

Lauri Vinho

SÄHKÖSUODATTIMIEN VAIKUTUS SÄHKÖN LAATUUN JA  
MAADOITUKSEN VAIKUTUS SÄHKÖSUODATTIMIIN

Automaatiotekniikan koulutusohjelma

2016

# SÄHKÖSUODATTIMIEN VAIKUTUS SÄHKÖN LAATUUN JA MAADOITUKSEN VAIKUTUS SÄHKÖSUODATTIMIIN

Vinho, Lauri  
Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Automaatiotekniikan koulutusohjelma  
Tammikuu 2016  
Ohjaaja: Tuomela, Jorma  
Sivumäärä: 47  
Liitteitä: 5

Asiasanat: sähkömagneettinen säteily, vaimennus, häiriösuojaus, suodattimet

---

Tässä opinnäytetyössä kerrotaan sähkömagneettisen säteilyn teoriasta ja yleisimmistä käyttökohteista. Työssä tutustutaan tarkemmin radiotaajuisen sähkömagneettisen säteilyn tehoon heijastukseen ja absorptioon, sekä radiotaajuisen sähkömagneettisen säteilyn sulkemiseen tilan sisä- tai ulkopuolelle faradayn -häkillä. Työssä esitellään lisäksi yleisesti erityyppisiä mittahuoneita, eli häiriösuojahuoneita, alle näkyvän valon sähkömagneettiselle säteilylle.

Työssä perehdytään tarkemmin passiivisiin alipäästösuodattimiin, jotka ovat tarkoitettu häiriösuojahuoneiden sähkö-, signaali- ja datasyöttöön. Kerrotaan tyypillisistä standardeista, joiden mukaan suodattimien suorituskykyä testataan, sekä häiriötyypeistä, joita mahdollisesti siirtolinjoihin syntyy. Työssä tutustutaan suodattimien rakenteelliseen sijoitteluun ja sen vaikutukseen suodattimen toiminnassa. Lisäksi tutustutaan komponentteihin, joista suodattimia rakennetaan.

Työssä testattiin suodattimien vaikutusta sähkölaatuun ja työssä tutustuttiin Fluke -sähkölaatu analysaattoriin. Lisäksi testattiin suodattimen asennuksen vaikutusta radiotaajuuksien vaimennustiiviyteen ja tutustuttiin Megger -tarkkuusvastusmittariin, sekä spektrianalysaattoriin ja signaaligeneraattoriin radiotaajuusvaimennusmittauksissa.

# THE ACTION OF ELECTRIC FILTER ON THE QUALITY OF SUPPLY AND THE ACTION OF GROUNDING ON THE ELECTRIC FILTER

Vinho, Lauri

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Automation Engineering

January 2016

Supervisor: Tuomela, Jorma

Number of pages: 47

Appendices: 5

Keywords: electromagnetic radiation, attenuation, interference protection, filters

---

Theory of this thesis tells about electromagnetic radiation and the most common applications. In this thesis is told accurately about power, reflection and absorption of electromagnetic radiation and isolating radio frequency electromagnetic radiation inside or outside of enclosure with a faradays cage. This thesis also shows in general different types of shielded enclosures to electromagnetic radiation below visible light frequencies.

In this thesis are familiarized closely to passive low pass filters, which are intended for shielded enclosures power, signal and data supplies. Typical standards are told out, which are purposed to test filters performance. Different interference types are explained, which are typically shown in transfer lines. Different layouts of filter are told out and explained its effect to filters performance. Also is written about components of which contains in the filter.

The scope of the thesis was to test the action of electric filter on the quality of supply. Fluke energy analyzer was also familiarized. The second scope was to test the action of grounding on the electric filter to radio frequency attenuation. Megger accurate resistance measuring instrument, HP spectrum analyzer and HP signal generator were familiarized as well.

# SISÄLLYS

1	ENSIMMÄINEN LUKU/ JOHDANTO .....	6
2	HÄIRIÖSUOJAUS YLEISESTI.....	7
2.1	Säteily .....	7
2.1.1	Sähkömagneettinen aalto.....	8
2.1.2	Sähkömagneettisten aaltojen lähteitä .....	8
2.1.3	Sähkömagneettisten aaltojen taajuusalueet ja käyttö.....	10
2.2	Sähkömagneettisen aallon teho ja intensiteetti .....	12
2.3	Vaimennus ja heijastus .....	13
2.4	Absorptio.....	14
2.5	Häiriösuojausperiaate.....	14
2.5.1	Faradayn häkki .....	15
2.5.2	Aukot häiriösuojuksessa .....	15
2.6	Tyypillisiä häiriösuojuhuoneita.....	16
2.7	Häiriösuojaus käytötarkoituksia.....	16
3	SÄHKÖSUODATTIMET .....	18
3.1	Suodattimien historiaa .....	18
3.2	Sähkösuodattimien tarkoitus häiriösuojuksessa.....	18
3.3	Sähkösuodattimien vaatimukset.....	19
3.3.1	MIL-STD-220C .....	19
3.3.2	MIL-STD-461F .....	20
3.3.3	Muita standardeja .....	20
3.4	Sähkösuodattimien tyypit.....	20
3.4.1	Suodatustapa .....	21
3.4.2	Häiriömuodot .....	22
3.4.3	$\pi$ -, T- ja L- malliset suodattimet .....	23
3.5	Sähkösuodattimen rakenne .....	24
3.5.1	Sähkösuodattimen rakenne, kotelo.....	24
3.5.2	Sähkösuodattimen komponentit, kondensaattori.....	25
3.5.3	Sähkösuodattimen komponentit, kela.....	26
3.6	Virran ahtautuminen johdon pinnalle .....	27
4	SÄHKÖSUODATTIMIEN TESTAUS .....	28
4.1	Testausmetodien valinta.....	28
4.2	Suunnitelma sähkön laadun mittaukselle.....	28
4.2.1	Mittalaitteet sähkön laadun tarkasteluun .....	29
4.2.2	Fluke 434 -analysointilaitteet .....	29
4.2.3	Fluke 434 -analysointilaitteen käyttöönotto ja mittaukset .....	30

4.2.4	Sähkön laadun tarkastelun testausvaiheet .....	31
4.3	Suunnitelma maadoituksen resistanssin mittaukselle .....	33
4.3.1	Mittalaitteet maadoituksen vaikutuksien tarkasteluun .....	33
4.3.2	Megger Ducter milliohmimittari .....	34
4.3.3	Megger Ducter DLRO-10X toiminnot .....	35
4.3.4	Megger Ducter DLRO-10X automaattinen mittaus ja DH 4 mittakahvat .....	37
4.3.5	RF -vaimennusmittaukset .....	39
4.3.6	Maadoituksen vaikutuksen testausvaiheet.....	40
4.4	Sähkönlaadun testauksien tulokset .....	41
4.5	Maadoituksen resistanssin vaikutuksien tulokset .....	43
5	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	45
6	YHTEENVETO .....	45
	LÄHTEET.....	46
	LIITTEET	

## 1 ENSIMMÄINEN LUKU/ JOHDANTO

Työn tavoitteena oli tutustua sähkösuodattimiin ja löytää mahdollisesti ratkaisuja niiden toimintavarmuuden lisäämiseksi, sekä todentaa vaikuttavatko suodattimet sähkönlaatuun ETS-Lindgren Oy:lle. Alkuperäisen suunnitelman mukaan oli tarkoitus todentaa Euroopassa valmistettavien suodattimien toimivuus yli 10 GHz taajuuksilla, mikä yritysratkaisujen myötä ei ollut enää aiheellista.

ETS-Lindgren on amerikkalainen pörssi-yhtiö, joka on osa Esco konsernia. Eurassa ETS-Lindgren aloitti toimintansa metalliteollisuuden alihankkijana vuonna 1975 nimellä Euramecano. Myöhemmin häiriösuojahuoneet ja -komponentit tulivat päätuotteeksi ja yhtiön nimeksi tuli Euroshield. Kun ETS-Lindgren 2000 luvun alussa osti Euroshieldin liiketoiminnan kokonaisuudessaan, jäi Euroshield vielä nimenä korkealaatuisille häiriösuojaosille, joita edelleen Suomessa valmistetaan.

Sähkösuodattimet ovat osa ETS-Lindgrenin tuotevalikoimaa. Suodattimia on valmistettu Englannissa vuoteen 2015 asti, jolloin tuotanto lopetettiin ja siirrettiin kokonaan Yhdysvaltoihin. Euroopassa valmistettavat suodattimet olivat joiltain malleilta kysytyjä ja tiettyjen mallien tuotantoa jatketaan edelleen Yhdysvalloissa.

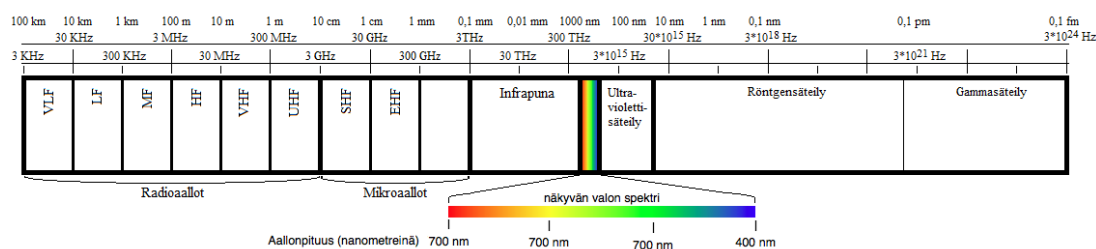
Tuotannon lopettaminen Englannissa vaikutti myös tämän työn tekemiseen ja alkuperäistä suunnitelmaa olikin muutettava sen mukaan. Sähkönlaadun tarkkailu oli ajankohtainen, koska suodattimien on väitetty vaikuttavan siihen. Toisena tutkittavana asiana nousi esille suodattimen asennus ja sen oikeellisuuden vaikutus toimintaan.

## 2 HÄIRIÖSUOJAUS YLEISESTI

### 2.1 Säteily

Säteilystä puhuttaessa, tulee ensimmäisinä varmasti monelle mieleen radioaktiivinen säteily ja ydinvoima. Säteily käsittää myös monta muutakin asiaa kuin vain radioaktiivisuuden, kuten lämpösäteily, avaruussäteily, röntgensäteily ja valo. Edellä mainittuja säteilyjä yhdistää se, että ne kaikki ovat sähkömagneettista säteilyä, eri taajuuksilla.

Sähkömagneettisen säteilyn spektri (kuva 1) alkaa noin sadasta hertsistä ja päättyy noin jottahertsiiin, joka on  $10^{24}$  Hz eli 24 nollaa numeron yksi jälkeen. Pitkät radioaalлот ovat pienimmän taajuuden sähkömagneettista säteilyä, taajuuden kasvaessa tulevat mikroaallot ja infrapunavallo.  $4,0 \cdot 10^{14} - 7,9 \cdot 10^{14}$  Hz on näkyvän valon taajuusväli. Näkyvästä valosta on tiedetty jo 1820 luvulta lähtien sen olevan poikittaista aaltoliikettä. Näkyvän valon jälkeen taajuuden kasvaessa tulee ultravioletivallo, röntgen säteily ja gammasäteily taajuusalueen korkeimmassa päässä. (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2007, 174.)



Kuva 1. Sähkömagneettisen säteilyn spektri (Vinho 2016)

### 2.1.1 Sähkömagneettinen aalto

Sähkömagneettinen aaltoliike aiheuttaa aineen lämpenemistä saaden väliaineen atomin värähtelemään (Energiateollisuus 2007, 6). ”Sähkömagneettinen aalto sisältää etenemissuuntaa vastaan kohtisuorasti värähtelevän sähkö- ja magneettikentän. Aallossa molemmat kentät esiintyvät aina yhdessä, koska ajallisesti muuttuva magneettikenttä aiheuttaa sähkökentän ja ajallisesti muuttuva sähkökenttä magneettikentän.” (Mäkelä, Mäkelä & Siltanen 1997, 183.)

Sähkömagneettiset aallot syntyvät aina kiihtyvistä sähkövarauksista. Varauksen ollessa kiihtyvässä liikkeessä siitä lähtee ympäristöön myös sähkömagneettinen aalto, joka etenee valon nopeudella. Aaltojen säteilykenttien voimakkuudet ovat kääntäen verrannollisia etäisyyteen nähden. (Mäkelä, Mäkelä & Siltanen 1997, 183.)

### 2.1.2 Sähkömagneettisten aaltojen lähteitä

Sähkömagneettisten aaltojen käyttösovelluksia ovat esimerkiksi matkapuhelimet, valaistus, lämmitys, tutkat, televisio, radio ja mikroaaltouunit (Energiateollisuus 2007, 6). Ukkosmyrskyjä on jatkuvasti käynnissä eri puolilla maailmaa, jotka ylläpitävät sähkökenttää. Salaman isku aiheuttaa sähkömagneettisia häiriöitä 5 - 100 kHz:n taajuuksilla. 50 Hz:n magneettikenttiä syntyy normaalin sähköverkon yhteydessä käytettäessä ja siirrettäessä sähköä. Sähkömagneettinen aalto voi olla jopa niin voimakas, että syntyy palovammoja. Esimerkiksi suurtehotutkat, yleisradiolähtetimet ja mikroaaltokuivaimet voivat olla riittävän tehokkaita väärin käytettyinä (Nyberg & Jokela 2006, 21 - 22.)



Radioaallot taajuudeltaan 30 kHz ja 3 GHz voivat olla tehty yksinkertaistettuna LC-värähtelypiirillä. LC-värähtelypiirissä on kela, jolla on induktanssi  $L$ , sekä kondensaattori, jolla on kapasitanssi  $C$ , kytketty sarjaan keskenään. Värähtely tapahtuu, jos esimerkiksi alussa kondensaattorilla on varaus  $q$ , jolloin kondensaattori alkaa purkaa varausta ja purkausvirta  $i$  saavuttaa maksimin, kun kondensaattori on varaukseton. Nyt indusoitunut jännite kelan päissä on suurimmillaan, ja se ylläpitää virtaa. Energia on nyt kelan magneettikentässä. Kelan päissä oleva jännite saa kondensaattorin varautumaan vastakkaisesti alkutilanteeseen nähden. Kondensaattorin purkautuessa jälleen saa piirin virta minimin ( $-i$ ) ja energia siirtyy kelan magneettikenttään. (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2007, 174 - 175.)

LC-värähtelypiirin ollessa täysin vastukseton säilyy piirissä oleva energia ja värähtely ei vaimene. Tosin jo komponenteissa itsessään, sekä johtimissa on käytännössä aina resistanssia. Resistanssista johtuen vaimenee värähtelypiirin energia tietyn ajan kuluttua nolnaan, muuttuen lämmöksi, ilman ulkoista tehonsyöttöä.

Haluttaessa tuottaa radioaaltoja, pitää edellä mainitun värähtelypiirin aikaansaama korkeataajuinen vaihtojännite johtaa esimerkiksi suoraan dipoliantenniin, joka on mitaltaan aallonpituus jaettuna kahdella  $[\lambda/2]$ . Aallonpituus selvitetään jakamalla valonnopeus  $c$ , joka on sähkömagneettisen aallon etenemisnopeus, värähtelytaajuudella  $f$  [ $\lambda = c/f$ ]. Vaihtojännite syötetään puoleen väliin antennia, jolloin antennin haaran pituudeksi tulee  $[\lambda/4]$ . Edellä mainittua antennia kutsutaan dipoliantenniksi, koska se muistuttaa sähköisen dipolin kenttää, jossa kaksi vastakkaista varausta ovat tietyn etäisyyden päässä toisistaan. Antennin varausjakauman vaihdelleessa leviää ympäristöön aaltomainen sähkökenttä valon nopeudella. (Mäkelä, Mäkelä & Siltanen 1997, 184.)

Mikroaallot taajuudeltaan 300 MHz ja 3000 GHz, voidaan synnyttää klystroni- ja magnetroniputkissa optimoidulla taajuudella värähtelevän elektronisuihkun avulla (Suvanto & Laajalehto 2005, 314).

### 2.1.3 Sähkömagneettisten aaltojen taajuusalueet ja käyttö

Radioaallot voidaan jakaa aallonpituuden ja käyttötarkoituksen mukaan taajuusalueisiin. Puhelimiin ja navigointiin käytetään VLF (Very Low Frequencies) taajuusalueetta, välillä 3 - 30 kHz. Pitkiin radioaaltoihin ja navigointiin käytetään LF (Low Frequencies) taajuusalueetta, välillä 30 - 300 kHz ja keskipitkät radioaallot toimivat MF (Medium Frequencies) taajuusalueella, välillä 0,3 - 3 MHz. Radioamatöörien kaukoliikenteessä käytetään yleensä lyhyitä radioaaltoja, HF (High Frequencies) taajuusalueetta, välillä 3 - 30 MHz. Televisio, radio ja tietoliikenne toimii VHF (Very High Frequencies) taajuusalueella, välillä 30 - 300 MHz. Televisio, matkapuhelinverkko ja mikroaaltojen L-kaista toimii UHF (Ultra High Frequencies) taajuusalueella, välillä 0,3 - 3 GHz. (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2007, 179.)

Mikroaallot osuvat taajuusvälille 300 MHz ja 3 THz. Mikroaaltoja käytetään yleisesti tutkasovelluksissa niiden tarkan suunnattavuuden vuoksi siksi, että ne heijastuvat hyvin metallipinnoista. Oikein valitulla aallonpituudella jopa sadepilvistä saadaan mikroaltoa säteily heijastumaan säätutkasovelluksissa. Hyvin tunnettu mikroaltoa sovellus on myös mikroaaltouuni. Mikroaaltouunien säteilyn taajuus on yleensä 2,4 GHz ja yleensä vesimolekyylien sähköisten dipolien edestakainen liike synnyttää lämmön aineessa. (Suvanto & Laajalehto 2005, 314.)

Infrapunasäteily osuu taajuusalueeseen 3 - 300 THz. Atomien ja molekyylien värähtelytilojen muutokset aiheuttavat infrapunasäteilyä eli lämpösäteilyä. Kappale säteilee eri aallonpituuksilla ja voimakkuudella, kappaleen pinnan laadusta ja lämpötilasta riippuen. Kappaleen ollessa riittävän kuuma, esimerkiksi rauta, joka on 600 °C, rupeaa lähettämään näkyvän valon taajuutta ja hehkuu punaisena. Lämpökamera on infrapunasäteilyyn perustuva laite. Aallonpituuden ja säteilyvoimakkuuden perusteella lämpökamera tunnistaa eri pintojen lämpötiloja ja se toimii hyvin myös savussa ja sumussa, joten se on tehokas apu tulipaloissa havaitsemaan mahdollisesti loukkuun jääneitä ihmisiä ja eläimiä. (Suvanto & Laajalehto 2005, 314 - 316.)

Näkyvä valo osuu taajuusalueeseen 430 - 750 THz. Elektronien liike atomeissa oikealta energiatilalta seuraavaan, saa aikaan näkyvän valon. Lasiprisman läpi kulkeva valo hajoaa väreihin, jokaisella värillä on oma sähkömagneettinen aallonpituus. Aallonpituus on pisimmillään punaisella valolla (700 nm) ja lyhimmillään violetilla valolla (400 nm). (Suvanto & Laajalehto 2005, 316.)

Ultraviolettisäteily syntyy vastaavasti atomien ja molekyylien energianmuutoksissa, kuten näkyvälläkin valolla, mutta suurempina. Ultraviolettisäteilyä syntyy erityisesti auringossa. UV-B ja UV-C säteily, sekä osittain myös UV-A säteilystä absorboituu tehokkaasti ilmakehän yläkerroksissa olevan otsonin ansiosta. UV-säteily on erittäin haitallista silmille ja sitä syntyy esimerkiksi sähköhitsauksen valokaassa. UV-säteilyä hyödyntäviä sovelluksia ovat mm. hammaspaikkamuovien, lakkojen ja maalien kovettaminen. Lisäksi UV-säteilyä hyödynnetään desinfiointissa sen hyvän bakteerien ja virusten tuhoamiskyvyn ansiosta. (Suvanto & Laajalehto 2005, 317.)

Röntgensäteily ja gammasäteily ovat ionisoivia säteilyjä, joka tarkoittaa, että elävän solun DNA-molekyyli voi muuttua säteilyn ollessa riittävän voimakas ja pitkäkestoinen. Röntgensäteet ovat tunnettuja läpivalaisulaitteissa, lääketieteen ja tekniikan sovelluksissa. Kun varautunut hiukkanen törmää suurella nopeudella metallipintaan ja liike hidastuu, syntyy röntgensäteitä. Gammasäteily puolestaan syntyy atomiytimissä tapahtuvissa muutoksissa tai ydinreaktioissa. Gammasäteilyä käytetään esimerkiksi syöpäsolujen tuhoamiseen. (Suvanto & Laajalehto 2005, 317.)

## 2.2 Sähkömagneettisen aallon teho ja intensiteetti

Sähkömagneettiset aallot kuljettavat edetessään mukanaan myös energiaa, joka liittyy sähkö- ja magneettikenttiin. Kokonaisenergia on siis suoraan verrannollinen sähkö- ja magneettikentän energiatiheyksiin. Sähkökentän energiatiheys [ $w_E = \epsilon_0 E^2/2$ ], jossa  $E$  = sähkökentän voimakkuus ja  $\epsilon_0$  = tyhjiön permittiivisyys. Sähkökentän energiatiheyteen vaikuttaa väliaineen permittiivisyys  $\epsilon$ , joka on ilmassa lähes yhtä suuri kuin tyhjiössä. Magneettikentän energiatiheys [ $w_B = B^2/2\mu_0$ ], jossa  $B$  = magneettikentän voimakkuus ja  $\mu_0$  = tyhjiön permeabiliteetti. Magneettikentän energiatiheyteen puolestaan vaikuttaa väliaineen permeabiliteetti  $\mu$ , joka myös on ilmassa lähes yhtä suuri kuin tyhjiössä. Näistä saadaan laskettua ja johdettua kokonaisenergiatiheys [ $w = EB \sqrt{(\epsilon_0/\mu_0)}$ ]. (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2007, 185.)

Tehon laskemiseksi pitää energian tilavuuden derivaatta jakaa ajan derivaatalla. Säteilyteho on näin ollen johdettuna [ $P = wAc$ ], jossa  $w$  on kokonaisenergiatiheys,  $A$  = säteilyn pinta-ala ja  $c$  = valon nopeus ja yksiköksi tulee watti. Säteilyn intensiteetti saadaan jakamalla teho pinta-alalla [ $S = w/c$ ]. Yhdistämällä kaksi edellistä kaavaa saadaan intensiteetille [ $S = P/A$ ] ja yksiköksi tulee wattia per neliometri. Koska säteilyn intensiteetti on ajan mukaan muuttuva arvo, intensiteetille saadaan aikakeskiarvillisesti keskimääräinen säteilyintensiteetti [ $S_k = \hat{E}^2/2Z$ ], jossa  $Z$  on sähkömagneettisen aallon aaltoimpedanssi ja  $\hat{E}^2$  = sähkökentän huippu voimakkuus. (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2007, 185 - 187.)

Sähkömagneettisen aallon teho ilmoitetaan usein tehotasoina desibeleinä dB, tai desibelimilliwatteina dBm.  $L_P = 10\lg(P/P_0)$  dB tai  $L_P = 10\lg(P/P'_0)$  dBm, joissa vertailutehot ovat  $P_0 = 1$  W ja  $P'_0 = 1$  mW. 0 dB vastaa 1 W tehoa ja 0 dBm vastaa 1 mW tehoa. Antennien vahvistuksessa käytetään myös yksikköä desibeli dB.  $\beta = 10\lg(P/P_t)$  dB, jossa  $P$  on tehollinen isotrooppinen säteilyteho eli EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) ja  $P_t$  on antennin lähetysteho. (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2007, 337 - 338.)

Sähkökentän voimakkuutta laskettaessa pitää käyttää kerrointa 20,  $20\lg(E/E_0)$  dB (Sihvola & Lindell, 72).

### 2.3 Vaimennus ja heijastus

Tasoaallon tapauksessa, jossa sähkömagneettinen aalto etenee lineaarisesti ja tasaisesti yhteen suuntaan, ei häviöttömässä väliaineessa tapahdu vaimennusta. Tällaista tasoaaltoa onkin helppo käyttää myöhemmin esimerkkinä tutkittaessa heijastusta. Mikäli kuvitellaan sähkömagneettisen aallon lähteen olevan pistemäinen, joka säteilee pallomaisesti tasaisesti ympäristöön, voidaan vaimeneminen häviöttömässä väliaineessa laskea helposti. Tehotiheys on käänteisesti verrannollinen etäisyyden neliöön nähden, koska pallon pinta-ala on säteen neliössä kasvava arvo. Tämä vaimennus muutettuna desibeleihin on 6 dB, kun etäisyys kaksinkertaistuu. Todellisuudessa vaimennusta lisäävät maan geometriset muodot, ihmisen rakennelmat ja väliaineen häviöllisyys. (Sihvola & Lindell, 164 - 165.)

Aineissa, joissa sähkömagneettinen aalto etenee tai heijastuu on yleensä aina sähköisiä häviöitä, joiden johdosta osa sähkömagneettisesta tehosta muuttuu lämmöksi. Väliaineessa on permittiivisyys  $\epsilon$  ja heijastusaineessa on permeabiliteetti  $\mu$ . Magneettisia häviöitä on esimerkiksi ferriitissä. (Sihvola & Lindell, 66 - 71.)

Vaimennusta voidaan ilmaista myös desibeleinä. Sähkökentän voimakkuuden vaimennuksessa lasketaan kaavalla  $-20\lg(E/E_0)$  dB, jossa sähkökentän alkuperäinen voimakkuus on  $E_0$  ja vaimentunut voimakkuus on  $E$ . Miinusmerkki lauseen edessä siitä syystä, että  $E$  on pienempi kuin  $E_0$ , joka tekee logaritmistä negatiivisen luvun. Tehollisen arvon vaimennuksessa käytetään kerrointa 10, koska tehotiheys on verrannollinen kentän neliöön. Tehollinen vaimennus lasketaan kaavalla  $-10\lg(P/P_0)$  dB, jossa alkuperäinen teho on  $P_0$  ja vaimentunut teho on  $P$ . (Sihvola & Lindell, 72 - 73.)

Metalliseinään osuessaan kohtisuora häviötön tasoaalto heijastuu enimmäkseen takaisin, koska metallin tunkeutumissyvyys on erittäin pieni ja suhteellinen permeabiliteetti erittäin suuri. Heijastukseen vaikuttaa väliaineiden aaltoimpedanssi, joka on ilmalle  $377 \Omega$  ja raudalle huomattavasti suurempi. Aaltoimpedanssin suuri muutos ilman ja metallin rajapinnalla vastustaa tasoaallon siirtymistä metalliin tehokkaasti. (Sihvola & Lindell, 74 - 77.)

Suojauksen vaimennus voidaan laskea yksinkertaistettuna heijastusvaimennus + absorptiovaimennus. Esimerkiksi 10 GHz mikroaalto, jonka teho on 1 W (30 dBm), osuu ilmassa kulkiessaan 2mm paksuun metalliseinään, vaimenee reilusti yli 100 dB. Kyseessä on kaukokenttä, koska lähteen kuviteltu etäisyys seinästä on suurempi kuin  $\lambda/2\pi$ , jossa  $\lambda$  = aallonpituus 3 cm.

Heijastusvaimennus tapahtuu yleensä johtavasta pinnasta. Aaltoimpedanssi muuttuu ilmasta tullessaan johtavalle pinnalle hyvin voimakkaasti, joka aiheuttaa heijastuksen. Absorptiovaimennus muodostuu materiaalin johtavuudesta ja permeabiliteetista. Materiaalin permeabiliteetti on riippuvainen taajuudesta, sekä magneettikentän voimakkuudesta. (Sepponen, 6.4 - 6.9.)

## 2.4 Absorptio

Absorptiolla tarkoitetaan tapahtumaa, jossa sähkömagneettisen säteilyn energia imeytyy väliaineeseen, jossa säteily muuttuu pääsääntöisesti lämmöksi, heikentäen säteilyn tehoa heijastuksessa. Absorptiota käytetään hyväksi häiriösuojatun huoneen sisällä tapahtuvan säteilyn heijastuksia vaimennettaessa tai ohjattaessa.

## 2.5 Häiriösuojauksen periaate

Kuten aiemmin olemme huomanneet, on metalli erittäin hyvä materiaali estämään sähkömagneettisen aallon kulku. Metallia onkin hyvä materiaali häiriösuojatun huoneen rakentamiseen, joka siis estää sähkömagneettisen aallon kulun huoneeseen sisälle tai huoneesta ulos. Tällaista huonetta kutsutaan Faradayn häkiksi, sen keksijän fyysikko Michael Faradayn mukaan.

### 2.5.1 Faradayn häkki

Faradayn häkki toimii siten, että poistovoima sähkövarausten välillä pyrkii pitämään varaukset johteen pinnalla. Positiiviset varaukset keskittyvät sähkökentän osoittamaan suuntaan ja negatiiviset varaukset vastakkaiseen suuntaan. Nyt Faradayn häkin vastakkaiset seinät ovat varautuneet vastakkaisesti ja luovat oman sähkökenttensä, joka kumoaa ulkoisen sähkökentän voiman häkin sisällä. Häkin vaimennukseen vaikuttaa sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus ja häkin aukkojen läpimitta. (Young & Freedman 2004, 858.)

Häiriösuojatun huoneen rakenteessa hankalia paikkoja ovat saumat, läpiviennit, ilmanvaihtoaukot, luukut, ovet, sekä ikkunat. Erityisesti tarkkuutta on kiinnitettävä tehon ja datan syötöissä, joista on erikseen suodatettava häiriötaajuuDET pois, vietäessä häiriösuojahuoneeseen. Datan vieminen valokuidulla on kuitenkin mahdollista ilman suodattamista, koska valon taajuus on paljon korkeampi kuin radioaaltojen, läpiviennit on kuitenkin pidettävä halkaisijaltaan riittävän pienenä.

### 2.5.2 Aukot häiriösuojauksessa

Tehtäessä aukkoja suojaukseen on syytä tutustua putki-ilmiöön. Putki-ilmiöstä puhuttaessa tarkoitetaan sähkömagneettisen säteilyn vaimennusta putkessa kulkiessaan. Vapaalle aukolle voidaan laskea suurin halkaisija taajuudella  $f$  siten, että vaimennus on 20 dB kaavalla  $SE = 20 \log(\lambda/2D)$ , jossa  $\lambda$  on aallonpituus ja  $D$  on aukon halkaisija. Tästä johtamalla saadaan, että  $D \leq c/20*f = \lambda/20$ . Laskemalla 300 MHz:n taajuudella aukko saa olla enintään 5 cm ja 2 GHz taajuudella enintään 8 mm, jotta vaimennus on 20 dB. (Sepponen, 6.13 - 6.15.)

Ympyrän muotoiselle putkelle voidaan laskea vaimennus  $A \sim 1,8*10^{-4}*l*f_{\text{MHz}}\sqrt{(f_c/d/f_{\text{MHz}})^2-1}$ , jossa  $f_c$  on  $1,76*10^5$  [MHz],  $l$  on putken pituus [mm],  $d$  on aukon suurin halkaisija [mm] ja  $f_{\text{MHz}}$  on taajuus [MHz]. Suorakulmaiselle putkelle  $f_c$  on  $1,5*10^5$  [MHz]. Rajataajuus, jolloin vaimennusta ei enää ole, voidaan laskea pyöreälle putkelle  $F_c = 1,76*10^5/d$  [MHz], jossa  $d$  on aukon suurin halkaisija ja suorakulmaiselle putkelle  $F_c = 1,5*10^5/d$  [MHz]. (Sepponen, 6.13 - 6.15.)

## 2.6 Tyypillisiä häiriösuojahuoneita

Shielded enclosure, eli häiriösuojahuone estää sähkömagneettisen säteilyn huoneeseen sisälle tai huoneesta ulos. Häiriösuojahuoneita käytetään mm. EMC mittauksissa, EMP suojauksessa, radiotaajuus sekä mikroaaltosuojauksessa.

Anechoic chamber, eli radiokaiuton huone absorboi sähkömagneettisen säteilyn kokonaan, eikä heijastuksia pääse tapahtumaan. Kaiuton huone kuvaa tilannetta, jossa häiriötön tila on äärettömän kokoinen, eikä mikään tekijä vääristä tuloksia. Radiokaiuton huone rakennetaan yleensä häiriösuojahuoneesta ja huoneen pinnat päällystetään tyypillisesti ferriittitiilillä, hiiltä sisältävällä vaahtopyramidilla tai molemmilla (fully anechoic chamber). Joissain tapauksissa ei lattiaan laiteta ollenkaan vaimenusmateriaalia, vaan se jätetään maapotentiaaliin (semi-anechoic chamber). Esimerkiksi jos testattava laite on niin suuri tai painava, ettei se ole mahdollista. (IEC 61000-4-3:en 2010, 7 - 9)

Reverberation chamber, eli kaiuntahuone sisältää mahdollisimman vähän sähkömagneettista säteilyä absorboivaa materiaalia, jotta päästään suuriin kentän voimakkuuksiin. Kaiuntahuoneessa käytetään kentän sekoittimia, jotka voivat olla muokattavissa, erilaisten ääriarvojen saavuttamiseksi. Mikroaaltouuni on hyvä esimerkki kaiuntahuoneesta. (Besnier & Demoulin 2011, 135 - 140.)

## 2.7 Häiriösuojauksen käyttötarkoituksia

EU:n alueella tuli voimaan EMC- direktiivi 1.1.1992. Direktiivin mukaan sen alaisia tuotteita ei saa markkinoida tai käyttää EU:n alueella, jos ne eivät täytä vaatimuksia. Vaatimusten täyttämisen vakuuttamiseksi tuotteen valmistajan tai maahantuojan on kiinnitettävä CE-merkki tuotteeseen. Direktiivin tekniset yksityiskohdat on selitetty standardeissa, joita EU:ssa valmistelelee CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization) ja ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Suurin osa on vastaavia IEC:n (International Electrotechnical commission) kahden pysyvän komitean, TC77 (Technical committee) ja CISPR (International Special Committee on Radio Interference) standardien kanssa. (Sepponen, 12.1.)



Standardi EN 50140 määrittelee säteilevän häiriön immunitetestin, jossa testattava laite altistetaan sähkömagneettiselle säteilylle taajuuksilla 80 MHz – 1 GHz. Testaus on suoritettava häiriösuojatussa huoneessa, sillä käytettävät kentänvoimakkuudet ovat niin suuria, että ilman suojaa se rikkoisi radiolakia. Standardi EN 55022 määrittelee johtumalla kytkettyjen häiriöiden emissio- ja immunitetestit. Myös se suosittelee testit tehtäväksi mahdollisimman häiriöttömässä ympäristössä, esim. häiriösuojahuoneessa. (Sepponen, 12.12 - 12.17.)

Sähköjohtoihin liittyvät standardit määrittelevät myös johtojen testauksia. Suurimmilla johdoilla voivat testausolosuhteet olla ympäristölle niin haitallisia, että häiriösuojahuonetta vaaditaan pitämään säteily huoneen sisäpuolella. Toisaalta laitteistoja voidaan haluta suojata myös EMP- iskuilta (Electromagnetic Pulse), joka on lyhytkestoinen, mutta erittäin tehokas sähkömagneettinen pulssi. EMP pitää sisällään niin paljon energiaa, että se rikkoo elektroniikkalaitteita ylikuormittamalla virtapiirit.

## 3 SÄHKÖSUODATTIMET

### 3.1 Suodattimien historiaa

Varhaisimmat suodattimet on kehitetty jo 1900-luvun alussa, pääasiassa puhelimen kehityksen yhteydessä. Menetelmät olivat heuristisia ja kokeisiin perustuvia. Vaikka varhaiset suodattimet eivät olleet parhaita mahdollisia, on myöhempien, optimoitujen suodattimien kehitys ollut melko vaatimatonta. Tämän päivän passiivisten suodattimien teoreettinen tuntemus perustuu suurimmalta osin 1930- ja 1940-luvun saavutuksiin. Aktiivinen suodatin keksittiin 1940-luvun lopulla, kun matalien taajuuksien ominaisuuksia haluttiin saada toteutettua halvemmalla ja pienemmillä komponenteilla. (Su 2002, 1 - 2.)

### 3.2 Sähkösuodattimien tarkoitus häiriösuojauksessa

Sähkösuodattimen tarkoitus on estää sähkönsyötössä kulkevia häiriöitä pääsemästä linjalla eteenpäin, vaikuttamalla signaalin amplitudiin tai vaiheeseen eri taajuuksilla eri tavoin. Käytännössä kaikki galvaanisesti johtavat syöttö- ja tulolinjat suojahuoneeseen sisälle tai huoneesta ulos pitää suodattaa, koska johtimiin siirtyy induoitumalla säteileviä häiriösignaaleja tai verkossa muodostuvia johtuvia häiriösignaaleja. Suodattimia käytetään sähkönsyötössä esim. valaistus, pienjännitesyötössä esim. paloilmaisimet ja telelinjoissa esim. puhelin. Valokuidulla siirrettävää dataa ei tarvitse suodattaa, koska valokuitu rakennetaan eristeellä, joka ei muodosta antennia huoneeseen, kuten johde. Valokuidun läpivientiaukko, pitää vain mitoittaa halutun suojaustason mukaan.

Pelkkä siirtolinjan suodatus yksissään ei tosin riitä. Suodatin pitää rakentaa osaksi häiriösuojahuonetta siten, että suodattimessa on erikseen häiriösuojattu kotelo suodatetulla puolella, joka voidaan kiinnittää yhtenäiseksi osaksi suojahuoneen seinää. Myös suodatinosio pitää rakentaa häiriösuojattuun koteloon, ettei suodatuksen jälkeen siirtolinjaan pääse induoitumaan uusia häiriösignaaleja. Tyypillisesti suodatin purkaa häiriösignaalit maahan tai vaimentaa ne kuristamalla virtaa kelan avulla.

### 3.3 Sähkösuodattimien vaatimukset

Sähkösuodatinta suunniteltaessa tulee ottaa huomioon voimassa olevat sähköturvallisuuksmääräykset, kuten suurin sallittu vuotovirta maihin ja komponenttien kestävyys ja turvallisuuskertoimet sallituille virroille ja jännitteille. Lisäksi pitää huomioida vaimennustaso häiriösuojakäytössä ja minkä tyyppisille häiriöille vaimennus on pääsääntöisesti suunniteltu. Huomioitavaa on myös, mitä taajuuksia suodatetaan ja millä jakojyrkkyydellä eli leikkauksella päästään vaadittuun tasoon. Häiriösuojahuone ei täytä siltä vaadittuja vaimennusarvoja ilman, että suodattimetkin vaimentavat syöttölinjoissa kulkevia häiriöitä vähintään luvatus vaimennuksen verran.

ETS-Lindgren Oy valmistaa sähkösuodattimia häiriösuojakäyttöön ja suodattimia testataan käyttäen esimerkiksi MIL-STD-220, MIL-F-15733, UL-1283 ja BS 613 standardeja. Vaimennusta sähkösuodattimille luvataan yli 100 dB 10/14 kHz - 10 GHz ja yli. Suodattimia valmistetaan ISO 9000-2008 sertifioidussa tuotantolaitoksessa Yhdysvalloissa. (ETS-Lindgrenin www-sivut 2016)

#### 3.3.1 MIL-STD-220C

C versio, eli kolmas versio MIL-STD-220 standardista astui voimaan 14.5.2009. Kyseinen standardi määrittelee tavan testata passiivisia, sähkömagneettisten ja radiotaajuisten häiriöiden yksi- ja monivaiheisia alipäästösuotimia 50 ohmin järjestelmässä 10 GHz:iin asti. Testissä käytetään mittalaitetta, jonka tulo- ja lähtöpuoli on vaimennettu 50 ohmiin. Testattava laite kytketään mittalaitteeseen kaksoissuojatuilla koaksiaalijohdoilla 50 ohmin vaimentimien läpi, mikäli mittalaitteessa ei vaimennusta ole. Liittiminä tulee käyttää N- tyyppistä, SMA- tyyppistä tai vastaavaa 50 ohmin RF-liitintä. Huomiota tulee kiinnittää erityisesti maadoitukseen ja oikeaan kaapelointiin, koska heikolla maadoituksella mitattava laite ei toimi oikein. Testilaitte ja testattava laite pitää olla suojattu ulkoisilta häiriöiltä sekä johtuvilta että säteileviltä. Tämä testataan vielä erikseen asettamalla signaalin tulo ja lähtö oikosulkuun määrätyn kokoisien kuparilevyn avulla. Lopullisen vaimennuksen tulee olla täten yli 80 dB suurempi, kuin vertailuvaimennuksen. (MIL-STD-220C 2009)

### 3.3.2 MIL-STD-461F

F versio, eli kuudes versio MIL-STD-461 standardista astui voimaan 10.10.2007. Standardi on laadittu raja-arvojen laatimiseksi sähkölaitteistojen sähkömagneettisen yhteensopivuuden varmistamiseksi. Kyseinen standardi määrittelee testausmenetelmät sekä raja-arvot mm. johtuville häiriöpäästöille, johtuville sähkömagneettisille häiriintyvyyksille, säteileville häiriöpäästöille ja säteileville sähkömagneettisille häiriintyvyyksille eri sovelluksille ja taajuuksille. Standardissa määriteltyjä testausmenetelmiä voidaan soveltaa suodattimien testauksessa tekemällä vastaavat testit ja lukemalla tuloksista testattavan suodattimen suoritusarvot. Standardi ei itsessään määrittele suodattimia tai niiden vähimmäisvaatimuksia. Standardissa määritellään testauspaikka ja testausmenetelmät erittäin tarkasti ja näin saadaan luotettavasti toistettava yhtenäinen testausmenetelmä. (MIL-STD-461F 2007)

### 3.3.3 Muita standardeja

Sähkömagneettisten häiriöiden suodattimia käsitellään lisäksi mm. standardeissa IEC 60939-1:2010, UL 1283 ja MIL-F-15733.

## 3.4 Sähkösuodattimien tyypit

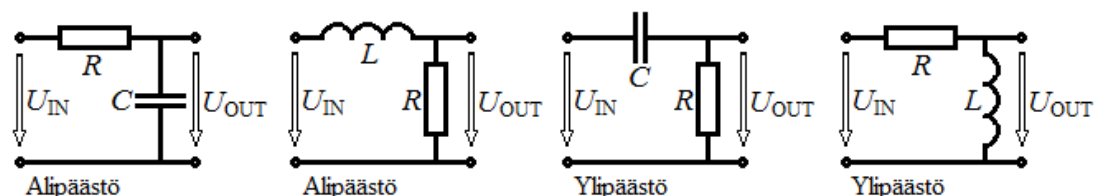
Tässä työssä käsitellään ainoastaan analogisia passiivisia suodattimia. Analogisten suodattimien vaikutus perustuu kondensaattorien ja kelojen impedanssien taajuuksiin riippuvuuteen. Suodattimet voidaan jaotella käyttötarkoituksen ja rakenteen mukaan alipäästö-, ylipäästö-, kaistanpäästö- ja kaistanestosuodattimiin. (Silvonen 2003, 405 - 409.)

Suodattimia voidaan jakaa myös häiriömuotosuodatuksen mukaan yhteis- tai ero- muotoisiksi. Lisäksi suodattimista voidaan puhua niiden komponenttien sijoittelun mukaan. Näin suodattimia voidaan kutsua  $\pi$ -, T- tai L- mallisiksi, jotka voivat olla monikertoja ja/tai tasapainotettuja. Komponenttien sijoittelulla saadaan saman tyyppin suodattimille erilaisia ominaisuuksia ja erityyppisiä vaimennuksia.

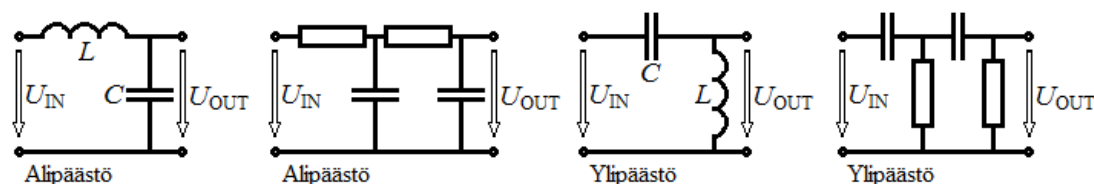
Sähkösuodatin ei itsessään suojaa jännitetransienteilta tai ylijännitteiltä. Suodattimia on kuitenkin mahdollista ostaa ylijännitesuojalla esimerkiksi ETS-Lindgreniltä. Tehokkaat ylijännitesuojat on asennettava ennen suodatinta, jotta saadaan suojattua suodattimien komponentteja ylijännitteiltä. (Sepponen 2012, 9.20.)

### 3.4.1 Suodatustapa

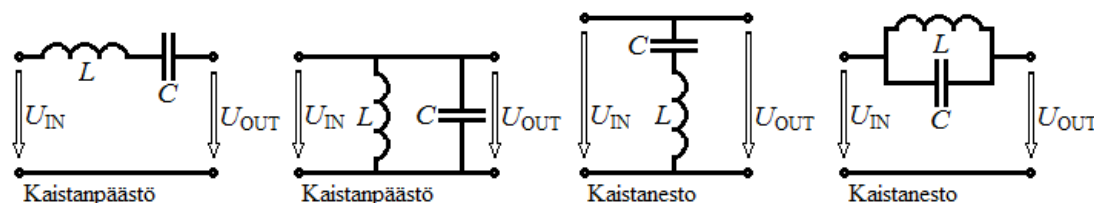
Alipäästösuodatin päästää läpi kaikki rajataajuuttaan pienemmät taajuudet. Rajataajuuden kohdalla on vähäisesti vaimennusta ja suuremmilla taajuuksilla vaimennusta on enemmän. Ylipäästösuodatin toimii päinvastoin kuin alipäästösuodatin, eli se päästää läpi kaikki rajataajuuttaan suuremmat taajuudet. Kaistanpäästösuodatin päästää läpi arvonsa mukaisen taajuusvälin vaimentaen taajuusvälin yli ja alle olevat taajuudet. Kaistanestosuodatin puolestaan suodattaa taajuusvälin pois ja päästää läpi sen yli ja alle olevat taajuudet. Asteluvulla ilmaistaan yleensä kelojen ja kondensaattorien yhteenlaskettu määrä ja jakojyrkkyyden aste. Korkeampi asteluku tarkoittaa jyrkempää luiskaa päästö- ja estokaistan välillä. Alla on esitetty ensimmäisen- ja toisen asteen suodattimien kytkentäkaaviot (kuvat 2, 3 ja 4). (Silvonen 2003, 405 - 409.)



Kuva 2. Ensimmäisen asteen suodattimien perus toteutuksia (Vinho 2016)



Kuva 3. Toisen asteen suodattimia RC- ja LC- toteutuksina (Vinho 2016)

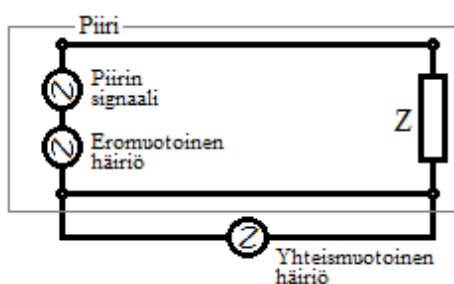


Kuva 4. Toisen asteen kaistanpäästö ja kaistanesto suodattimia (Vinho 2016)

### 3.4.2 Häiriömuodot

Yleisesti käytettävää signaalia kutsutaan normaaliksi signaaliksi (normal-mode signal). Muita nimiä tälle ovat differentiaalinen signaali (differential mode signal), eromuotoinen signaali (difference signal) ja poikittainen signaali (transverse signal). Tähän normaaliin signaaliin on usein liittynyt myös haitallisia yhteismuotoisia signaaleja (common-mode signal), jotka tunnetaan myös pitkittäisinä signaaleina (longitudinal signal). Yhteismuotoinen signaali syntyy, kun piirin kahden maatasen potentiaalit ovat erisuuret ja näiden välille syntyy yhteismuotoinen jännite (common-mode voltage). Yhteismuotoinen jännite siirtyy esim. indusoitumalla signaalijohdon kaikkiin johtimiin yhtä suureksi. (Morrison 1998, 73 - 74.)

Häiriösignaaleja kutsutaan myös ero- tai yhteismuotoisiksi, niiden kytkeytymistavan perusteella. Näiden häiriöiden tunnistaminen on erittäin tärkeää, jotta niiden kytkeytymistä voidaan estää. Pääsääntöisesti eromuotoisen häiriön vaimennus ratkaisut eivät vaikuta yhteismuotoisiin häiriöihin ja päinvastoin, huonosti toteutettu yhteismuotoisen häiriön vaimennus voi jopa muuttaa häiriön eromuotoiseksi häiriöksi. Määriteltäessä eromuotoista häiriötä havaitaan sen kytkettyvän piiriin samoin kuin signaali. Yhteismuotoista häiriötä määriteltäessä taas havaitaan sen käyttävän vähintään yhtä muuta kytkeytymistietä kuin signaali (kuva 5). (Sepponen 2012, 2.23 - 2.24.)

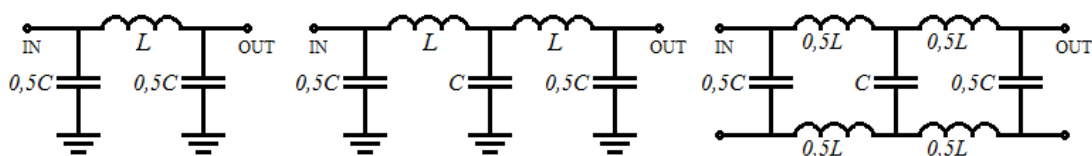


Kuva 5. Häiriömuotojen kytkeytyminen piiriin (Vinho 2016)

Eromuotoinen häiriö siis etenee yhtä linjaa pitkin ja palaa toista linjaa pitkin, se on siis kahden johtimen välille muodostunut potentiaaliero. Yhteismuotoinen häiriö taas etenee jokaista linjaa pitkin yhtä suurena ja paluureittinä tälle on maa. Eromuotoisia häiriöitä syntyy, kun induktiivisia laitteistoja kytetään verkkoon, mutta enimmäkseen siitä irti kytkettäessä. Yhteismuotoista häiriötä syntyy mm. tasasuuntaajissa joissa varauskondensaattori on kytketty diodien ulostulon ja maan välille. (Ozenbaugh 2000, 15 - 23.)

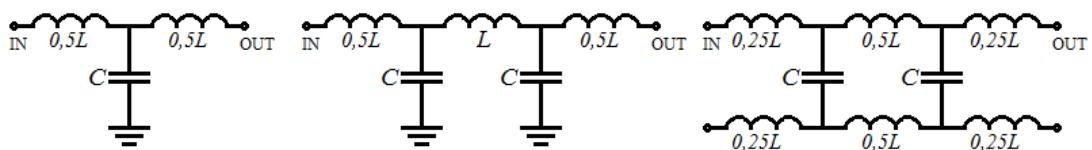
### 3.4.3 $\pi$ -, T- ja L- malliset suodattimet

Pii-mallinen suodatin (kuva 6) toimii hyvin MIL-220 standardin 50 ohmin testissä, mutta ei oikein MIL-461 standardin testeissä. Pii- mallinen suodatin antaa vaimenusta 18 dB per oktaavi ja kaksinkertainen pii 30 dB per oktaavi. Kela sijoitetaan piisuodattimella syöttölinjalle ja sen molemmille puolille tulee kondensaattori linjasta maahan, arvoltaan puolet lasketusta kokonaisarvosta per kondensaattori. Kaksinkertaisen piin kelat ovat molemmat lasketun arvoiset ja niiden väliin tulee lasketun arvoinen kondensaattori linjasta maahan. Lisäksi päihin tulee puolet lasketun arvoisesta kondensaattorista linjasta maahan. Pii- suodattimen voi tasapainottaa puolittamalla kelojen arvot ja lisäämällä vastaavat puolitetut kelat nolla johtimeen. (Ozenbaugh 2000, 67 - 71.)



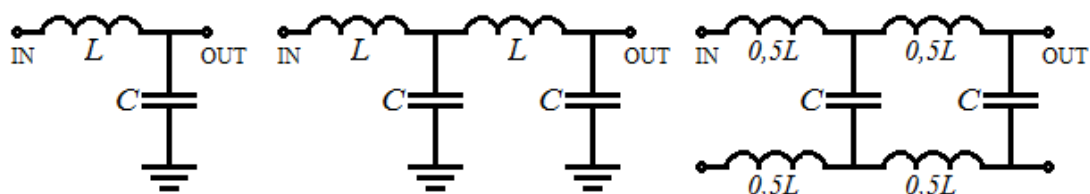
Kuva 6. Pii-, kaksinkertainen pii- ja tasapainotettu kaksinkertainen pii- suodatin (Vinho 2016)

T-mallinen suodatin (kuva 7) vaimentaa 18 dB per oktaavi ja kaksinkertainen T-suodatin vaimentaa 30 dB per oktaavi. T- mallin suodatin toimii parhaiten matala impedanssisissa linjoissa ja suurilla virroilla. Kelat sijoitetaan T-suodattimessa syöttölinjalle, arvoltaan puolet lasketusta kokonaisarvosta per kela ja väliin tulee kondensaattori linjasta maahan. Kaksinkertaisen T:n kela on keskellä lasketun arvoinen ja päihin tulee puolet lasketun arvon kokoiset kelat. Keskimmäisen kelan molemmille puolille tulee lasketun arvoinen kondensaattori linjasta maahan. T- suodattimen voi tasapainottaa puolittamalla kelojen arvot ja lisäämällä vastaavat puolitetut kelat nolla johtimeen. (Ozenbaugh 2000, 71 - 73.)



Kuva 7. T-, kaksinkertainen T- ja tasapainotettu kaksinkertainen T- suodatin (Vinho 2016)

L- mallinen suodatin (kuva 8) on yleisimmin käytössä oleva suodatin ja se vaimentaa 12 dB per oktaavi, kun kaksinkertainen L- suodatin vaimentaa 24 dB per oktaavi. L- suodattimessa kela tulee syöttöpuolelle lasketun arvoisena ja kondensaattori kelan jälkeen linjasta maahan lasketun arvoisena. Kaksinkertainen L saadaan lisäämällä ensimmäisen komponenttiparin perään toinen, samankokoinen komponenttipari. L- suodattimen voi myös tasapainottaa puolittamalla kelojen arvot ja lisäämällä vastavat puolitetut kelat nolla johtimeen. (Ozenbaugh 2000, 73 - 74.)



Kuva 8. L-, kaksinkertainen L- ja tasapainotettu kaksinkertainen L- suodatin (Vinho 2016)

### 3.5 Sähkösuodattimen rakenne

Sähkösuodattimesta ulospäin näkyy ainoastaan sen kotelo, jossa voi olla avattavat ja johtavasti tiivistetyt kannet johtojen kytkentäkoteloihin, tulo- ja lähtöpuolelle. Suojahuoneen ulkopuolisesta tulopuolesta käytetään myös termiä likainen puoli ja lähtöpuolesta taas termiä puhdas puoli, perustuen siihen, onko signaali suodatettua vai ei. Syöttöjohto likaiselle puolelle voidaan tuoda tavallisen, yleensä maadoitetun, vedonpoistonipan läpi. Lähtevä johto suojahuoneeseen tuodaan yleensä läpivientiputken läpi, joka on liitetty tiiviiksi häiriösuojahuoneen rakenteeseen, esimerkiksi muttereilla kiristettävä ulkokierteinen putki.

#### 3.5.1 Sähkösuodattimen rakenne, kotelo

Maadoitus esittää suodattimen kotelossa erästä tärkeää osaa, sähkömagneettisesti tiiviin rakenteen rinnalla. Riittämätön maadoitus estää kondensaattoreita ja muita maihin kytkettyjä komponentteja toimimasta kunnolla, kuten ylijännitesuojia. Maajohdollakin on merkitystä. Erityisesti, jos kotelon suora maadoitus ei ole paras mahdol-



linen, tulee maajohdon olla ehdottomasti monisäikeistä. Yksisäikeinen maajohto kuljettaessaan häiriösignaaleja säteilee erittäin hyvin magneettikenttiä mahdollisesti viereisiin johtoihin, kun taas monisäikeinen johdin pystyy kuljettamaan korkeita taajuuksia säteilemättä juurikaan. Kotelossa huomiota tulee myös kiinnittää tulopuolen ja lähtöpuolen väliseen riittävään etäisyyteen, etenkin jos suodattimen lähtöä ei ole liitetty häiriösuojan sisään. Tällöin on mahdollista, että suodattamaton häiriö säteilee suodatettuun signaaliin. Suodatinta kiinnitettäessä koteloon tai huoneeseen tulee käyttää liitospinnan molemmiin puoliin häiriösuojatiivistettä varmistuakseen riittävästä maadoituksesta. Tiivistettä käyttämällä saadaan kasvatettua maadoituksen teoreettista poikkipinta-alaa ja pienennettyä siten maadoituksen resistanssia. Ilman tiivistettyä maadoittava pinta-ala voi jäädä pieneksi ja maadoituksen resistanssi kasvaa liian suureksi. (Ozenbaugh 2000, 150 - 154.)

### 3.5.2 Sähkösuodattimen komponentit, kondensaattori

Kondensaattori on yleensä rakennettu asettamalla kaksi elektrodia eristettynä vastakkain toisiaan kohti. Elektrodit voivat olla levynä kierretty rullaksi, jotta rakenne saadaan pieneen tilaan. Elektrodit varautuvat sähkövirran vaikutuksesta samanaikaisesti, mutta erimerkkisesti. Täyteen varautunut kondensaattori on tasavirralla ehdoton este, samasta syystä se myös vastustaa vaihtovirralla tietyllä tavalla ja sen vaihtovirtavastusta kutsutaan kapasitiiviseksi reaktanssiksi. Vaihtovirtatekniikassa teoreettisesti puhtaan kondensaattorin jännite on  $90^\circ$  virtaa jäljessä. (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2007, 281 - 284.)

Kondensaattorille määritellään amerikkalaisessa MIL- standardissa 15573 rakenteellisia vaatimuksia ja arvoja esim. jännitteenkestolle. Vaihtosähkökondensaattorin tulee kestää 4,2 kertaa RMS- jännite ja tasasähkökondensaattorin tulee kestää 2,5 kertaa RMS- jännite. Kondensaattorissa kahteen vastakkaiseen elektrodilevyyn varastoituu yhtä suuri, mutta vastakkainen varaus ja elektrodien väli eristetään johtamattomalla aineella. Kondensaattorille vahingollisia ovat läpilyönti, joka voi sattua liian suuresta jännitteestä johtuen eristeen pettäessä ja korona, jota voi syntyä helpoiten terävistä reunoista ja se on myös seurausta suuresta jännitteestä. Komponenttina kondensaattori ei ole todellisuudessa pelkkää kapasitanssia, vaan pitää sisällään ra-

kenteellisistä syistä johtuen myös resistanssia ja induktanssia. Induktanssin vuoksi sopivalla taajuudella kondensaattori asettuu sarjaresonanssiin ja näkyy verkossa tällä taajuudella tarkasteltuna puhtaana resistanssina. Kondensaattorin valmistajat usein ilmoittavatkin kondensaattorille sarjaresonanssitaajuuden (SRF). (Ozenbaugh 2000, 85 - 87.)

### 3.5.3 Sähkösuodattimen komponentit, kela

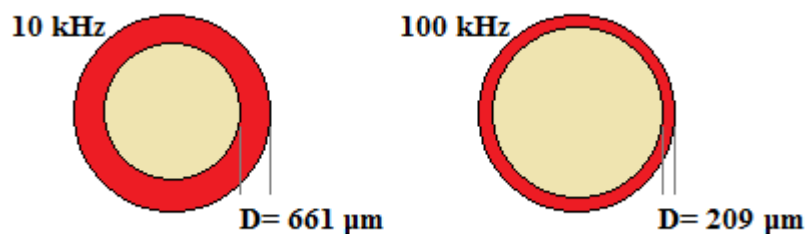
Kela muodostuu kierretystä johtimesta ja sen sisällä olevasta sydäimestä. Tavallisesti kelan käämi eli johdin on valmistettu kuparilangasta ja sydämenä voi olla lähes mitä vain, esim. ilmaa, rautaa tai ferromagneettista ainetta. Vaihtovirtatekniikassa, siis myös alipäästösuodattimissa kela vastustaa virran muutoksia induktiivisesta reaktanssista johtuen. Vaihtovirtatekniikassa teoreettisesti puhtaan kelan jännite on  $90^\circ$  virtaa edellä. (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2007, 277 - 280.)

Sähkösuodattimessa käytettävien kelojen sydämen pitää olla hitaasti saturoituva, eli niin sanotusti pehmeäsydämellinen. Kovasta ja nopeasti saturoituvasta sydäimestä saa pehmeän ja hitaammin saturoituvan sydämen pienentämällä sen osiin ja tekemällä siihen eristelevyjä väleihin. Kelojen sydämet ovatkin erittäin merkityksellisiä sähkösuodattimissa ja niitä muokkaamalla saa kelalle erityyppisiä ominaisuuksia. Yleisimmin käytetyt kelat suodattimissa ovat liuskoista kelattu toroidi-sydäminen, C-sydäminen ja hylsyn mallinen kela. Kelojen sydämet on tyypillisesti valmistettu ferriitistä, jauhetusta raudasta, molybdeenimetalliseos jauheesta (MPP), suurvuo materiaalista (HF) tai vaihtelevasta metalliliuska vahvuudesta ja materiaalista.

Kelan käämien vahvuuteen vaikuttaa virran suuruus ja kelan lämpenemiseen vaikuttaa myös sydämen materiaali ja jännitteen perustaajuus. Kelalle on ominaista myös, että sillä on sarjaresonanssitaajuus (SRF). Kapasitanssia syntyy kelalla käämistä käämiin niiden ollessa päällekkäin tai käämistä sydämeen. Kelan sarjaresonanssitaajuutta voidaan esim. toroidilla helposti kasvattaa muuttamalla käämien kelaamisjärjestystä ja jättämällä aloitus ja lopetus kohtaan yli  $20^\circ$  tyhjä kohta tai lisäämällä etäisyyttä käämin ja sydämen välille. (Ozenbaugh 2000, 103 - 110.)

### 3.6 Virran ahtautuminen johdon pinnalle

Korkeilla taajuuksilla tapahtuva virran ahtautuminen johdon pinnalle, eli pinta-ilmiö (skin effect), aiheuttaa johdon johtavan poikkipinta-alan pienentymisen. Perustaajui-nen sähkökenttä luo muuttuvan magneettikentän, joka luo muuttuvan sähkökentän, joka on vastakkainen perustaajuiselle sähkökentälle. Tämä uusi muuttuva vastakkai-nen sähkökenttä aiheuttaa johtavien elektronien siirtymisen johtimen ulkoreunoihin. Kuparille pinta-ilmiön johtava halkaisija voidaan laskea kaavalla  $D = \text{syvyys (cm)} = 6,61/\sqrt{F}$  (kuva 9). Johdon suurempi impedanssi, eli reaktanssin ja resistanssin kom-pleksisumma aiheuttaa enemmän häviöitä korkeilla taajuuksilla. Näitä häviöitä voi-daan käyttää hyväksi suodatinta suunnitellessa, mutta pitää ottaa myös huomioon esimerkiksi kondensaattorien suorituskyky purkaa häiriöitä maahan saattaa pahim-massa tapauksessa rajoittua johdon häviöiden vuoksi. (Ozenbaugh 2000, 26 - 29.)



Kuva 9. Virran ahtautuminen johdon pinnalle (Vinho 2016)

## 4 SÄHKÖSUODATTIMIEN TESTAUS

### 4.1 Testausmetodien valinta

Suodattimille tehtäviksi testeiksi sovittiin tilaajan kanssa sähkön laadun mittaus verkkoanalysaattorilla siitä syystä, että sähkön laatua ei ole tarkasteltu suodattimen jälkeen. Näin voidaan varmistaa, täyttääkö sähkön laatu edelleen määräykset käytettävien suodattimien jälkeen. Sähkön laatu on Suomessa määritelty virheelliseksi sähkömarkkinalain 97 § mukaan, jos se ei täytä standardia SFS-EN 50160 (Sähkötoimituksen laatu- ja toimitustapavirheen sovellusohje 2014, 12.)

Toiseksi testiksi sovittiin maadoituksen resistanssin mittaus milliohmimittarilla. Suodattimen kunnollinen maadoittaminen suojahuoneen runkoon on tärkeää suodattimen toiminnan kannalta. Koska suodatin purkaa häiriösignaaleja maahan ja nämä häiriösignaalit kulkevat pienimmän resistanssin omaavaa reittiä pitkin, ei tämä reitti saa mennä huoneen sisäpuolelle. Sähkösyötön suojamaan kulkiessa suodattimen läpi suojahuoneen sisälle saattavat tähän linjaan siirtyä suodattimen maata vasten kytkettyjen komponenttien poistamat häiriösignaalit. Yksinapaisessa maajohtossa on induktanssia noin  $1,5 \mu\text{H/m}$  ja resistanssia poikkipinta-alasta riippuva määrä. Yhdessä johtimen resistanssi sekä induktanssi muodostavat RL- piirin sarjassa, joka toimii ylipäästösuolettimena. Nyt maajohtimeen siirtynyt RF- signaali säteilee ympäristöön. (Ozenbaugh 2000, 147 - 153.)

### 4.2 Suunnitelma sähkön laadun mittaukselle

Tarkoituksena on tutkia sähkön laatua ja erilaisiin sovelluksiin tarkoitettujen suodattimien vaikutuksia sähkön laatuun. Kokeen on tarkoitus todistaa suodattimien toimivuus osana sähköverkkoa, sähkön laatuun merkittävästi vaikuttamatta. Mittaustulosten perusteella on mahdollista kuitenkin tarvittaessa miettiä kompensointia, mikäli sähkön laatu merkittävästi huononee.

#### 4.2.1 Mittalaitteet sähkön laadun tarkasteluun

Mittarina sähkön laadun mittauksessa käytetään Fluke 434 sähkönlaatu analysaattoria joka lainataan Satakunnan ammattikorkeakoululta. 1- vaihekytkentäkoteloa käytetään mittauksissa apuna mittalaitteen turvalliseen kytkentään. Kytkentäkotelosta otetaan virran- ja jännitteenmittaus mittajohtoja apuna käyttäen. Mittapäinä käytetään rengaspihtejä ja kytkentäjohtoja suojatuilla banaani liittimillä. Analysaattori otetaan käyttöön ja tehdään tarvittavat asetukset sekä tarkistukset jäljempänä olevien ohjeiden mukaan.

#### 4.2.2 Fluke 434 -analysaattori

Fluke 434 -analysaattorilla pystyy mittaamaan vaihejännitteitä ja siniaallon puhtautta, vaihevirtoja, huippuarvoja, harmonisia yliaaltoja, välkyntää, jännitteen notkahduksia ja -piikkejä, taajuutta, tasapainottomuutta, signaaleja jännitteessä, sekä tiedonkeruun tallentamista. Analysaattorilla pystyy mittaamaan yksivaiheista järjestelmää, sekä eri variaatioita useampivaiheisista kytkennöistä. Kytkennät on ohjelmoitu mittarin valikkoon, josta ne tapauskohtaisesti käydään asettamassa. Analysaattoria käytetään ladattavalla nikkelimetalliseos (NiMH) akulla. Analysaattoriin on ohjelmoituna valmiiksi SFS-EN 50160 standardin mukaiset raja-arvot, joten mittarin käyttö ja standardissa määriteltyjen arvojen oikeellisuus on helposti todennettavissa.

### 4.2.3 Fluke 434 -analysoitsijan käyttöönnotto ja mittaukset

Fluke 434 -analysoitsija kytketään laturiin, koska energiamittauksen yksi keskiarvotusjaksoista on 2 tuntia. Näin taataan, että energiamittari pysyy käynnissä ja suorittaa mittauksen loppuun. Mittari käynnistetään virtapainiketta painamalla ja aloitusnäyttö kertoo asetetun kytkentäkokoontilan. Painetaan OK painikkeesta F5 ja laite menee Menu -valikkoon. Tarvittaessa kytkentäkokoontilaa ja muita asetuksia pystyy vaihtamaan Setup -painiketta painamalla. Setup -valikosta asetetaan myös käytettävän virtapihdin asetukset. Yksivaiheista kytkentää mitattaessa kytketään vaihejohtin liittimeen L1, nollajohtin liittimeen N, suojamaajohtin vihreään liittimeen ja virtapihdit niille tarkoitettuihin liittimiin numerot 1 ja N. Virtapihti asetetaan vaihe sekä nolla johtimen ympärille siten, että nuoli osoittaa virran kulkusuuntaan. Vaihejohtimessa nuoli tulee kuormaa kohti ja nollajohtimessa nuoli tulee verkkoa kohti (Kuva 10).

Monitor -painiketta painamalla laite avaa sähkönlaadun tarkkailuvalikon. Valikosta säädetään tarkkailujakson pituus ja mahdollinen viivästetty aloitusaika. Tässä työssä tarkkailujakson pituus on 2 tuntia, koska kuormitus tulee pysymään samana läpi testin. Sähkönlaadun seuranta aloitetaan Start -painikkeella painamalla F5. Sähkönlaadunmittauksen päänäytöllä näkyy  $V_{rms}$ , harmoniset, välkyntä, kuopat/katkokset/nopeat jännitemuutokset/kohoumat, epäsymmetria ja taajuus pylväs-näyttönä. Pylvään nouseminen kertoo sähkönlaadun poikkeavuudesta. Tarkempaa tietoa eri suureista saa painamalla valikkoja F1 – F5 (Fluke 433/434 Käyttöohje).



Kuva 10. Sähkönlaatumittarin kytkentä (Vinho 2016)

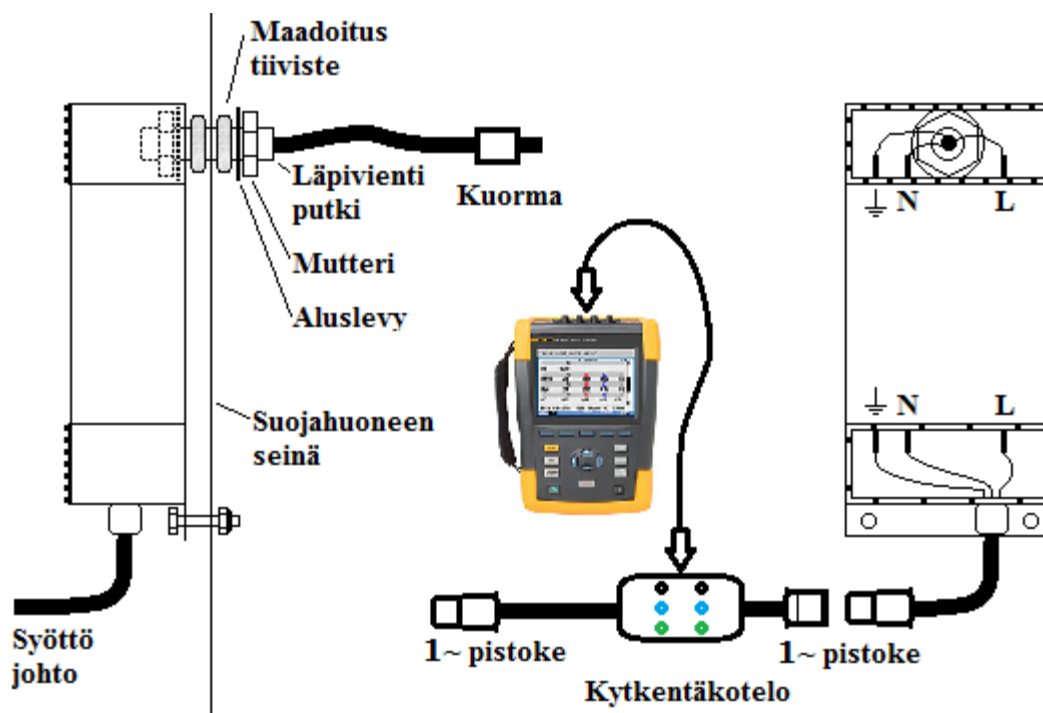
#### 4.2.4 Sähkön laadun tarkastelun testausvaiheet

Testattavien suodattimien mallit ja tärkeimmät ominaisuudet ovat listattu seuraavaan taulukkoon (taulukko 1). Testattavien suodattimien tietolomakkeet ovat liitteenä (liitteet 1-4).

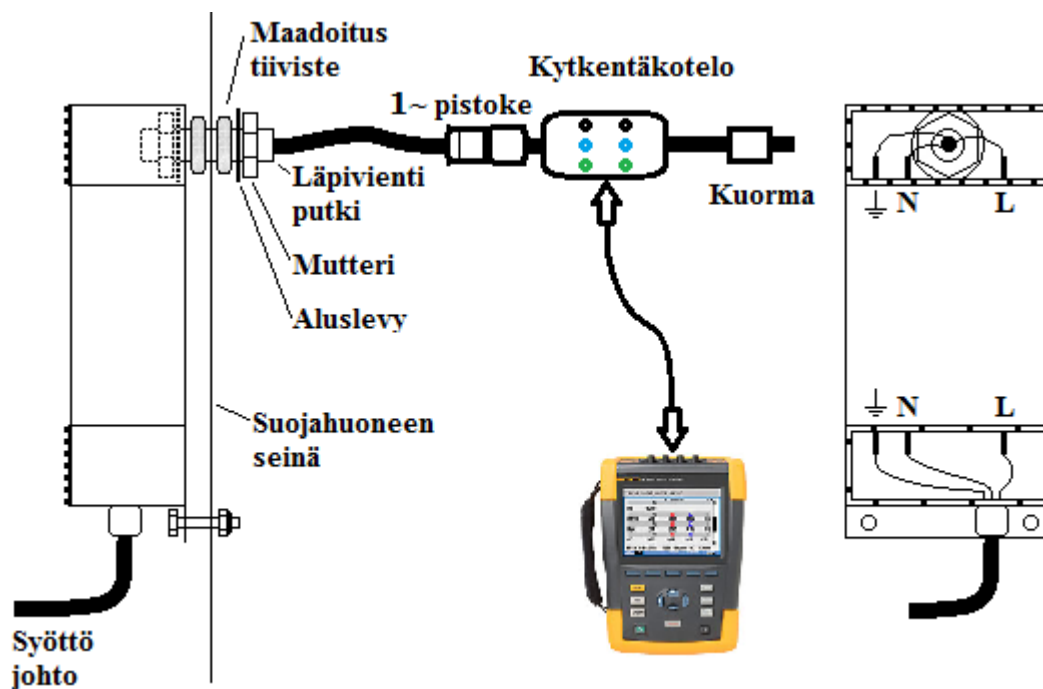
Taulukko 1. Testattavat suodattimet

Malli	Jännite	Kuormitet- tavuus	Taajuus	Käyttötarkoi- tus
N5030	250 V	2 A	50/60/400 Hz	Ohjauslinja
N9002	250 V	16 A	DC – 60Hz	Tehonsyöttö
N1820	250 V	6 A	DC – 60Hz	Tehonsyöttö
E-LMF-4112	250 V	30 A	DC – 60 Hz	Tehonsyöttö

- 1) Asennetaan suodatin suojahuoneeseen, RF- vaimennusta ei tarvitse todentaa.
- 2) Liitetään mittalaiteliitinkotelo ennen suodatinta (kaavio 1).
- 3) Kytetään Fluke 434 -analysointilaite kytkeäkotelon liittimiin.
- 4) Liitetään kytkeäkotelo verkkoon ja kuormitetaan sitä esimerkiksi valaisimilla.
- 5) Luetaan analysointilaitteen lukemat ja kirjataan tulokset muistiin.
- 6) Irrotetaan kytkeäkotelo ja analysointilaite verkosta.
- 7) Liitetään kytkeäkotelo suodattimen jälkeen (kaavio 2).
- 8) Kytetään analysointilaite kytkeäkotelon liittimiin.
- 9) Liitetään suodatin verkkoon ja kuormitetaan sitä esimerkiksi valaisimilla.
- 10) Luetaan analysointilaitteen lukemat ja kirjataan tulokset muistiin.
- 11) Irrotetaan suodatin ja analysointilaite verkosta.



Kaavio 1. Sähkön laadun mittaus ennen suodatinta (Vinho 2016)



Kaavio 2. Sähkön laadun mittaus suodattimen jälkeen (Vinho 2016)

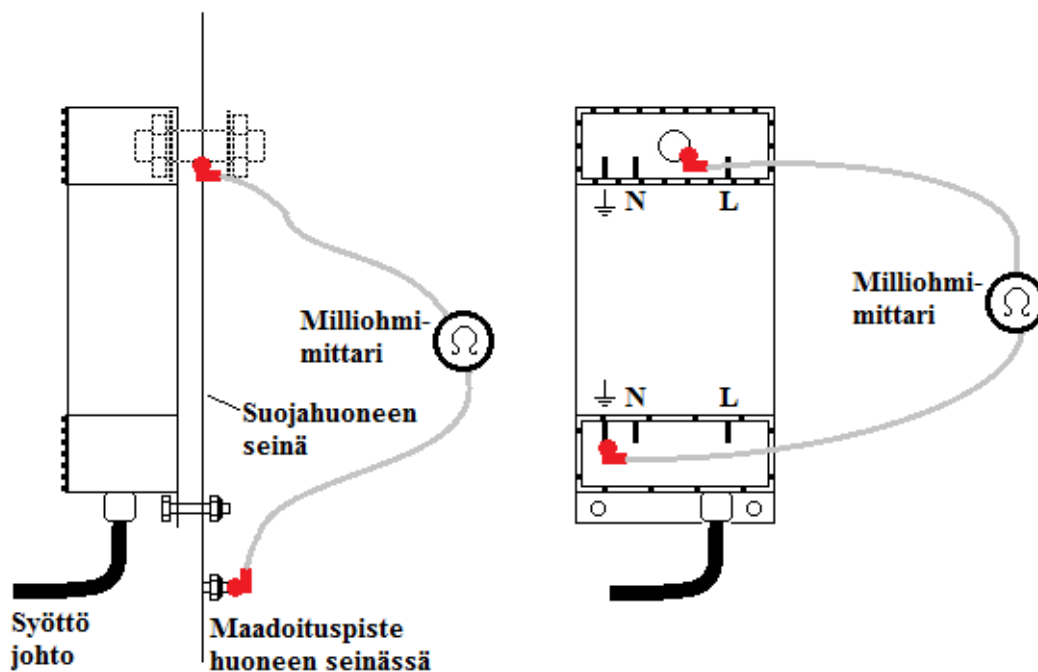


### 4.3 Suunnitelma maadoituksen resistanssin mittaukselle

Tarkoituksena on mitata resistanssi huoneen seinän sekä siihen asennettavan suodattimen syöttöjohdon maapisteen väliltä. Koska  $R = \rho \cdot l / A$ , jossa  $R$  = resistanssi [ $\Omega$ ],  $\rho$  = resistiivisyys [ $\Omega\text{m}$ ],  $l$  = johtimen pituus ja  $A$  = johtimen poikkipinta-ala, huomataan, että johtimen poikkipinta-alan puolittuessa resistanssi kaksinkertaistuu. Nyt sama kontakti, mikä estää RF -taajuisten signaalien kulkeutumisen huoneen sisälle, ei välttämättä kuitenkaan riitä suodattimen maadoitukselle. Kuten aiemmin todettu, purkautuu suodatettuja häiriösignaaleja maahan ja mahdollisesti suojamaajohdinta pitkin huoneen sisälle.

#### 4.3.1 Mittalaitteet maadoituksen vaikutuksien tarkasteluun

Mittarina resistanssin mittauksessa käytetään Meggerin Ducter DLRO-10X milliohmimittaria, joka lainataan Satakunnan ammattikorkeakoululta. Maadoituksen vaikutusta suodattimen suoritustasoon todennetaan signaaligeneraattorin ja spektrianalysaattorin sekä taajuuksiin sopivien antennien kanssa, jotka ovat työn tilaajan omistamat. Milliohmimittari otetaan käyttöön ja tehdään tarvittavat asetukset, sekä tarkistukset jäljempänä olevien ohjeiden mukaan. Suodattimesta mitataan ensin resistanssi vapaana, tulopuolen maapistestä lähtöpuolen läpivientireiän viereen, sekä suojahuoneen seinässä olevasta läpivientireiästä, suojahuoneen maapisteeseen (kaavio 3). Nämä arvot vähennetään maadoituksen kokonaisresistanssista suodattimen ollessa asennettuna, jotta saadaan laskettua suodattimen resistiivinen pinta-ala huoneen seinään.



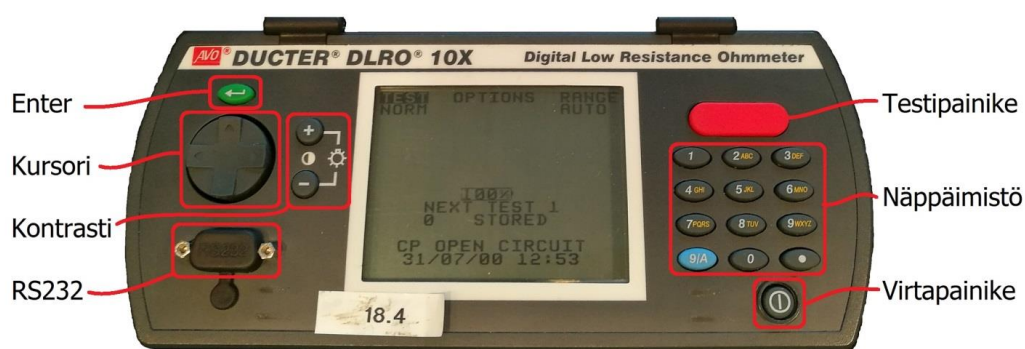
Kaavio 3. Resistanssien mittaaminen liitoskohdan ympäriltä (Vinho 2016)

#### 4.3.2 Megger Ducter milliohmimittari

Ducter DLRO-10 ja Ducter DLRO-10X muodostavat matalaresistanssimittalaiteperheen  $0,1 \mu\Omega$ :sta  $2 \text{ k}\Omega$ :iin. Neljän liittimen mittaustekniikka poistaa mittajohtojen resistanssin tuloksesta ja automaattinen virran kääntö poistaa staattisten varausten vaikutuksen testattavasta kohteesta. Resistanssin mittaus ottaa noin 2,5 sekuntia ja mitauksessa verrataan myötävirran, vastavirran ja niiden keskiarvon tulosta. Mittalaitetta käytetään ladattavalla nikkelimetalliseos (NiMH) akulla, joka riittää täyteen ladattuna tuhanteen 10 A mittaukseen. (Megger Digital Low Resistance Ohmmeter Ducter DLRO -10 & Ducter DLRO -10X User Guide).

### 4.3.3 Megger Ducter DLRO-10X toiminnot

Laitteen etupaneelin keskellä on LCD näyttö, joka kertoo laitteen tilan ja näyttää valikot, sekä mittaustulokset. Virtapainike on oikeassa alakulmassa, jota sekunnin ajan painamalla laite käynnistyy. Vasemmalla ovat nuolipainikkeet, joilla selataan valikoissa. Nuolten yläpuolella on enter -painike, joka aktivoi toiminnon. Näytön vasemmalla puolella olevat kaksi painiketta säätelee näytön taustavalaistusta. Oikealla olevat numeronäppäimet toimivat myös kirjoituspainikkeina tulosten kommentoimisessa. Näppäimistä on hyvä tietää kirjoitettaessa, että 0 on välilyönti, 1 on backspace ja pisteestä useampaan kertaan painamalla saa 20 erilaista erikoismerkkiä. Numeroi- den yläpuolella oleva suuri punainen painike on Testipainike (kuva 11).



Kuva 11. Megger Ducter DLRO 10X Käyttöpaneeli (Vinho 2016)

Näytön vasemmassa yläkulmassa on TEST -valikko, josta valitaan testausmenetelmä. Valittu testausmenetelmä näkyy TEST -sanalla alapuolella. Keskellä näytön yläreunaa on OPTIONS, josta muutetaan laitteen asetuksia. Näytön yläreunassa oikealla näkyy valittu testausalue RANGE. Päävalikonäytöllä ilmaistaan myös akun varaus- taso, seuraavan testin numero, talletettujen testien lukumäärä ja päivämäärä ja kel- lonaika. Mahdolliset varoitukset tulevat myös näkyviin päänäyttöön. Valikoissa lii- kutaan kursorilla vasemmalle tai oikealle, aktiivinen valikko on kehystetty ja sen saa auki painamalla kursoria alas. Kursorilla selataan valikkoa ja painetaan enter halutun valikon kohdalla, jolloin näyttö menee toiminnosta riippuen päävalikkoon tai jatko- valikkoon.

”C” ja ”P” ilmaisimet päänäytöllä kertovat mittauspiirin kunnosta. ”P OPEN CIRCUIT” ilmestyy näyttöön, jos jännitekontaktilla on suuri resistanssi ja ”C OPEN CIRCUIT” ilmestyy näyttöön, jos virtapiiriä ei synny. ”CP OPEN CIRCUIT” ilmes-

tyy näyttöön, jos kumpikaan piiri ei kytkeydy. Tarkista kontaktit, jos mittauksia ei näiden ilmoitusten vuoksi pysty suorittamaan. ”EXT VOLTS” -varoitusta ilmestyy näyttöön mitattavan kohteen ollessa jännitteinen, eikä testausta pysty suorittamaan. Huom. ilmaisee ainoastaan potentiaalieron. ”CURRENT FLOW” -teksti ilmaisee induktiivisen mittauksen olevan edelleen varautunut. Mittauskontakti tulee pitää yhdistettynä, kunnes varaus on purkautunut.

OPTIONS -valikko sisältää RETRIEVE, PASSBANDS, SET CLOCK, DELETE DATA ja STORAGE valikot. RETRIEVE -valikko sisältää vaihtoehdot tallennetun mittausdatan näyttöön tai tulostimeen kirjoittamisen RS232 portin kautta. PASSBANDS -valikossa pystyy asettamaan ylä- ja alaraja-arvot mittauksille ja laite antaa summerilla hälytyksen, mikäli raja-arvo ylittyy. SET CLOCK -valikosta asetetaan laitteen päivä ja kellonaika, jotka tallentuvat mittauksen yhteyteen. DELETE DATA tyhjentää kaikki muistissa olevat mittaustulokset. STORAGE -valikosta valitaan tallennetaanko mittausdata joka mittauksen jälkeen vai ei.

RANGE -valikko mahdollistaa mittausvirran valinnan käsin tai automaattisesti. Valittavana on kuusi mittausvirtaa: 10 A, 1 A, 100 mA, 10mA, 1mA ja 100  $\mu$ A.

TEST -tilat ovat normaali, automaattinen, jatkuva, suuritehoinen ja yhdensuuntainen. Normaalityla tekee yhden mittauksen, myötä- ja vastavirtaan TEST nappia painettaessa. Automaattityla valittuna laite pysyy valmiustilassa ja suorittaa myötä- ja vastavirtamittauksen automaattisesti kontaktien ollessa kytkettynä. Testi toistetaan irrottamalla toinen tai molemmat kontaktit ja kytkemällä ne uudelleen. Jatkuvatila vaatii mittakontaktin kytkemisen ja kontaktin pitämisen TEST nappia painettaessa. Se tekee noin kolmen sekunnin välein myötä- ja vastavirtamittauksen ja lopettaa TEST nappia painettaessa. Suuritehotila ylittää normaalin 250 mW mittaustehon tarvittaessa. Testin pituus on noin minuutti, jotta varauksen ehditään luoda ja purkaa turvallisesti, muuten se on vastaava normaaliin mittaukseen. Yhdensuuntainen tila toimii kuin normaali tila, mutta mittaa vain myötävirran, testien nopeuttamiseksi. (Megger Digital Low Resistance Ohmmeter Ducter DLRO -10 & Ducter DLRO -10X User Guide).

#### 4.3.4 Megger Ducter DLRO-10X automaattinen mittaus ja DH 4 mittakahvat

DH 4 duplex -mittakahvat on merkitty kirjaimella P, joka ilmaisee jänniteliitintä (potential). Jänniteliittimet tulee asettaa mittauksessa lähemmäs toisiaan ja virtaliittimet niiden ulkopuolelle (kuva 12).



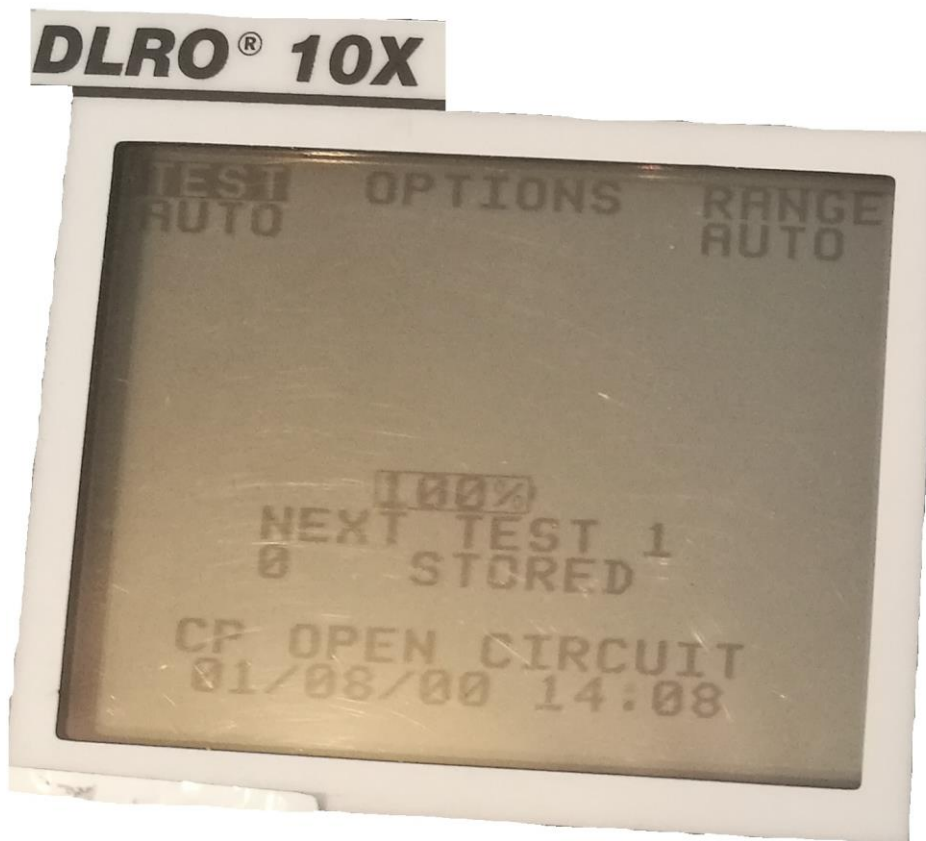
Kuva 12. DH 4 mittauskahvojen asettelu (Vinho 2016)

Toisessa DH 4 mittauskahvassa on kaksi merkkivaloa (kuva 13), L1 ja L2 ja lisäjohdin. Lisäjohdin tulee asettaa 4 mm liittimeen päälliittimien vieressä laitteen oikealla puolella. Merkkivalot antavat opastusta laitteen tilasta, joka muuten on luettavissa ainoastaan laitteen näytöltä. Ainoastaan merkkivalon L1 palaessa punaisena, jännite- tai/virtakontakti on heikko. Ainoastaan merkkivalon L1 vilkkuessa, on mittauspisteiden väli jännitteinen. Ainoastaan merkkivalon L2 palaessa vihreänä, ilmaisee se testin onnistunutta suoritusta.



Kuva 13. Merkkivalo L1 ilmoittaa avoimesta jännite- ja/tai virtakontaktista (Vinho 2016)

Mittauksen tekeminen onnistuu erittäin helposti automaattisesti asetuksen avulla. Kun laite on käynnissä, asetetaan TEST -valikosta AUTO ja RANGE -valikosta myös AUTO (kuva 14).



Kuva 14. Automaattitestausta asetettu mittalaitteeseen (Vinho 2016)

Mittauksen kulku:

- 1) Painetaan TEST -painiketta
- 2) Valo L1 palaa punaisena mittauskahvassa
- 3) Kun kaikki neljä kontaktia on kunnossa, sammuu valo L1
- 4) Mittauskahvan valot eivät pala mittauksen aikana
- 5) Valo L2 palaa vihreänä mittauskahvassa, kun mittaus on onnistuneesti suoritettu
- 6) Irrotettua kontaktit mitattavasta kohteesta, valo L2 sammuu ja valo L1 syttyy
- 7) Laite on valmis seuraavaan mittaukseen

(Megger Digital Low Resistance Ohmmeter Ducter DLRO -10 & Ducter DLRO -10X User Guide).

#### 4.3.5 RF -vaimennusmittaukset

RF -vaimennusmittauksissa käytetään signaaligeneraattoria lähettimenä, spektrianalysointia vastaanottimena, sekä taajuuksiin sopivia antennejä koaksiaalikaapeleilla lähettimeen ja vastaanottimeen kytkettyinä. Vaimennusmittauksia määritellään mm. standardeissa EN50147-1, IEEE-STD-299 ja MIL-STD-285. Standardit määrittelevät vaimennusmittaukset magneettikentälle 9 kHz – 30 MHz, sähkökentälle 10 MHz – 50 MHz, tasoaalloille 50 MHz – 1 GHz ja mikroaalloille > 1GHz. Magneettikentälle käytetään loop -tyyppisiä antennejä, sähkökentälle monopole -tyyppisiä antennejä, tasoaalloille bicon ja dipoli -tyyppisiä antennejä, sekä mikroaalloille horn -tyyppisiä antennejä niiden parhaimman taajuusvasteen vuoksi.

Vaimennusmittauksia suoritettaessa tehdään aina ensin laitteiston vertailuarvomittaus asettamalla lähetys- ja vastaanottoantennit huoneen ulkopuolelle vastakkain ja kytketään ne koaksiaalikaapeleilla spektrianalysointilaiteeseen, sekä signaaligeneraattoriin. Lähettimeen ja vastaanottimeen asetetaan oikeat taajuudet ja asetukset ja asetetaan signaali päälle teholla 10 – 30 dBm. Spektrianalysointilaiteesta luetaan vertailuarvo muistiin, tyypillisesti n. 0 – 10 dBm, lähetystehosta, sekä taajuudesta ja antennista riippuen. Vertailuarvoa käytetään vaimennuksen laskemiseen, vähentämällä se mitatusta tuloksesta, jolloin saadaan huoneen vaimennus desibeleissä. Vaimennusmittaus suoritetaan asettamalla lähetinosat laitteistosta huoneen ulkopuolelle ja vastaanotto-osat laitteistosta huoneen sisäpuolelle samoin kuin vertailuarvomittauksessa. Huoneen ovi suljetaan ja spektrianalysointilaiteesta luetaan mittaustulos, joka on tyypillisesti huoneen ollessa kunnossa yli -100 dBm.

#### 4.3.6 Maadoituksen vaikutuksen testausvaiheet

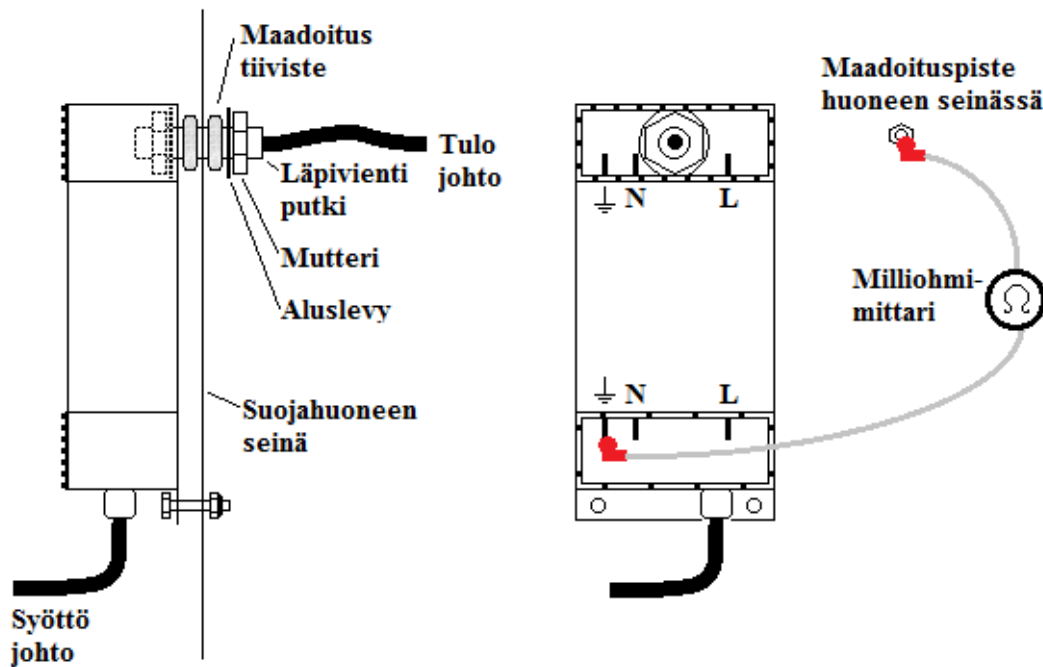
Testattavien suodattimien mallit ja tärkeimmät ominaisuudet ovat listattu seuraavaan taulukkoon (taulukko 2). Testattavien suodattimien tietolomakkeet ovat liitteenä (liitteet 1-5).

Taulukko 2. Testattavat suodattimet

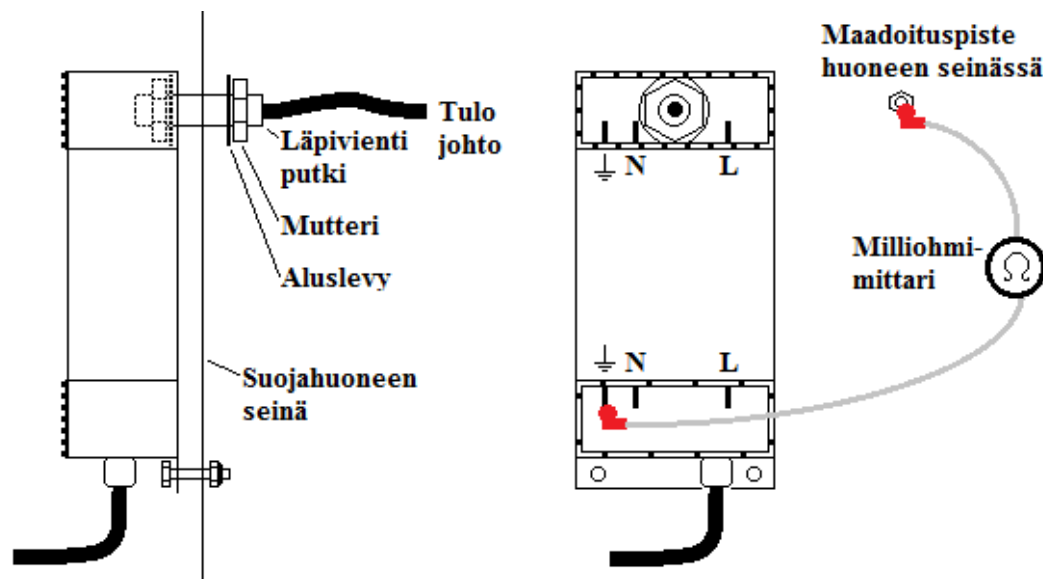
Malli	Jännite	Kuormitet- tavuus	Taajuus	DC- resistanssi
N5030	250 V	2 A	50/60/400 Hz	Ohjauslinja
N9002	250 V	16 A	DC – 60Hz	Tehonsyöttö
N1820	250 V	6 A	DC – 60Hz	Tehonsyöttö
E-LMF-4112	250 V	30 A	DC – 60 Hz	Tehonsyöttö
N2960 TS	24 V	0,3 A	DC	Ohjauslinja & kaiutin

- 1) Mitataan suodattimen tasavirtaresistanssi ja verrataan sitä annettuun arvoon
- 2) Mitataan resistanssi suojahuoneeseen oikein asennetusta ja rungostaan hyvin maadoitetusta suodattimesta (kaavio 4), kirjataan tulos muistiin.
- 3) Suoritetaan RF- mittaukset ja tehdään mahdollisesti tarvittavat korjaukset, jotta huone saavuttaa vaadittavan tason.
- 4) Kytetään suodatin verkkoon ja kuormitetaan sitä esimerkiksi valaisimilla.
- 5) Suoritetaan RF- mittaukset. Vaimennustason ollessa riittävä siirrytään vaiheeseen 7.
- 6) Vaimennustaso ei ollut riittävä ja suodatin päästää signaaleja läpi. Kokeillaan lisää kaksi maajohtoa rinnan suodattimen maadoituspisteestä, huoneen maadoituspisteeseen sekä sisä- että ulkopuolelle huonetta (johtimia lisäämällä maadoituksen induktanssi sekä resistanssi pienenevät). Toistetaan vaiheet 4 ja 5.
- 7) Irrotetaan toimivaksi todettu suodatin verkosta.
- 8) Heikennetään suodattimen maadoitusta poistamalla maadoitustiiviste läpivientiputken ympäriltä.
- 9) Mitataan resistanssi heikommin maadoitetusta suodattimesta (kaavio 5), kirjataan tulos muistiin.
- 10) Toistetaan vaiheet 3 - 7.





Kaavio 4. Maadoituksen resistanssin mittaaminen milliohmimittarilla (Vinho 2016)



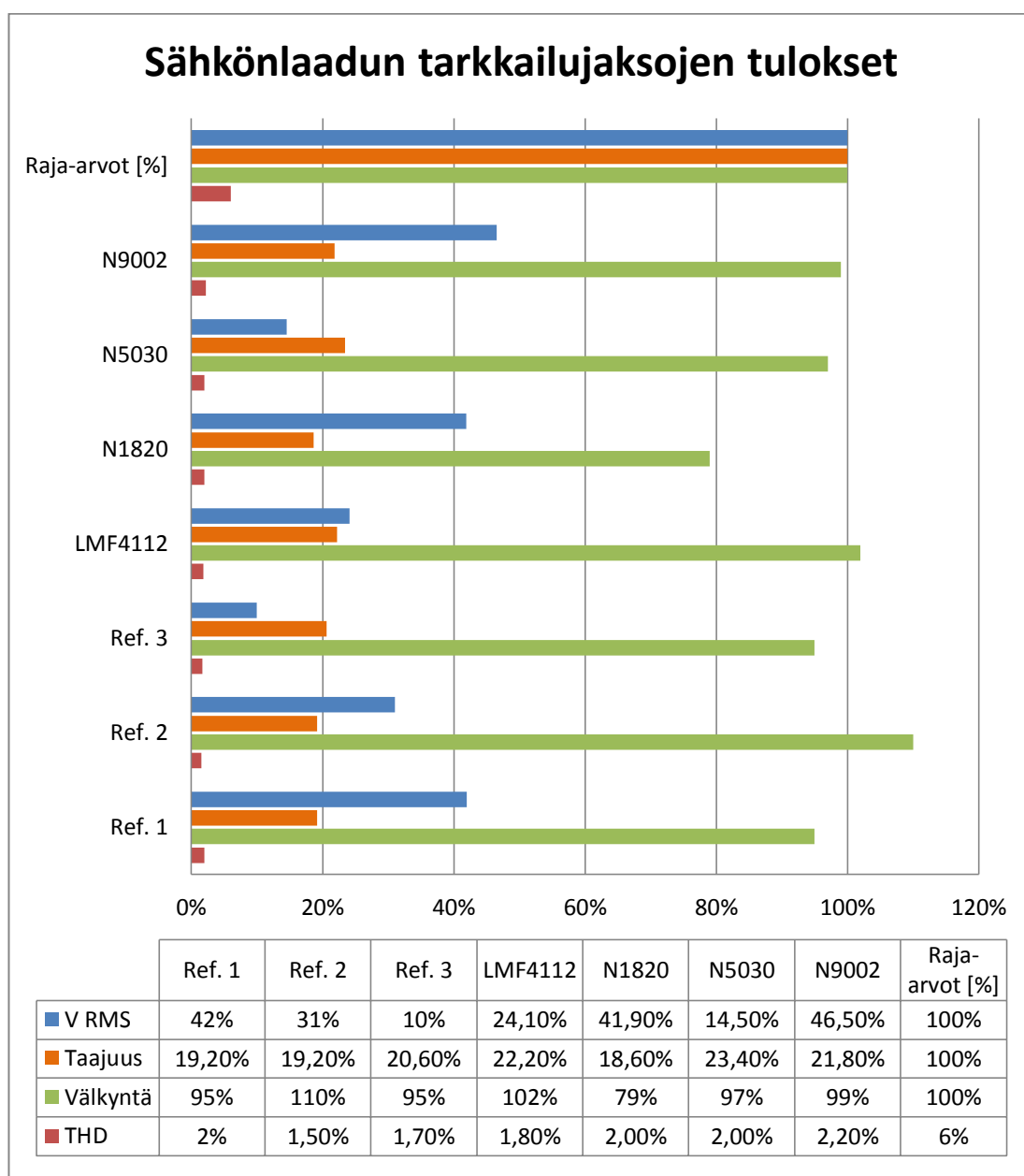
kaavio 5. Maadoituksen resistanssin mittaaminen ilman maadoitustiivistettä (Vinho 2016)

#### 4.4 Sähkönlaadun testauksien tulokset

Sähkönlaatua mitattiin kahden tunnin jaksoissa, koska aika ei olisi riittänyt seitsemän vuorokauden tarkkailujaksoon, eikä passiivisilla suodattimilla uskottu olevan ajasta riippuvaa vaikutusta sähkönlaatuun. Mittauksissa käytettiin suojaerotusmuuntajaa

aina ennen sähkönlaatumittaria, jotta verkossa olevat mahdolliset häiriöt saattaisivat jäädä muuntajaan. Vertailuarvoja mitattiin ilman suodattimia kolme jaksoa, koska yksi mittaus ylitti varoitusarvon. Näin voitiin varmistaa, että verkossa oli poikkeamaa, eikä suodatin itsessään aiheuttanut sähkönlaadun muutoksia (kaavio 6).

Välkyntä oli ainoa suure, missä raja-arvo ylittyi. Ylitys havaittiin sekä suodattimen kanssa että ilman suodatinta. Välkyntä johtuu mitä todennäköisimmin teollisuusalueella olevasta mittauspaikasta. Muissa arvoissa ei ole merkittäviä eroja mittauksissa suodattimella tai ilman.



Kaavio 6. Sähkönlaadun mittaustulokset (Vinho 2016)

#### 4.5 Maadoituksen resistanssin vaikutuksien tulokset

Suodattimia testattiin ensin hyvin tiivistettynä ja vuotoja ilmeni yhdessä suodattimessa, N5030. N5030 suodattimelle kokeiltiin maadoitusjohtojen lisäämistä, tiivisteiden lisäämistä, teippaamista johtavalla teipillä ja lähes kaikkea mahdollista. Sen sai pitämään ainoastaan poistamalla tulojohto ja tukkimalla likaisen puolen läpivienti pronssivillalla. N5030 suodatinta ei saatu vaimentamaan enempää kuin 80 dB käytössä ja se päätettiin jättää pois testeistä. Kyseiset suodattimet olivat jo asennettu aiemmin asiakkaan kohteeseen, eivätkä ne toimineet sielläkään. Muut suodattimet vaimensivat enemmän kuin mittauslaitteistossa on dynamiikkaa (taulukko 4).

Taulukko 4. Suurin mitattava vaimennus eri taajuuksilla

51 MHz	101 MHz	401 MHz	1 GHz	2 GHz	5 GHz	10 GHz	15 GHz	18 GHz
120 dB	129 dB	133 dB	127 dB	130 dB	125 dB	115 dB	109 dB	91 dB

Tarkkuusohmimittarilla mitattiin suodattimen kiinnityksen ja kontaktin resistanssia. Resistanssimittauksessa ei moninkertaisia eroja saatu näkyviin, vaikka suodattimien alle laitettiin pahvia eristeeksi ja läpivientiputket jätettiin melko löysälle. Kuitenkin vuotoja saatiin näkyviin ja vaimennus putosi selvästi alle 100 dB:n lukemiin huonosti asennettujen suodattimien myötä. Taulukossa 5 vasemmalla sarakkeessa on ohjeen mukaan asennetut suodattimien resistanssit, keskellä lisätty eristettä suodattimen ja seinän väliin ja oikealla kiristetty eristetyn suodattimen läpivientiputki niin hyvin, ettei vuotoja enää ilmennyt.

Taulukko 5. Suodattimien maadoitusvastuksia

Suodattimen tyyppi	Resistanssi [Ω]	Resistanssi [Ω]	Resistanssi [Ω]
	Oikea asennus	Huono asennus	Hyvä asennus
N9002	335 μΩ	326 μΩ	140 μΩ
N1820	132 μΩ	246 μΩ	286 μΩ
LMF-4112	147 μΩ	253 μΩ	166 μΩ
N2960TS	280 μΩ	333 μΩ	306 μΩ



Kuva 15. Suodattimet asennettuna testihuoneen seinään (Vinho 2016)

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Passiivisten sähkösuodattimien ei havaittu vaikuttavan sähkönlaatuun merkittävästi. Vaihtelua tuloksissa ilmenee eri mittausajankohtien ja testialueen teollisuusalueella olevan sijainnin vuoksi.

Suodattimien asennuksessa havaittiin suurimman merkityksen olevan läpivientien kontaktilla. Resistanssi pysyy melko muuttumattomana, vaikka suurin osa suodattimen ja seinän välisestä pinta-alasta olisi eristettynä. Vaimennusta heikentävää tekijää havaittiin vain, jos läpivientiputkia ei ollut kiristetty riittävään momenttiin ja näissä tilanteissa tuntui jäävän suodattimen ja seinän väliin radiotaajuuden mentävä aukko.

## 6 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä sain perehtyä radiotaajuiseen sähkömagneettiseen säteilyyn ja sen vaimentamiseen. Perehdyin tarkkaan myös mittalaitteisiin, joita työn tekemisessä käytin. Sain työstä arvokasta kokemusta itselle uusien tekniikoiden ja teoreemojen soveltamisessa käytännössä. Työn tekeminen opetti myös löytämään tietoa useasta eri paikasta. Aiheeni työssä oli erikoisalaa, joten kirjallisuutta oli tarjolla vain vähän.

Työ antoi tilaajalle vahvistuksen suodattimien asennuksen oikeellisuuden merkityksestä, suojausvaimennuksen takaamiseksi. Suodattimien merkitystä sähkönlaatuun tilaaja voi myös kertoa tutkineensa tulevaisuudessa tarpeen vaatiessa.

Mielestäni työtä oli mielekästä tehdä, myös niinä aikoina kun pähkäilin useita tunteja miettiessäni ja laskiessani erästä kaavaa. Aikaa työn tekemiseen oli riittävästi ja kokonaisuutena sain aikaan mielestäni kattavan paketin sähkömagneettisesta säteilystä ja suodattimista.

## LÄHTEET

Besnier, P. & Demoulin, B. 2011. Electromagnetic reverberation chambers. London: Iste ltd. Viitattu 3.2.2016.

site.ebrary.com.lillukka.samk.fi/lib/samk/reader.action?docid=10660584

ETS-Lindgrenin www-sivut. Viitattu 24.4.2016. [www.ets-lindgren.com](http://www.ets-lindgren.com)

Fluke 433/434 Käyttöohje. 2005. Hollanti

Hyvä tietää säteilystä. 2007. Helsinki: Energiateollisuus. Viitattu 14.1.2016.

[http://energia.fi/sites/default/files/hyva\\_tietaa\\_sateilysta\\_lr\\_130808.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/hyva_tietaa_sateilysta_lr_130808.pdf)

IEC 61000-4-3:en. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-3: Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test.

MIL-STD-220C. Test method standard. Method of insertion loss measurement. 2009. Department of defense. Columbus: Department of defense.

MIL-STD-461F. Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. 2007. Department of defense.

Peltonen H, Perkkiö J & Vierinen K. 2007. Insinöörin (AMK) Fysiikka osa 2. 7.p. Saarijärvi: Lahden Teho-Opetus.

Megger Digital Low Resistance Ohmmeter Ducter DLRO -10 & Ducter DLRO -10X User Guide

Morrison R. 1998. Grounding and shielding techniques. 4.p. New York: John Wiley & sons

Mäkelä M, Mäkelä R & Siltanen S. 1997. Insinöörikoulutuksen fysiikka 2. 3.p. Tampere: Tammertekniikka.

Nyberg H & Jokela K. 2006. Säteily- ja ydinturvallisuus: Sähkömagneettiset kentät. Helsinki: Säteilyturvakeskus. Viitattu 14.1.2016.

[http://www.stuk.fi/documents/12547/494524/6\\_1\\_1.pdf/c1de870c-bc49-42d5-bc8d-83b6c4ddab9a](http://www.stuk.fi/documents/12547/494524/6_1_1.pdf/c1de870c-bc49-42d5-bc8d-83b6c4ddab9a)

Ozenbaugh, R.L. 2000. EMI Filter design. 2.p. New York: CRC-Press. site.ebrary.com.lillukka.samk.fi/lib/samk/reader.action?docid=10051113

Sepponen R. 2012. EMC periaatteet ja käytäntö/Tuotesuunnittelu. Helsinki: Unigrafia.

Sihvola A. & Lindell I. 2004. Sähkömagneettinen kenttäteoria 2. Dynaamiset kentät. 4.p. Helsinki: Otatieto.

Silvonen K. 2003. Sähkötekniikka ja elektroniikka. Helsinki: Hakapaino.

Su, K.L. 2002. Analog Filters. 2.p. New York: Kluwer academic. Viitattu 9.3.2016. [site.ebrary.com.lillukka.samk.fi/lib/samk/reader.action?docid=10067273](http://site.ebrary.com.lillukka.samk.fi/lib/samk/reader.action?docid=10067273)

Suvanto K & Laajalehto K. 2005. Tekniikan fysiikka 2. 3.p. Helsinki: Edita.

Sähkötoimituksen laatu- ja toimitustapavirheen sovellusohje. 2014. Energiateollisuus. Viitattu 29.4.2016. [ener-gia.fi/sites/default/files/sahkon\\_laadun\\_ja\\_toimitustapavirheen\\_sovellusohje\\_2014.pdf](http://ener-gia.fi/sites/default/files/sahkon_laadun_ja_toimitustapavirheen_sovellusohje_2014.pdf)

Young & Freedman. 2004. University Physics with Modern Physics. 11.p. Pearson.



## Control Filters N502X & N503X Series

### FEATURES:

- Low volt drop
- Current range up to 10 Amps
- Protection for Tempest
- AC and DC options
- Interchangeable with L2962/72
- RoHS compliant and CE marked for compliance with the low voltage directive



N502X and N503X Control Filters

**THE N502X AND N503X** are EMP/EMI control filters for Tempest and EMC applications with performance of 100 dB from as low as 14 kHz and up to 10 GHz on full load conditions.

### DESCRIPTION

Both filters are physically interchangeable with the L2962 and L2972 filters and are divided into two ranges for DC and AC options. The AC filters are also suitable for 400 Hz supplies.

Both ranges (AC and DC) are available with optionally fitted transient suppressors for surge and spike protection. The filter networks are RF sealed in high quality electro-tin plated steel cases and are shock resistant to 10g.

The load current must return through the filters to ensure that the maximum performance is maintained. Solid and permanent earthing of the case is essential for safety reasons and to ensure optimum performance.

### FEATURES

These filters have a low voltage drop under a full load and a current range from 2 to 10 amps. They also provide protection for Tempest applications. Both are RoHS compliant and CE marked for compliance with the low voltage directive.

### APPLICATIONS

- The DC filters are ideal for fire and intruder alarm systems, emergency lighting and DC control circuits such as lifts, automatic doors and relay controls.
- The AC filters' applications include the AC versions of the DC systems listed above, as well as low current lighting circuits and power supplies.

### STANDARD CONFIGURATION

- Supplied with conduit bush for load end and all required fixings
- Dedicated neutral

### OPTIONS

- TS (transient suppressor)
- HVTS (high voltage transient suppressor)
- Other options available upon request

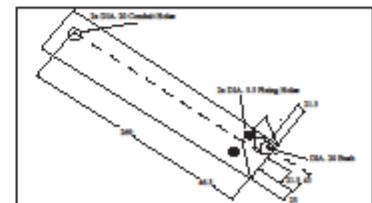
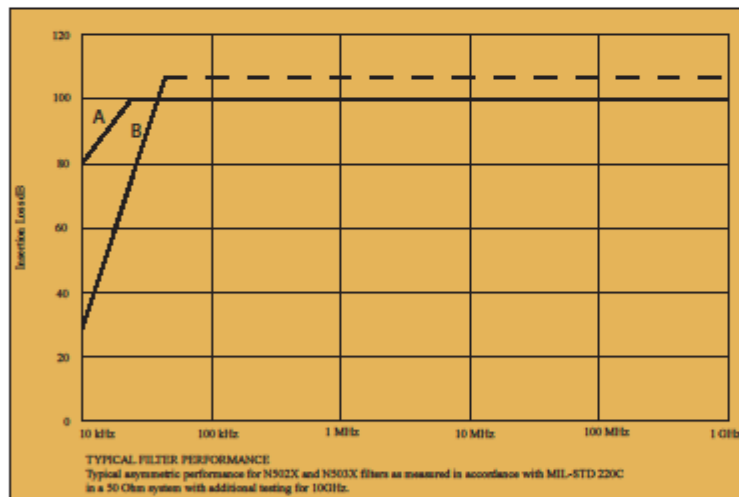


**Electrical Specifications**

PART #	CURRENT MAX	FREQUENCY/VOLTAGE MAX	# OF LINES	VOLTAGE DROP PER LINE AT FULL POWER	DC RESISTANCE PER LINE	MAX RECOMMENDED CASE TEMP	FILTERS FITTED WITH 125V TRANSIENT SUPPRESSORS	FILTERS FITTED WITH 250V TRANSIENT SUPPRESSORS
N5020	2 amps	100V/DC	2	0.6V	0.3 ohms	70 deg. Celsius	N5020TS	N/A
N5021	5 amps	100V/DC	2	0.2V	0.04 ohms	70 deg. Celsius	N5021TS	N/A
N5022	10 amps	100V/DC	2	0.4V	0.04 ohms	70 deg. Celsius	N5022TS	N/A
N5030	2 amps	250V/50/60/400Hz	2	0.7V	0.3 ohms	70 deg. Celsius	N/A	N5030TS
N5031	5 amps	250V/50/60/400Hz	2	0.3V	0.04 ohms	70 deg. Celsius	N/A	N5031TS
N5032	10 amps	250V/50/60/400Hz	2	0.5V	0.04 ohms	70 deg. Celsius	N/A	N5032TS

**Physical Specifications**

PART #	LENGTH (mm)	WIDTH (mm)	HEIGHT (mm)	WEIGHT (kg)
N5020	382 mm	89 mm	55 mm	1.7 Kg
N5021	382 mm	89 mm	55 mm	1.8 Kg
N5022	382 mm	89 mm	55 mm	1.8 Kg
N5030	382 mm	89 mm	55 mm	1.7 Kg
N5031	382 mm	89 mm	55 mm	1.8 Kg
N5032	382 mm	89 mm	55 mm	1.8 Kg



Phone +1.630.307.7200 • info@ets-lindgren.com • www.ets-lindgren.com  
Offices in the US, Finland, UK, France, Singapore, India, Japan, China, Taiwan

**POWER FILTERS** HIGH PERFORMANCE EMI FILTERS



**MODEL N900X**

- 100 dB Insertion Loss from 9 kHz up to 40 GHz
- Low Power Dissipation
- Compact, Rugged Construction
- Current Range 16 to 200 Amps
- Fitted with Transient Suppressors as a Standard
- Stainless Steel Construction

**ETS-Lindgren's Model N900X Power Filters** are high performance EMI power filters for use in EMC and Data Center/IT applications as well as any other installation which requires maximum protection from mains borne interference.

The N900x Series Filters are all RF sealed in high quality stainless steel cases and include multi stage filtering for significant filtering performance. The load current must return to the dedicated neutral in order to maintain maximum performance. Solid and permanent earthing of the filter case is essential for safety reasons and to ensure optimum performance. All ETS-Lindgren filters are CE marked for compliance with the Low Voltage Directive.

**Insertion Loss**  
The N900x range provides 100 dB from 9 kHz to 40 GHz.

**Low Power Dissipation**  
These filters offer very low power dissipation and a case temperature rise of 25°C at full load.

**Current Range**  
The N900x range offers current ratings from 16 Amps to 200 Amps in both Single Phase + N and Three Phase + N.

**Voltage Drop**  
The Voltage drop at full load is below 2 %.

**Applications**

- High Performance Screened Rooms
- Anechoic Chambers
- Reverb Chambers
- Computer Suites/Data Centers
- EMC Applications
- General Purpose High Performance Filtering

**Standard Configuration**

- Transient Suppressor's Fitted as Standard
- Supplied with Fixing Kit and Penetrations
- Dedicated Neutral

**Options**

- Custom Cable Entry and Exit Locations Available on Request
- Alternative Transient Suppressors Available as Required

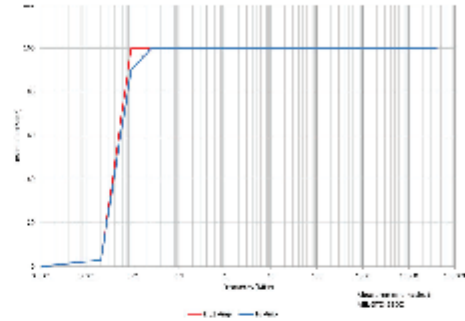
**Technical Specifications**

Electrical	N9000	N9001	N9002	N9003	N9004	N9005	N9006	N9007	N9008	N9009
Current Maximum	16 A	16 A	32 A	32 A	63 A	63 A	100 A	100 A	200 A	200 A
Leakage Current 240 V, 50 Hz	0.905 A	0.06 <sup>1</sup> A	1.282 A	0.085 <sup>1</sup> A	1.282 A	0.085 <sup>1</sup> A	1.772 A	0.118 <sup>1</sup> A	4.22 A	0.028 <sup>1</sup>
Leakage Current 110 V, 60 Hz	0.498 A	0.06 <sup>1</sup> A	0.705 A	0.085 <sup>1</sup> A	0.705 A	0.085 <sup>1</sup> A	0.975 A	0.118 <sup>1</sup> A	2.322 A	0.028 <sup>1</sup>
Voltage Maximum	250 V	250/400 V	250 V	250/400 V	250 V	250/400 V	250 V	250/400 V	250 V	250/400 V
Frequency	DC to 60 Hz	DC to 60 Hz	DC to 60 Hz	DC to 60 Hz	DC to 60 Hz	DC to 60 Hz	DC to 60 Hz	DC to 60 Hz	DC to 60 Hz	DC to 60 Hz
Lines	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4

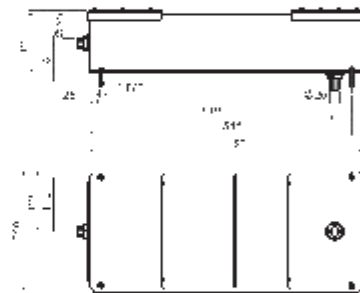
<sup>1</sup> With 3-phase filters, the leakage currents will be 120° out of phase and will largely cancel as a result. The resultant leakage current will depend on how well the line capacitance and phase voltages are matched. The resultant leakage current is typically less than 5 mA per µF.

## POWER FILTERS HIGH PERFORMANCE EMI FILTERS

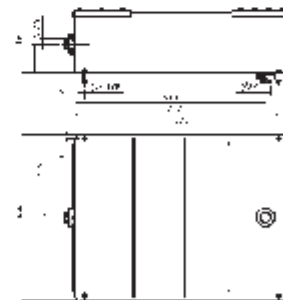
**N900X Insertion Loss Performance**



**N9000 Power Filter**

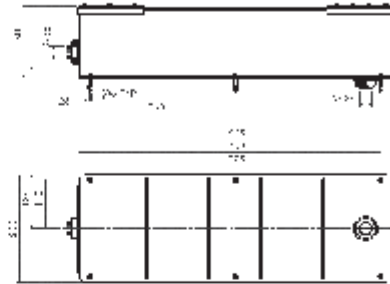


**N9001 Power Filter**

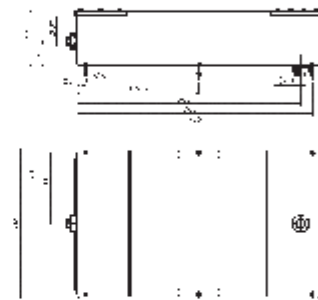


## POWER FILTERS HIGH PERFORMANCE EMI FILTERS

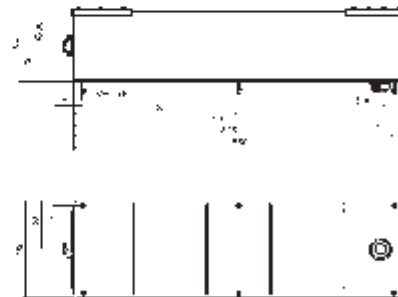
N9002 Power Filter



N9003 Power Filter

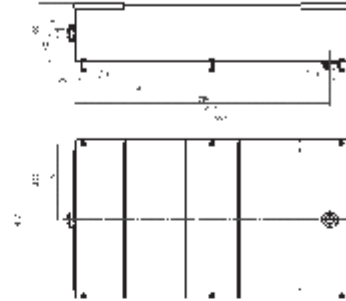


N9004 Power Filter

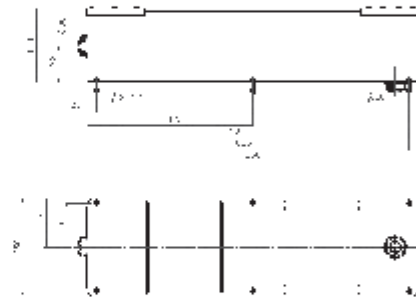


**POWER FILTERS** HIGH PERFORMANCE EMI FILTERS

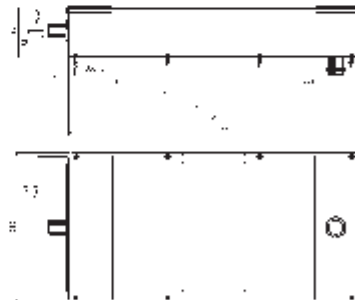
**N9005 Power Filter**



**N9006 Power Filter**

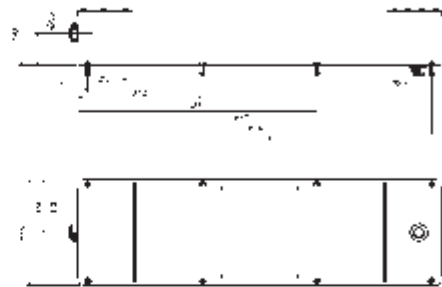


**N9007 Power Filter**

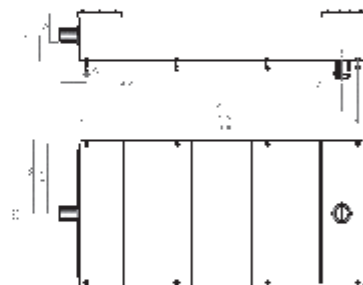


## POWER FILTERS HIGH PERFORMANCE EMI FILTERS

NB008 Power Filter



NB009 Power Filter



Information presented is subject to change as product enhancements are made. Contact ETS-Lindgren Sales Department for current specifications.

ETS - 001057 ©2016 ETS-Lindgren v1.0



## Power Filters N182x Series

### FEATURES:

- Suitable for 400 Hz supplies
- 100 dB insertion loss
- Compact size
- Current range from 6 Amps to 100 Amps



N182X Series Power Filters

**THE N182x series filters** are RFI/EMI reliable, high performance power filters for use in general purpose applications.

### DESCRIPTION

The N182x filters offer a high protection rate against EMI and EMP. Filters of the same part number may be connected with parallel lines to give increased current capability without loss of attenuation.

The filter networks of this series are RF sealed in high quality electroplated steel cases. Solid and permanent earthing of the filter case is essential for safety reasons and to ensure optimum performance.

### FEATURES

The N182x series filters can be used on 400 Hz supplies when the supply voltage is 110 V.

These filters provide 100 dB insertion loss from 150 KHz to 10 GHz at full load in both symmetric and asymmetric modes.

They are a compact size and are made from durable materials, which ensure reliable performance.

A current range from 6 Amps to 100 Amps is offered. The filters are available in both Single Phase + Neutral and Three Phase + Neutral.

### APPLICATIONS

- Filtering mains supply cables to RF screened rooms where 100 dB attenuation is required.
- Filtering mains supply cables to computers and other types of equipment that contain solid state circuits requiring a high degree of protection against mains-borne interference. For this type of application, the filters are usually wall-mounted adjacent to the equipment.
- Fitted with transient suppressors, they give total protection against all normal mains-borne interference.
- For 400 Hz supplies, particularly

those required to meet stringent limits on wave form distortion and harmonic content

### STANDARD CONFIGURATION

- Supplied with end housings
- Supplied with fixing kit

### OPTIONS

- TS (transient suppressor)
- HVTS (high voltage transient suppressor)
- Other options available on request

**Electrical Specifications**

PART #	Current Max	# of Lines	Voltage drop on full load/line	DC resistance per line	Total series inductance/line	Total shunt capacitance/line	Case temp. rise on full load	Max. recommended case temp. on full load	Full load dissipation
N1820	6 amps	2	1V	100 mΩ	1680 µH	1.5 µF	+10 °C	+70 °C	12 W
N1821	6 amps	4	1V	100 mΩ	1680 µH	1.5 µF	+10 °C	+70 °C	24 W
N1822	32 amps	2	0.4V	15 mΩ	177 µH	8.5 µF	+12 °C	+70 °C	100 W
N1823	32 amps	4	0.4V	15 mΩ	177 µH	8.5 µF	+12 °C	+70 °C	200 W
N1824	63 amps	2	0.3V	3 mΩ	25.5 µH	8.5 µF	+12 °C	+70 °C	60 W
N1825	63 amps	4	0.3V	3 mΩ	25.5 µH	8.5 µF	+12 °C	+70 °C	120 W
N1826	100 amps	2	0.5V	2 mΩ	37 µH	8.5 µF	+25 °C	+70 °C	120 W
N1827	100 amps	4	0.5V	2 mΩ	37 µH	8.5 µF	+25 °C	+70 °C	240 W

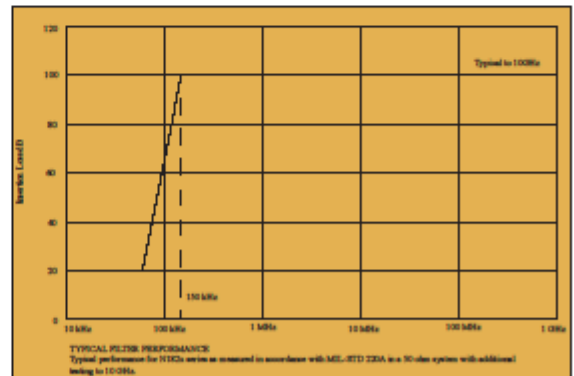
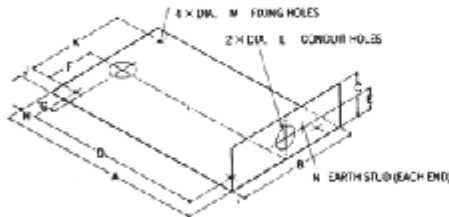
Voltage Frequency Max.  
2 Line Filters - 250 V, DC/50/60 Hz- 120 V-400 Hz  
4 Line Filters - 440/250 V, DC/50/60 Hz- 220/120 V- 400 Hz

Add TS to the end of the part number for 250 V with transient suppressors

Add HTS to the end of the part number for 400 V with transient suppressors

**Physical Specifications**

PART #	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	Weight (kg)
N1820	305	175	110	212	50	63.5	40.5	40.5	24	127	20	7	M6	5.9
N1821	305	345	110	212	50	108	40.6	40.5	64.5	210	20	9	M6	11.8
N1822	560	210	110	487	50	41.2	40	35	63.8	82.4	32	9	M6	12.7
N1823	560	415	110	487	50	143	40	35	64.5	286	32	13	M6	24.9
N1824	560	210	110	487	50	41.2	40	35	63.8	82.4	32	13	M6	12.7
N1825	560	415	110	487	50	143	40	35	64.5	286	32	13	M6	24.9
N1826	560	210	110	487	50	41.2	40	35	63.8	82.4	32	9	M6	17.7
N1827	560	415	110	487	50	143	40	35	64.5	286	50.8	13	M6	34



Phone +1.512.531.6400 • info@ets-lindgren.com • www.ets-lindgren.com  
Offices in the US, Finland, UK, France, Singapore, India, Japan, China, Taiwan



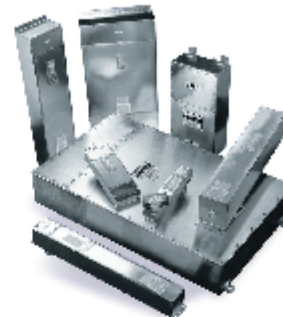


## RF Filters Medical Filters

ELUL, EQ and LMF

### Features:

- Filter Models to Match Requirements for:
  - Power and Lighting
  - Low Leakage
- 100 dB Insertion Loss up to 40 GHz
- Voltage Drop Less Than 1% of Applied Voltage
- Compliant with:
  - Low Voltage Directive 2006/95/EC
  - Mil-STD-220C
- UL 1283 5th Edition
- CSA C22.2 No. 8



ETS-Lindgren's Medical RF Filters

**ETS-LINDGREN'S MEDICAL RF FILTERS** enable services for lighting, power, fire detection and switching to be utilized inside the MRI room.

### DESCRIPTION

Facility filters allow specified frequencies to pass while suppressing or attenuating other frequencies. The filters listed as ELUL, EQ and LMF are our most common models utilized in medical applications. There are many other versions of RF filters also available for a wide variety of applications. Our complete line of RF filters incorporates a wide array of choices which provide effective EMI/RFI shielding to meet or exceed industry standards.

### FEATURES

The LMF-4112 is a versatile filter that is utilized for standard lighting and power circuits. This filter offers the advantage of an approximately 50% reduction in required surface area and weight. This means the use

of more circuits with substantially less space and weight than standard filters offering the same features. This filter has a 0-30 amp rating and operates at 250 VAC/VDC. It is c-UL rated and CE marked.

The EQ series are used for conventional thermostats, nurse calls, fire alarms, smoke detectors, switching, or any low leakage application. This series of filters has an operating range of 30 amps and 250 VAC/VDC. It is also c-UL rated and CE marked.

The ELUL filters are utilized for standard lighting, and power circuits. They are able to run at higher voltage requirements with a 0-30 amp range and operating up to 277 VAC and 480 VDC. It is c-UL rated and CE marked.

### APPLICATIONS

- ELUL, LMF and EQ filters are utilized to allow electrical services within a Magnetic Resonance

Imaging suite. All applications that require a conductor within the room interface with a filter. The most common services are lighting, power, smoke detectors and fire alarms.

### STANDARD CONFIGURATIONS

- Single phase, two line filters.
- Seam welded case with removable RF gasketed lid. Tin coated for long wear.
- Feedthrough penetration pipe for electrical leads.
- Mounting tabs provide secure access.

### OPTIONS

- ETS-Lindgren has a large variety of filters designed to meet almost any requirement. We have on-staff electrical engineers to custom design a filter for your application.

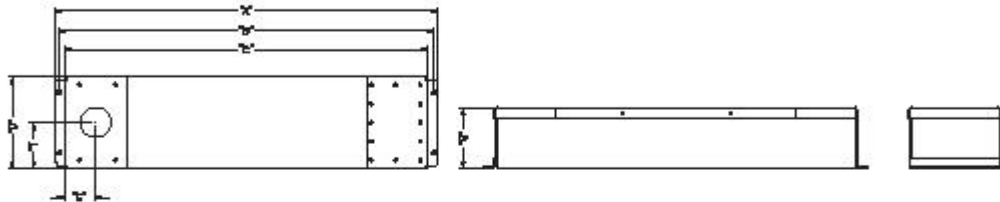
## Electrical Specifications

PART #	Rated Currents	# of Lines	Max. Leakage Current @ 220V, 50Hz	Max. Leakage Current @ 120V, 60Hz	Rated Voltage	Insertion Loss	Voltage Drop	Safety
E-EC-2005-1C RF Filter	0-5.0 A	2	50 mA	30 mA	250/430 VAC	100 dB min. from 150 kHz to 40 GHz per MIL-STD-220C	Not to Exceed 1% of Applied Voltage at Unity Power Factor	Meets UL Std. CE Marked
E-EC-4005-1C RF Filter	0-5.0 A	4	50 mA	30 mA	250 VAC/VDC	100 dB min. from 150 kHz to 40 GHz per MIL-STD-220C	Not to Exceed 1% of Applied Voltage at Unity Power Factor	Meets UL Std. CE Marked
E-ELUL-2030PEN RF Filter	0-30 A	2	700 mA	450 mA	277/480 VAC/VDC	100 dB min. from 150 kHz to 40 GHz per MIL-STD-220C	Not to Exceed 1% of Applied Voltage at Unity Power Factor	UL Listed US/Canada CE Marked
E-EQ-2001-1C RF Filter, Low Leakage	0-1.0 A	2	3 mA	1.5 mA	250 VAC/VDC	100 dB min. from 150 kHz to 40 GHz per MIL-STD-220C	Not to Exceed 1% of Applied Voltage at Unity Power Factor	UL Listed US/Canada CE Marked
E-EQ-2010-1C RF Filter, Low Leakage	0-10 A	2	3 mA	1.5 mA	250 VAC/250 VDC	100 dB min. from 150 kHz to 40 GHz per MIL-STD-220C	Not to Exceed 1% of Applied Voltage at Unity Power Factor	UL Listed US/Canada CE Marked
E-EQ-2030-1C RF Filter, Low Leakage	0-30 A	2	6 mA	3 mA	250 VAC/250 VDC	100 dB min. from 150 kHz to 40 GHz per MIL-STD-220C	Not to Exceed 1% of Applied Voltage at Unity Power Factor	UL Listed US/Canada CE Marked
E-EQ-2001-NV/PEN RF Filter, Low Leakage	0-1.0 A	2	3 mA	1.5 mA	30 VAC/50 VDC	100 dB min. from 150 kHz to 40 GHz per MIL-STD-220C	Not to Exceed 1% of Applied Voltage at Unity Power Factor	UL Listed US/Canada CE Marked
E-LMF-4112 MFI Filter	0-30 A	2	5 mA	1.5 mA	250 VAC/VDC	100 dB min. from 10 MHz to 40 GHz per MIL-STD-220C	Not to Exceed 1% of Applied Voltage at Unity Power Factor	UL Listed US/Canada CE Marked

## Physical Specifications

PART #	Approx. Weight	A	B	C	D	E	F	G
E-EC-2005-1C	2.7 kg (6.0 lb)	387.4 mm (15.3 in)	374.7 mm (14.8 in)	365.6 mm (14.0 in)	127.0 mm (3.0 in)	50.8 mm (2.0 in)	38.1 mm (1.5 in)	50.8 mm (2.0 in)
E-EC-4005-1C	5.4 kg (12.0 lb)	387.4 mm (15.3 in)	374.7 mm (14.3 in)	365.6 mm (14.0 in)	254.0 mm (6.0 in)	50.8 mm (2.0 in)	76.2 mm (3.0 in)	50.8 mm (2.0 in)
E-ELUL-2030PEN	6.8 kg (15.0 lb)	530.8 mm (21.3 in)	527.0 mm (20.8 in)	508.0 mm (20.0 in)	127.0 mm (3.0 in)	76.2 mm (3.0 in)	39.6 mm (1.6 in)	76.2 mm (3.0 in)
E-EQ-2001-1C	2.7 kg (6.0 lb)	387.4 mm (15.3 in)	374.7 mm (14.8 in)	365.6 mm (14.0 in)	127.0 mm (3.0 in)	50.8 mm (2.0 in)	38.1 mm (1.5 in)	50.8 mm (2.0 in)
E-EQ-2010-1C	2.7 kg (6.0 lb)	387.4 mm (15.3 in)	374.7 mm (14.8 in)	365.6 mm (14.0 in)	127.0 mm (3.0 in)	50.8 mm (2.0 in)	38.1 mm (1.5 in)	50.8 mm (2.0 in)
E-EQ-2030-1C	2.7 kg (6.0 lb)	387.4 mm (15.3 in)	374.7 mm (14.8 in)	365.6 mm (14.0 in)	127.0 mm (3.0 in)	50.8 mm (2.0 in)	38.1 mm (1.5 in)	50.8 mm (2.0 in)
E-EQ-2001-NV/PEN	2.7 kg (6.0 lb)	387.4 mm (15.3 in)	374.7 mm (14.8 in)	365.6 mm (14.0 in)	127.0 mm (3.0 in)	50.8 mm (2.0 in)	38.1 mm (1.5 in)	50.8 mm (2.0 in)
E-LMF-4112	2.7 kg (6.0 lb)	285.8 mm (11.3 in)	296.5 mm (11.8 in)	266.7 mm (10.5 in)	117.5 mm (4.6 in)	25.4 mm (1.0 in)	50.7 mm (2.0 in)	60.5 mm (2.5 in)

**Filter Specifications (Continued)**



E-EC-2005-1C



E-EC-4005-1C



E-ELUL-2030/PEN



E-EQ-2001-1C



E-EQ-2010-1C



E-EQ-2030-1C



E-EQ-2001-NR/PEN1C



E-LMF-4112

Phone + 1.512.531.6400 • [Info@ets-lindgren.com](mailto:Info@ets-lindgren.com) • [www.ets-lindgren.com](http://www.ets-lindgren.com)  
Offices in the US, Brazil, Finland, Germany, UK, France, Singapore, India, Japan, China, Taiwan

**ETS·LINDGREN**™ *RF/EMI CONTROL LINE  
AND LOUDSPEAKER FILTERS*  
An ESCO Technologies Company



### Description

The N296X Series and N2972 filters are designed for use on a wide range of circuits including control and alarm systems, fire detectors, electronic monitors and instruments.

The N296X Series comprises of 2-line, very high performance filters for use on 24 Volt DC systems, with the N2972 being the 250 Volt AC/DC equivalent of the N2962. They are ideally suited to situations which require the highest level of EMI, EMP or Tempest protection.

The N296X Series and N2972 have identical attenuation characteristics. They are constructed using a flat-pack design for ease of mounting to a metal shield or partition, with the output taken through the back. The filter networks are sealed in high quality electroplated steel cases.

The N1828, N2976 and the N2992 filters are housed in a brass tube which is mounted through a metal shield or partition. The filters' internal components are fully encapsulated in epoxy resin and plastic end covers are supplied.

The N2976 is a single line 240 VAC/DC, 10 Amp control filter for high current lines.

The N2435 provides 10-line modular filtering for multi-line systems.

If required, versions of these filters are available with transient suppressors fitted. See the Technical Data Table overleaf for these part numbers.

The N2992 filter has been designed for use in low wattage (20 Watts maximum) loud speaker circuits, with impedances in the range of 3-10 Ohms. Please refer to the sales office for filtering of 100V PA lines or circuits with multiple loud speakers.

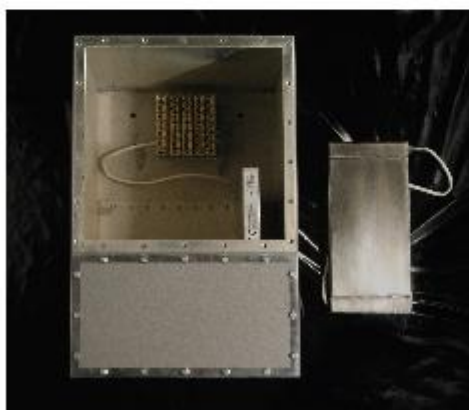
Please note, when selecting control line filters for intelligent alarm supply and similar circuits, attention should be paid to Volt drop and maximum allowable capacitance.

For data over power circuits (addressable fire sounders, a/c controllers etc.) refer to the sales office for advice.

All ETS-Lindgren filters are ROHS Compliant and are CE marked for Compliance with the low voltage Directive.

### Features

- 24V DC and 250V AC/DC options
- Tubular, Flat-Pack or Modular
- Attenuation from 100dB at 10kHz
- Suitable for EMI, EMP and Tempest protection



**UK:**  
Tel +44-1438-730700  
Fax +44-1438-730751

**USA:**  
Tel +1-512-531 6400  
Fax +1-512-531 6500

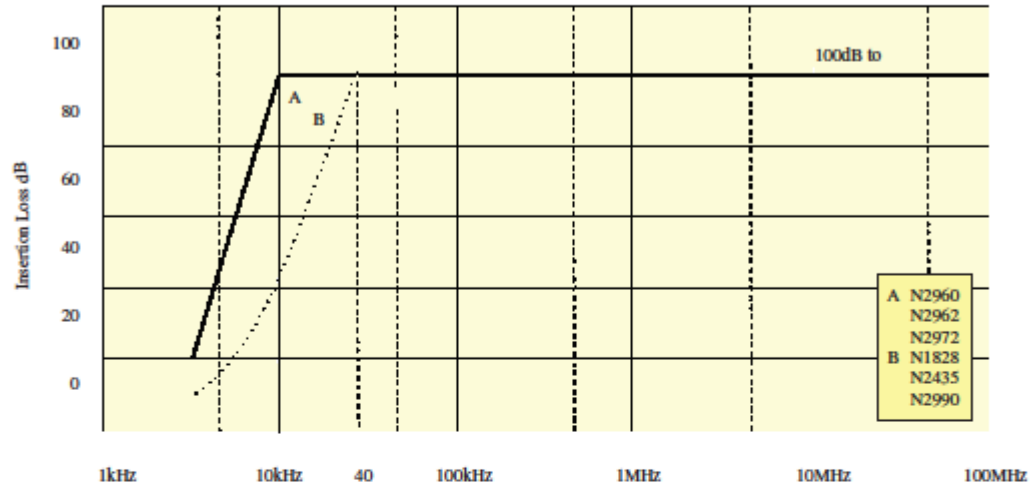
**FINLAND:**  
Tel +358-2-8383 300  
Fax +358-2-8651 233

**FRANCE:**  
Tel +33-1-48 65 34 03  
Tel +33-1-48 65 34 69

**CHINA:**  
Tel +86-10-8275 5086  
Tel +86-10-8275 5537

**JAPAN:**  
Tel +81-3-3813 7100  
Tel +81-3-3813 8068

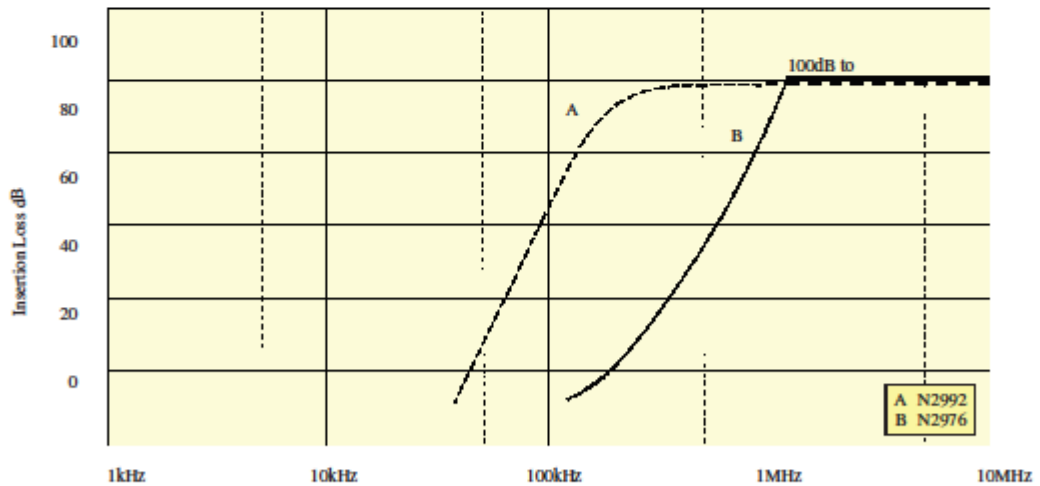
**Performance Graph**



**TYPICAL FILTER PERFORMANCE**

Typical performance for these filters as measured in accordance with MIL-STD 220A in a 50 Ohm system with additional testing to 10GHz.

**Performance Graph**



**TYPICAL FILTER PERFORMANCE**

Typical performance for these filters as measured in accordance with MIL-STD 220A in a 50 Ohm system with additional testing to 10GHz.

**UK:**

Tel +44-1438-730700  
Fax +44-1438-730751

**USA:**

Tel +1-512-531 6400  
Fax +1-512-531 6500

**FINLAND:**

Tel +358-2-8383 300  
Fax +358-2-8651 233

**FRANCE:**

Tel +33-1-48 65 34 03  
Tel +33-1-48 65 34 69

**CHINA:**

Tel +86-10-8275 5086  
Tel +86-10-8275 5537

**JAPAN:**

Tel +81-3-3813 7100  
Tel +81-3-3813 8068

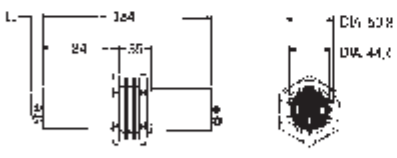
**Technical Data**

FILTER TYPE	N2960	N2962	N2992	N2972	N1828 N2990	N2976	N2435
Current max (Amps)	0.3	2	0.5	2	0.3	10	0.3
Voltage/frequency max. (Volts/Hz)	24V DC		100VAC	250V DC 50/60Hz			125VAC
Number of lines	2	2	2	2	2	1	10
Voltage drop on full load (V)	1	0.65	0	2	3	0.5	3
DC resistance per line (Ω)	3.3	0.32	<1	1.1	10	0.014	10
Total shunt capacitance per line (μF)	16.1	20.33	3	3.8	0.2	0.21	0.2
Case temperature rise on full load (°C)	+2	+5	+1	+10	+3	+8	+3
Max. recommended case temperature on full load(°C)	+70						
Full load dissipation (W)	0.6	3	0.5	8	2	5	2
Filter type with 250V transient suppressors	-	-	-	N2972TS	N1828TS N2990TS	-	N2435TS *See Note 1
Filter type with 24V transient suppressors	N2960TS	N2962TS	-	-	-	-	-

\*Note 1 These transient suppressed versions are fitted inside the housings, not to modules.

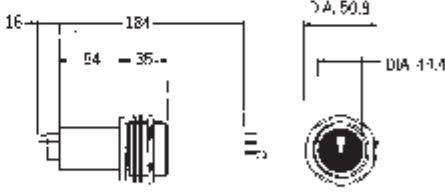
**Physical Data**

PART NUMBER	Length (mm)	Diameter (mm)	Weight (kg)
N1828/N2992	206	65	0.68



DIA. 52 PANEL MOUNTING HOLE

PART NUMBER	Length (mm)	Diameter (mm)	Weight (kg)
N2976	216	65	0.4



DIA. 52 PANEL MOUNTING HOLE

**UK:**  
Tel +44-1438-730700  
Fax +44-1438-730751

**USA:**  
Tel +1-512-531 6400  
Fax +1-512-531 6500

**FINLAND:**  
Tel +358-2-8383 300  
Fax +358-2-8651 233

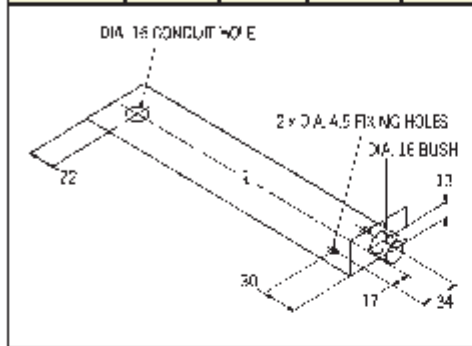
**FRANCE:**  
Tel +33-1-48 65 34 03  
Tel +33-1-48 65 34 69

**CHINA:**  
Tel +86-10-8275 5086  
Tel +86-10-8275 5537

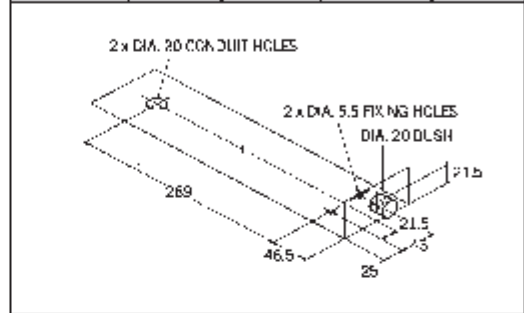
**JAPAN:**  
Tel +81-3-3813 7100  
Tel +81-3-3813 8068

**Physical Data**

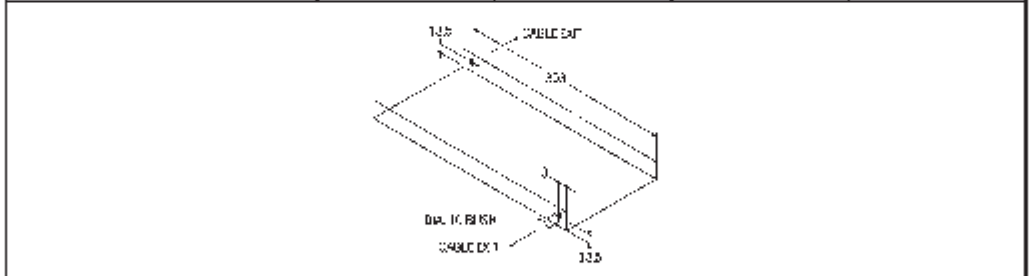
PART NUMBER	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)	Weight (kg)
N2960/N2990	258	58	32	1



PART NUMBER	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)	Weight (kg)
N2962	362	93	52	1
N2972	362	93	52	2



PART NUMBER	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)	Weight (kg)
N2435	320	26	150	2.2



PART NUMBER	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	P	Weight (kg)
N2457	520	190	360	406	246	10	80	57	35	120	25.4	9	10	15
N2456	520	340	360	416	250	19.5	80	52	67.5	205	38	9	19.5	21
N2455	520	640	360	406	250	230	80	57	90	460	51	9	60.5	40

10 LINE HOUSING	
Housing Number	Number of Lines
N2457	UP TO 50
N2456	UP TO 100
N2455	UP TO 200

Technical drawing of the 10 Line Housing. It shows a perspective view of a rectangular component with a slanted top surface. Key features and dimensions include: four diameter 9 fixing holes, two diameter 16 conduit holes, a length of 520, a width of 340, a height of 360, and a depth of 416. A diameter 10 cable entry is also indicated.

**Continuous Development:** ETS-Lindgren Ltd reserves the right to amend any information contained within this datasheet without prior notice to take into account new developments. Please note: All figures are typical unless otherwise specified. All dimensions are approximate. All dimensions are in mm.

**Reproduction:** No part of this document may be reproduced in any way whatsoever without the prior written consent of ETS-Lindgren Ltd.