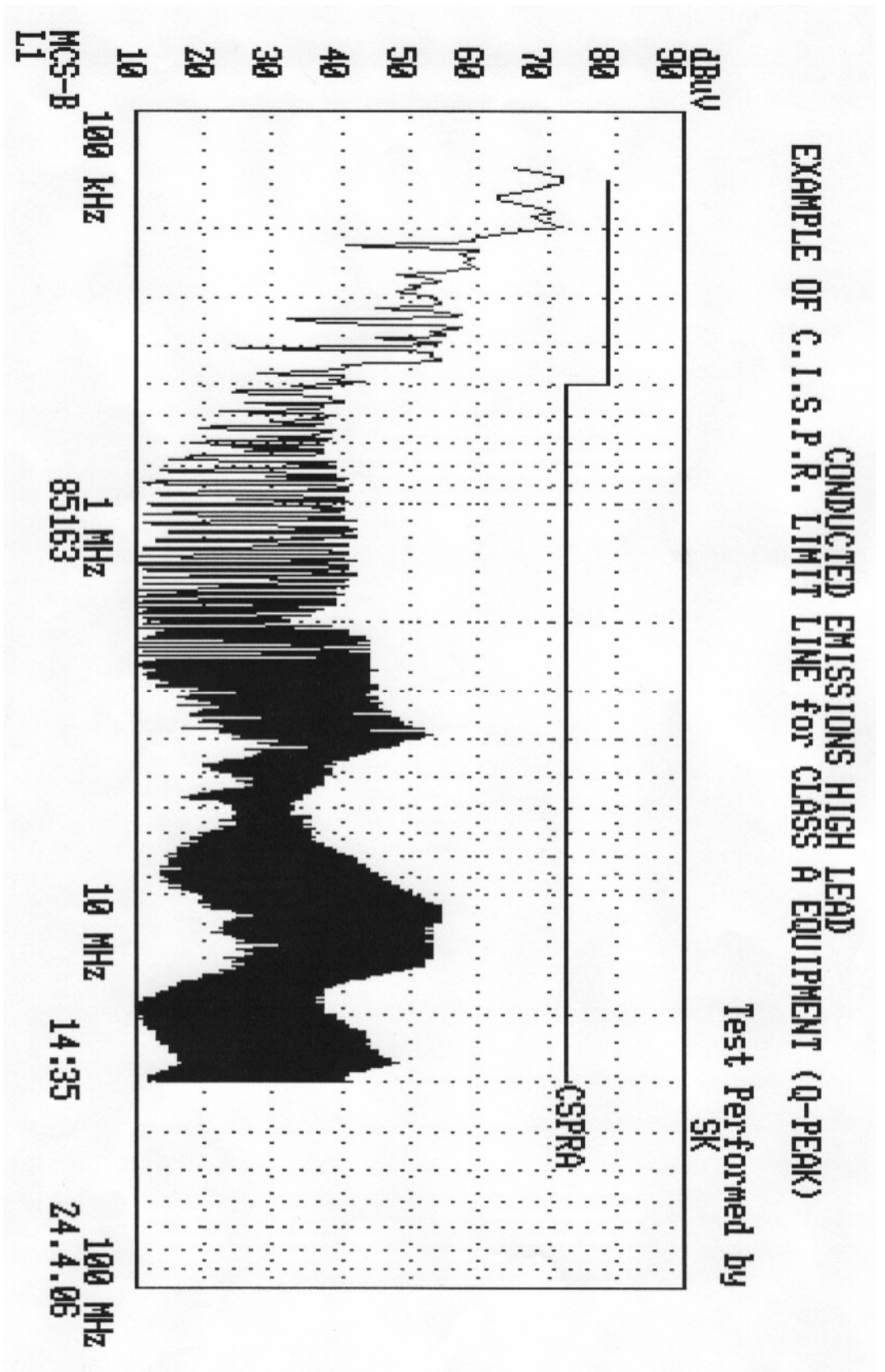
Edition	Date	Author	Description of revision
1 st	17/07/03	A. Cabezas	- Preliminar edition
2 nd	03/02/04	A. Cabezas	- Material list and control editions are included in the specification (sheet 3/3)

PRELIMINARY SPECIFICATION

LIITE 4: Testi 1 nollajohtimessa



LIITE 5: Testi 1 vaihejohtimessa



LIITE 6: Testin 1 testiraporttien otanta

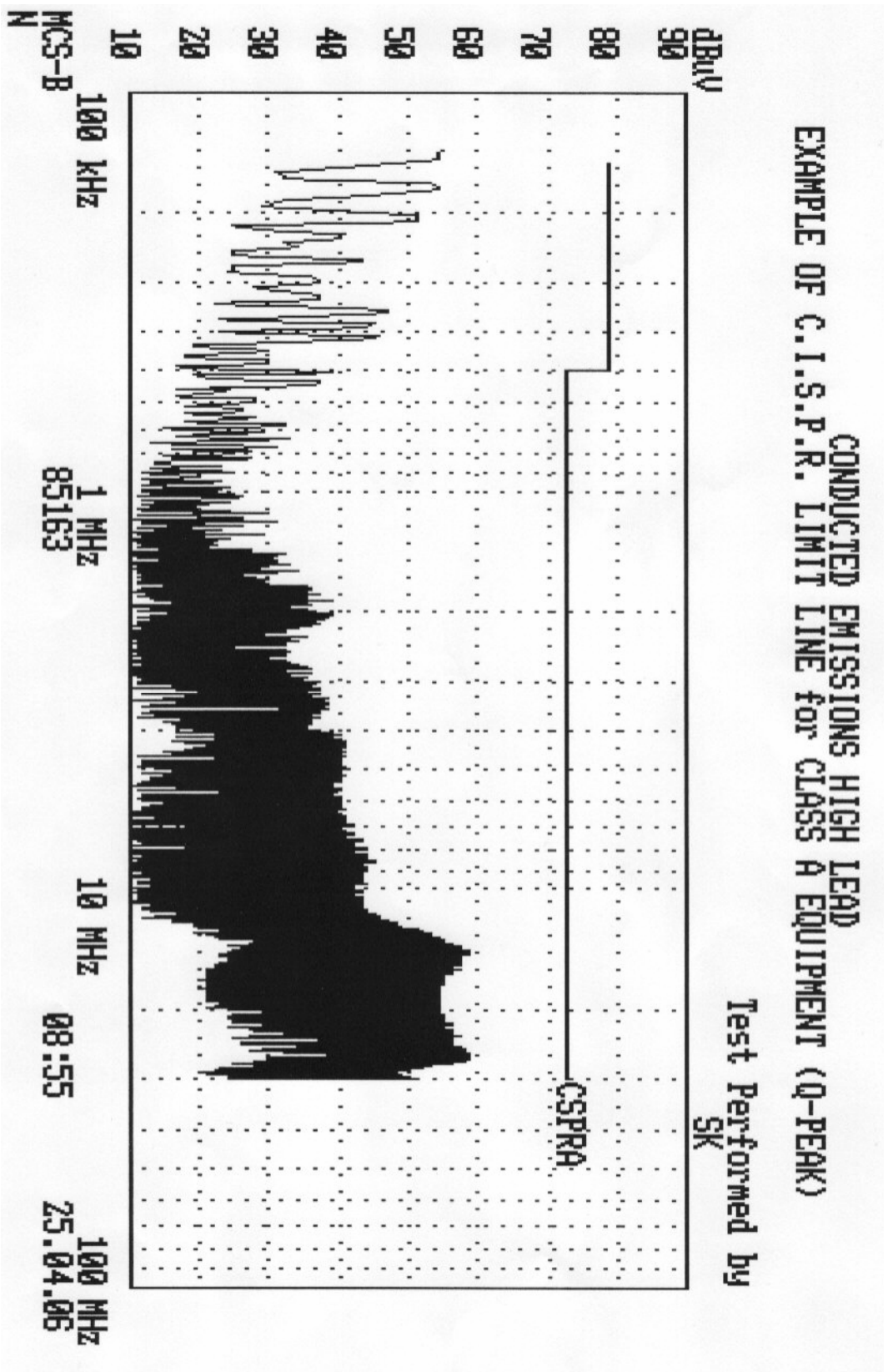
TESTI 1 NOLLAJOHTIMESSA

Taajuus (MHz)	Häiriö (dB μ V)
0,14	54
0,145731	34
0,151463	51
0,157194	54
0,162926	66,1545
0,168657	66,15128
0,174389	70,14817
0,18012	71,14516
0,185852	53
0,225972	54
0,231703	60,12169
0,237435	60,11941
0,243166	50
10,216433	59,25528
10,233467	35
10,250501	22
10,267535	60,25651
10,284569	60,25692
10,301603	22
10,318638	36
10,335672	60,25814
10,352706	36
10,36974	22
10,386774	59,25936
14,98998	60,34983
15,01002	33
15,03006	37
15,0501	60,35232
15,07014	48
15,09018	40
15,11022	60,35509
15,13026	42
15,150301	55
15,170341	60,35785
15,190381	35
15,210421	34
15,230461	60,3606
15,250501	50
15,270541	40
15,290581	60,36334
15,310621	43
15,330661	54
15,350701	59,36607
24,995992	39
25,018036	23
25,04008	16
25,062124	38
25,084168	15
25,106213	27
25,128257	37
25,150301	15
25,172345	37
25,194389	37
25,216433	15
25,238477	37
29,911824	16
29,933868	25
29,955912	27
29,977956	9
30	28

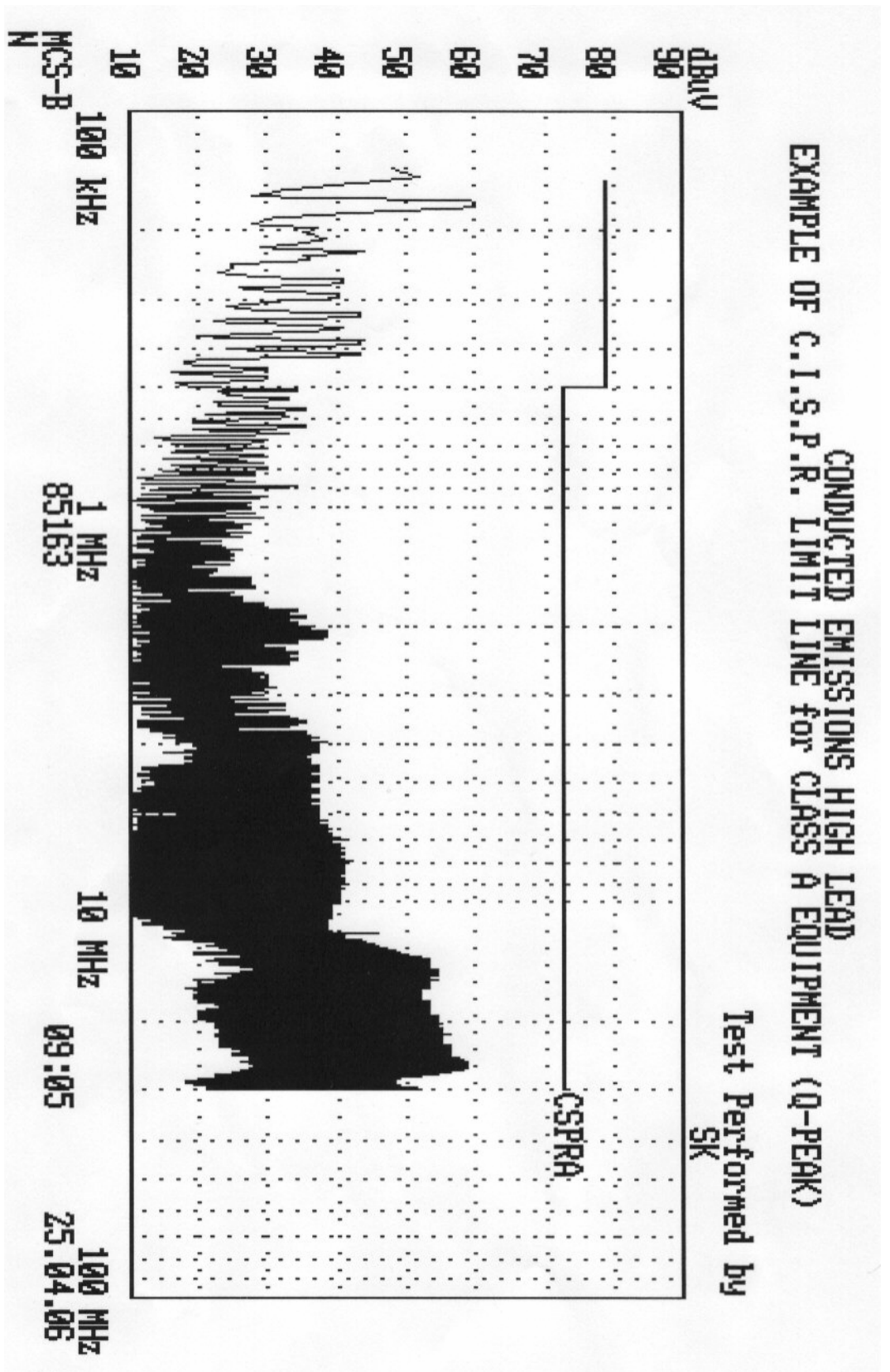
TESTI 1 VAIHEJOHTIMESSA

Taajuus (MHz)	Häiriö (dB μ V)
0,14	65,16864
0,145731	72,1649
0,151463	72,16131
0,157194	68,15784
0,162926	63,15451
0,168657	63,15128
0,174389	68,14817
0,18012	71,14516
0,185852	68,14223
0,225972	60,12402
0,231703	57,12169
0,237435	59,11941
0,243166	58,11718
10,216433	22
10,233467	52
10,250501	51
10,267535	20
10,284569	43
10,301603	52
10,318638	30
10,335672	19
10,352706	52
10,36974	52
10,386774	21
14,98998	26
15,01002	32
15,03006	52
15,0501	27
15,07014	30
15,09018	51
15,11022	31
15,13026	29
15,150301	52
15,170341	25
15,190381	24
15,210421	50
15,230461	38
15,250501	31
15,270541	50
15,290581	31
15,310621	37
15,330661	49
15,350701	25
24,995992	44
25,018036	33
25,04008	23
25,062124	45
25,084168	23
25,106213	37
25,128257	45
25,150301	15
25,172345	44
25,194389	44
25,216433	16
25,238477	45
29,911824	39
29,933868	20
29,955912	41
29,977956	39
30	14

LIITE 7: Testi 2 nollajohtimessa



LIITE 8: Testi 2 vaihejohtimessa



LIITE 9: Testin 2 testiraporttien otanta

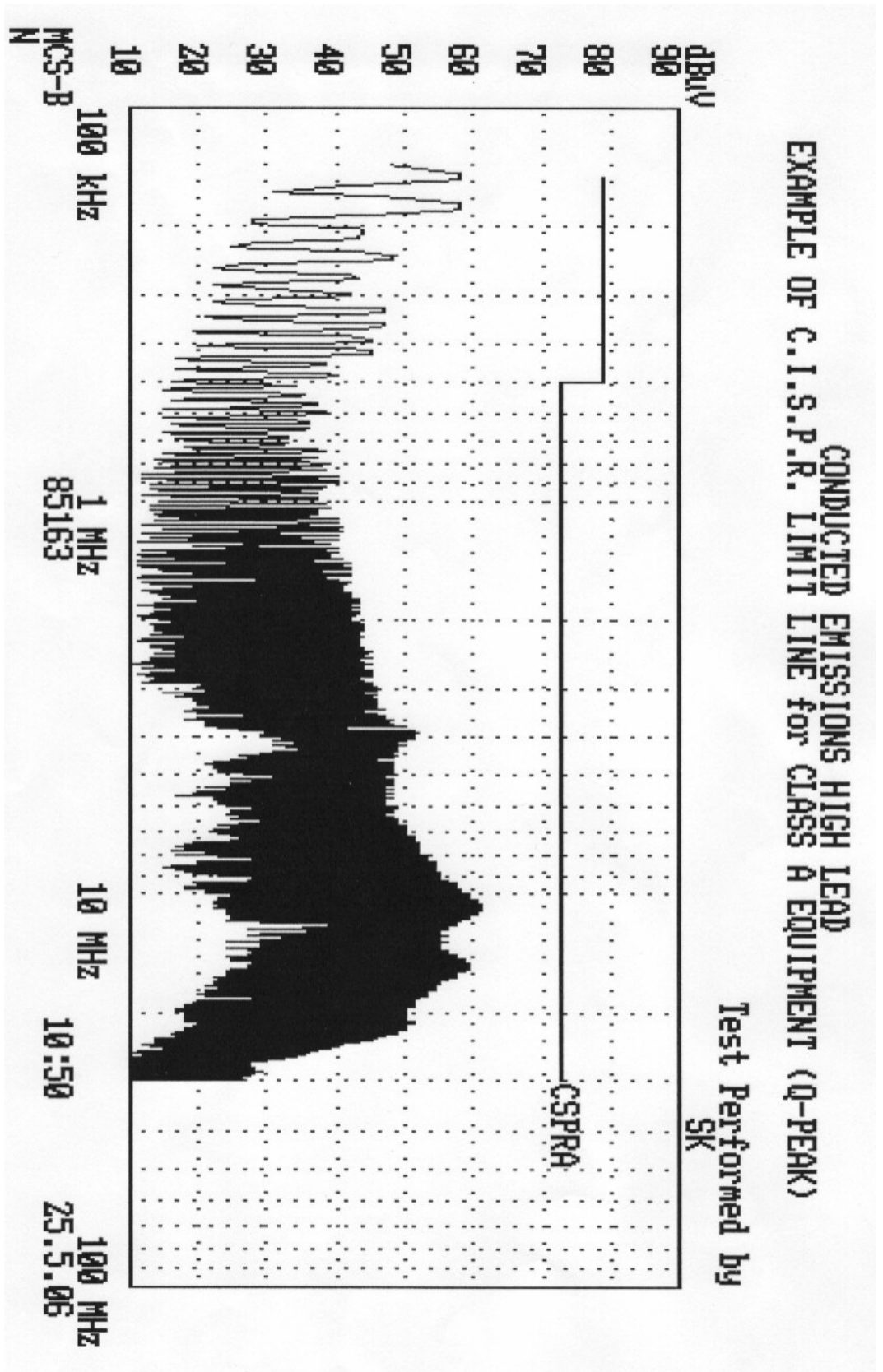
TESTI 2 NOLLAJOHTIMESSA

Taajuus (MHz)	Häiriö (dB μ V)
0,14	55
0,145731	54
0,151463	43
0,157194	31
0,162926	32
0,168657	53
0,174389	54
0,18012	43
0,185852	32
0,225972	41
0,231703	40
0,237435	32
0,243166	34
10,216433	14
10,233467	42
10,250501	42
10,267535	16
10,284569	29
10,301603	42
10,318638	41
10,335672	11
10,352706	42
10,36974	42
10,386774	25
14,98998	32
15,01002	55
15,03006	57,35139
15,0501	25
15,07014	50
15,09018	57,35417
15,11022	28
15,13026	46
15,150301	57,35693
15,170341	24
15,190381	43
15,210421	57,35968
15,230461	28
15,250501	46
15,270541	57,36243
15,290581	23
15,310621	53
15,330661	56
15,350701	24
24,995992	56
25,018036	29
25,04008	57,68857
25,062124	56
25,084168	31
25,106213	57,6902
25,128257	56
25,150301	56
25,172345	56
25,194389	33
25,216433	57,6929
25,238477	57,69344
29,911824	44
29,933868	50
29,955912	50
29,977956	25
30	51

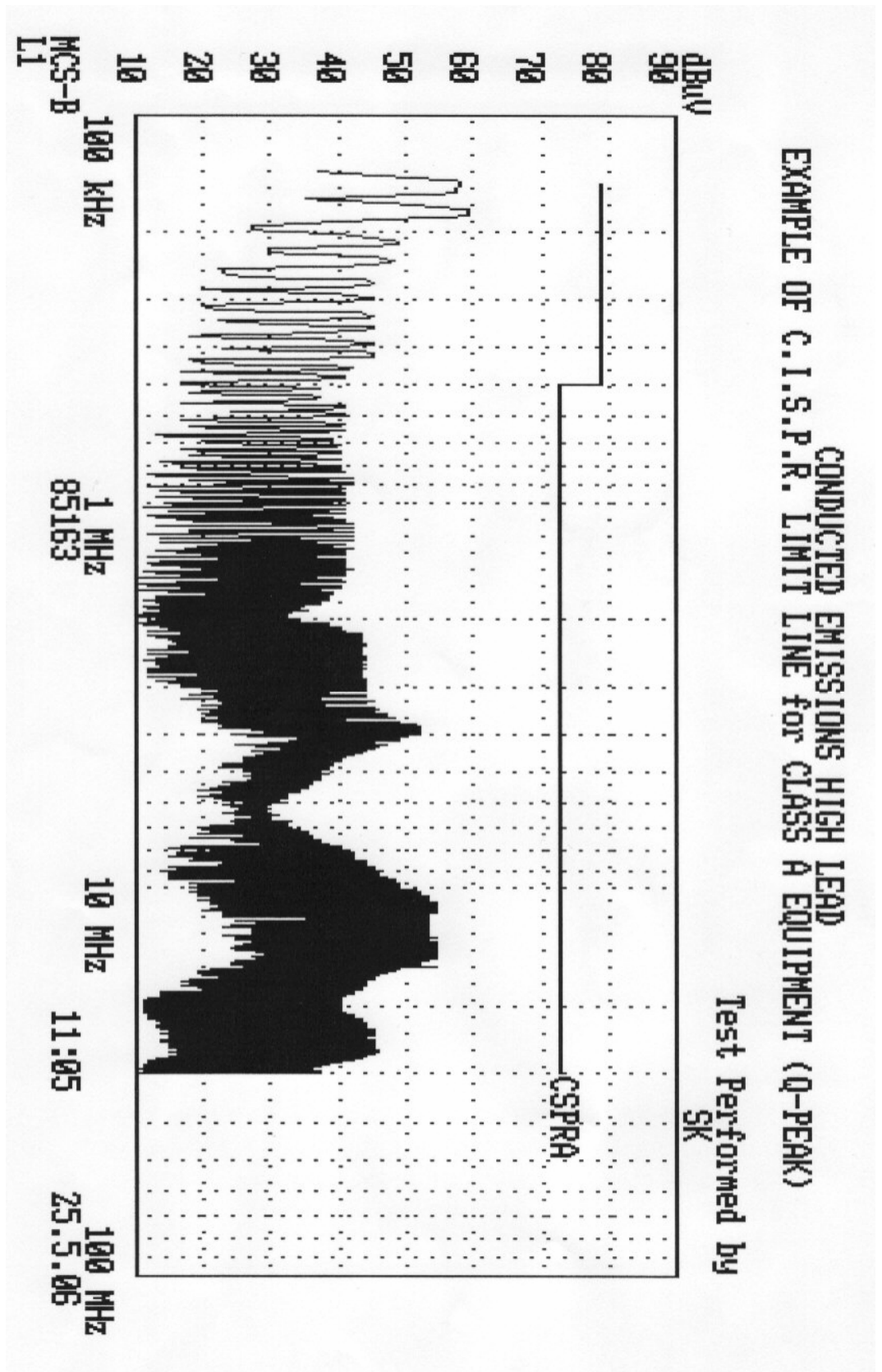
TESTI 2 VAIHEJOHTIMESSA

Taajuus (MHz)	Häiriö (dB μ V)
0,14	48
0,145731	52
0,151463	42
0,157194	32
0,162926	28
0,168657	59,15128
0,174389	60,14817
0,18012	41
0,185852	31
0,225972	44
0,231703	35
0,237435	36
0,243166	25
10,216433	39
10,233467	14
10,250501	9
10,267535	39
10,284569	39
10,301603	9
10,318638	14
10,335672	39
10,352706	20
10,36974	9
10,386774	39
14,98998	54
15,01002	29
15,03006	26
15,0501	53
15,07014	39
15,09018	22
15,11022	54
15,13026	33
15,150301	39
15,170341	54
15,190381	28
15,210421	26
15,230461	53
15,250501	32
15,270541	36
15,290581	54
15,310621	37
15,330661	37
15,350701	53
24,995992	57,68748
25,018036	56
25,04008	28
25,062124	56
25,084168	52
25,106213	33
25,128257	57,69074
25,150301	29
25,172345	56
25,194389	57,69236
25,216433	27
25,238477	57,69344
29,911824	51
29,933868	44
29,955912	52
29,977956	27
30	45

LIITE 10: Testi 3 nollajohtimessa



LIITE 11: Testi 3 vaihejohtimessa



LIITE 12: Testin 3 testiraporttien otanta

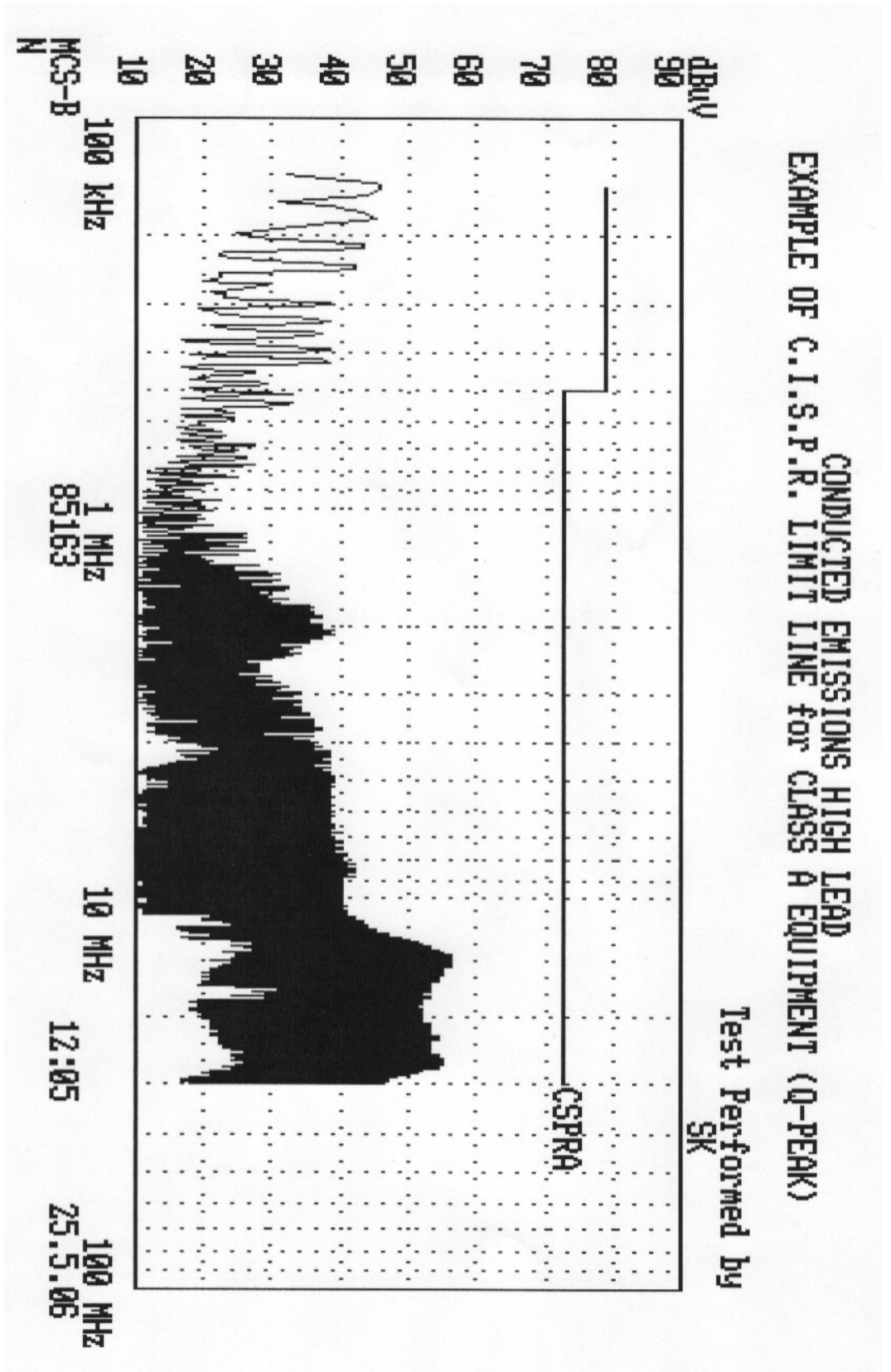
TESTI 3 NOLLAJOHTIMESSA

Taajuus (MHz)	Häiriö (dBµV)
0,14	48
0,145731	58,1649
0,151463	58,1613
0,157194	41
0,162926	31
0,168657	47
0,174389	58,14817
0,18012	58,14516
0,185852	49
0,225972	25
0,231703	43
0,237435	49
0,243166	48
10,216433	28
10,233467	51
10,250501	59,2561
10,267535	28
10,284569	23
10,301603	60,25733
10,318638	58,25774
10,335672	23
10,352706	45
10,36974	60,25895
10,386774	30
14,98998	58,34983
15,01002	28
15,03006	57,35139
15,0501	58,35232
15,07014	27
15,09018	58,35417
15,11022	58,35509
15,13026	27
15,150301	59,35693
15,170341	59,35785
15,190381	27
15,210421	58,35968
15,230461	59,3606
15,250501	30
15,270541	58,36243
15,290581	58,36334
15,310621	43
15,330661	56
15,350701	59,36607
24,995992	12
25,018036	37
25,04008	34
25,062124	11
25,084168	37
25,106213	28
25,128257	25
25,150301	37
25,172345	12
25,194389	36
25,216433	36
25,238477	12
29,911824	24
29,933868	26
29,955912	9
29,977956	25
30	25

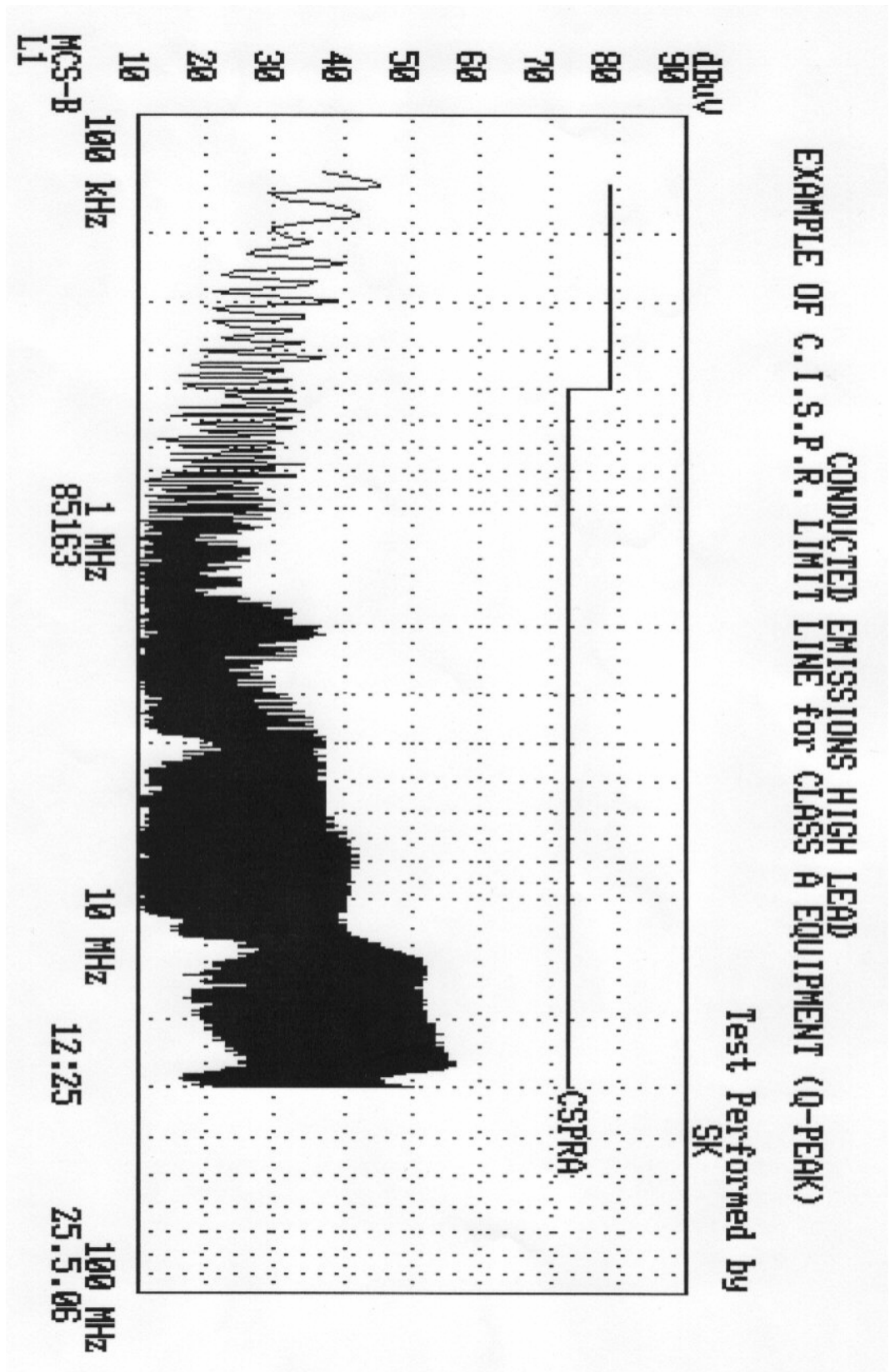
TESTI 3 VAIHEJOHTIMESSA

Taajuus (MHz)	Häiriö (dBµV)
0,14	37
0,145731	57,1649
0,151463	58,1613
0,157194	57,15784
0,162926	35
0,168657	48
0,174389	59,14817
0,18012	59,14516
0,185852	45
0,225972	30
0,231703	46
0,237435	48
0,243166	45
10,216433	51
10,233467	19
10,250501	20
10,267535	52
10,284569	48
10,301603	20
10,318638	40
10,335672	52
10,352706	20
10,36974	19
10,386774	52
14,98998	54
15,01002	38
15,03006	27
15,0501	54
15,07014	53
15,09018	28
15,11022	54
15,13026	44
15,150301	28
15,170341	53
15,190381	44
15,210421	31
15,230461	54
15,250501	51
15,270541	25
15,290581	53
15,310621	42
15,330661	28
15,350701	53
24,995992	45
25,018036	45
25,04008	15
25,062124	45
25,084168	42
25,106213	18
25,128257	44
25,150301	19
25,172345	41
25,194389	45
25,216433	16
25,238477	45
29,911824	35
29,933868	17
29,955912	37
29,977956	11
30	22

LIITE 13: Testi 4 nollajohtimessa



LIITE 14: Testi 4 vaihejohtimessa



LIITE 15: Testin 4 testiraporttien otanta

TESTI 4 NOLLAJOHTIMESSA

Taajuus (MHz)	Häiriö (dB μ V)
0,14	32
0,145731	45
0,151463	46
0,157194	43
0,162926	31
0,168657	39
0,174389	43
0,18012	45
0,185852	38
0,225972	22
0,231703	30
0,237435	42
0,243166	42
10,216433	12
10,233467	36
10,250501	40
10,267535	13
10,284569	13
10,301603	40
10,318638	19
10,335672	10
10,352706	38
10,36974	40
10,386774	12
14,98998	55
15,01002	23
15,03006	56
15,0501	54
15,07014	23
15,09018	55
15,11022	55
15,13026	22
15,150301	55
15,170341	54
15,190381	21
15,210421	54
15,230461	54
15,250501	22
15,270541	55
15,290581	55
15,310621	28
15,330661	54
15,350701	54
24,995992	27
25,018036	53
25,04008	27
25,062124	41
25,084168	54
25,106213	28
25,128257	53
25,150301	54
25,172345	24
25,194389	53
25,216433	34
25,238477	50
29,911824	46
29,933868	46
29,955912	23
29,977956	46
30	30

TESTI 4 VAIHEJOHTIMESSA

Taajuus (MHz)	Häiriö (dB μ V)
0,14	37
0,145731	44
0,151463	45
0,157194	29
0,162926	31
0,168657	37
0,174389	41
0,18012	42
0,185852	36
0,225972	26
0,231703	35
0,237435	40
0,243166	37
10,216433	40
10,233467	10
10,250501	35
10,267535	39
10,284569	10
10,301603	11
10,318638	39
10,335672	37
10,352706	11
10,36974	30
10,386774	40
14,98998	52
15,01002	22
15,03006	52
15,0501	52
15,07014	21
15,09018	52
15,11022	52
15,13026	21
15,150301	52
15,170341	50
15,190381	20
15,210421	52
15,230461	52
15,250501	23
15,270541	52
15,290581	52
15,310621	25
15,330661	51
15,350701	51
24,995992	55
25,018036	26
25,04008	55
25,062124	33
25,084168	29
25,106213	55
25,128257	26
25,150301	55
25,172345	55
25,194389	26
25,216433	55
25,238477	51
29,911824	43
29,933868	49
29,955912	25
29,977956	49
30	50

