

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Olli Kara

Välkyntämittareiden kalibrointimenetelmän kehittäminen

Diplomityö, joka on jätetty tarkistettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa
31.5.2007

Valvoja	Prof.	Matti Lehtonen
Ohjaaja	TkT	Jari Hällström

Alkulause

Diplomityö on tehty Teknillisen korkeakoulun Sähköverkkojen ja suurjännitetekniikan laboratoriossa opinnäytteeksi Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osastolle.

Haluan kiittää työn valvojaa, professori Matti Lehtosta ja ohjaajaa Jari Hällströmiä hyvästä ohjauksesta. Kiitos kuuluu myös Esa-Pekka Suomalaisille hyödyllisistä neuvoista. Apua on aina ollut saatavilla, kun vain olen sitä osannut pyytää.

Hennalle haluan osoittaa suuret kiitokset kannustuksesta suuressa urakassani ja vanhemmilleni tuesta koko pitkän opintieni aikana.

Espoossa 31. toukokuuta 2007

Olli Kara

Tekijä:	Olli Kara		
Työn nimi:	Välkyntämittareiden kalibrointimenetelmän kehittäminen		
Päivämäärä:	31.5.2007	Sivumäärä:	74
Osasto:	Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto		
Professuuri:	S-18 Sähköverkot ja suurjännitetekniikka		
Työn valvoja:	Professori Matti Lehtonen		
Työn ohjaaja:	TkT Jari Hällström		
<p>Välkyntä on sähkön laatuongelma, joka johtuu sähköverkon jännitteen nopeista vaihteluista. Niitä aiheuttavat pääasiassa suuret kuormat, joiden verkosta ottama teho vaihtelee huomattavasti suhteessa verkon oikosulkutehoon kuorman kytkentäpisteessä. Jännitteen vaihteluiden haitoista suurin on valojen välkyntä, jota esiintyy jo hyvin pienillä, alle prosentin jännitteen vaihteluilla.</p> <p>Välkyntämittari on laite, joka mittaa sähköverkon jännitettä ja arvioi mittauksen perusteella valaistuksen välkyntänsä havaittavuuden. Tämä tapahtuu simuloimalla lampun, silmän ja aivojen toimintaa. Lisäksi välkyntämittari laskee tilastollisesti välkyntänsä häiritsevyyssindeksiin (P_{st}) kymmenen minuutin mittausjaksoille. Häiritsevyyssindeksi arvo 1 vastaa koehenkilöiden avulla määritettyä välkyntänsä häiritsevyyssynnystä. Pidemmän ajan häiritsevyyssindeksi (P_{lt}) lasketaan peräkkäisistä P_{st}-arvoista. Välkyntämittarin rakenteen ja toiminnan määrittelee kansainvälinen standardi IEC 61000-4-15.</p> <p>Diplomityössä on kehitetty menetelmä ja laitteisto välkyntämittareiden kalibrointia varten. Menetelmä perustuu referenssimittariin, joka on rakennettu mahdollisimman tarkasti standardin mukaan ja jonka epävarmuutta on arvioitu. Laitteiston käyttöä on kokeiltu myös kaupallisen sähkönlaatuanalysointilaitteen kalibrointiin.</p>			
Avainsanat: sähkön laatu, välkyntä, välkyntämittari, kalibrointi			

Author:	Olli Kara		
Name of the Thesis:	Development of a Calibration Method for Flickermeters		
Date:	31.5.2007	Number of pages:	74
Department:	Department of Electrical and Communications Engineering		
Professorship:	S-18 Power Systems and High Voltage Engineering		
Supervisor:	Professor Matti Lehtonen		
Instructor:	Jari Hällström, D.Sc. (Tech.)		
<p>Flicker is a power quality issue which is caused by rapid fluctuations of supply voltage. The most common sources of voltage fluctuations are large loads which take rapidly changing inductive power from the supplying power system. Of all electric equipment, lamps are most sensitive to voltage fluctuations. Flicker is already perceptible for fluctuation levels of the order of a few percent.</p> <p>A flickermeter is a device that measures the voltage and thus evaluates the flicker perceptibility. This is done by simulating the behavior of lamp, eye and brain. A flickermeter also performs a statistical analysis for ten minute periods of the perceptibility data. The result of the statistical analysis is flicker severity index (P_{st}). Value 1 of the severity index corresponds with the irritability threshold of an average human observer. Long term flicker severity (P_{lt}) is calculated from successive P_{st}-readings. International standard IEC 61000-4-15 defines the functional and design specifications of the flickermeter.</p> <p>For the master's thesis a method and equipment for calibration of flickermeters is developed. The method is based on reference flickermeter, which is constructed according to the standard as closely as possible. The uncertainty of the flickermeter is estimated and the system is tested by calibrating a commercial power quality analyzer.</p>			
Keywords: power quality, flicker, flickermeter, calibration			

Sisällysluettelo

Alkulause.....	2
Sisällysluettelo.....	5
Käytetyt merkinnät ja lyhenteet	7
1 Johdanto.....	8
2 Välkyntä	9
2.1 Nopeat jännitteenvaihtelut.....	9
2.2 Jännitteenvaihteluiden lähteet	11
2.3 Jännitteen vaihteluiden haitat	12
2.3.1 Vaikutus valaistukseen	12
2.3.2 Muut vaikutukset.....	13
2.4 Vähentämistekniikat.....	13
3 Välkynnän mittaus.....	15
3.1 Välkynnän mittaustekniikan kehitys	15
3.2 Sähkön laatustandardit	17
4 Välkyntämittaristandardi	19
4.1 Rakenne ja toiminta.....	19
4.1.1 Välkynnän havaittavuuden mittaus	20
4.1.2 Tilastollinen käsittely	23
4.2 Tarkkuusvaatimukset.....	26
4.3 Standardin puutteita.....	29
5 Välkyntämittareiden kalibrointimenetelmät.....	31
5.1 Kalibrointi testisignaalin avulla.....	31
5.2 Vertailu referenssimittarin kanssa	32
5.3 Kalibraattori.....	32
6 Kalibrointijärjestelmän toteutus	34
6.1 Käyttöliittymä.....	35
6.2 Kalibrointisignaalin tuottaminen	36
6.3 Jännitteen mittaus	36
6.4 Välkynnän laskentaohjelma	37
6.4.1 Lohko 1.....	38

6.4.2	Lohko 2.....	39
6.4.3	Lohko 3.....	39
6.4.4	Lohko 4.....	42
6.4.5	Näytteenottotaajuuden valinta.....	43
6.4.6	Skaalauskerroin.....	44
6.4.7	Suodattimien asettumisaika.....	45
6.4.8	Tilastollisen käsittelyn toteutus.....	46
6.5	Toiminnan testaus.....	47
6.5.1	Ulostulon 5 vaste.....	47
6.5.2	Tulokset häiritsevyyksille.....	49
6.6	Epävarmuuden arviointi.....	50
6.7	Vaihehyppyjen mittaus.....	51
6.8	Prosessoinnin rajoitukset.....	52
7	Kalibroinnin suorittaminen.....	53
7.1	Suoritettavat mittaukset.....	53
7.2	Testiprotokolla.....	54
7.3	Kokeilu kaupallisen välkyntämittarin kalibrointiin.....	54
8	Pohdinta ja johtopäätökset.....	56
	Lähdeluettelo.....	58
	Liite 1: Kalibrointiohjelman dokumentaatio.....	60

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

E	Lähdejännite
f_c	Suodattimen kulmapistetaajuus
f_n	Verkkotaajuus
f_s	Näytteenottotaajuus
I_O	Kuorman virta
P	Pätöteho
P_{lt}	Välkynnän pitkäaikainen häiritsevyysindeksi
P_{st}	Välkynnän lyhytaikainen häiritsevyysindeksi
Q	Loisteho
R_S	Johdon resistanssi
s	Laplace-muuttuja
U_O	Kuorman jännite
X_S	Johdon reaktanssi
z	z -muuttuja
Z_S	Johdon impedanssi
ΔU	Jännitteen muutos
Φ	Valovirta
τ	Suodattimen aikavakio
ω	Kulmataajuus
AM	Amplitudimodulaatio
GPIB	General Purpose Interface Bus
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
EMC	Electromagnetic compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus
MIKES	Mittatekniikan keskus
NPL	National Physical Laboratory, Iso-Britannia
UIE	International Union of Electroheat

1 Johdanto

Valojen välkyntä on ollut ongelma sähkövalaistuksen alkuajoista lähtien. Välkyntä havaitseminen ja sen häiritsevyys ovat subjektiivisia asioita, ja siksi välkyntämittaus ei ole yksinkertainen tehtävä. Sähkön käytön lisääntyessä ja sähkön laadulle asetettujen vaatimusten kasvaessa myös välkyntämittauksen tarkkuutta ja luotettavuutta on parannettava.

Tämän diplomityön tavoitteena on ollut kehittää menetelmä ja laitteisto välkyntämittareiden kalibroimiseen ja arvioida valitun menetelmän epävarmuus. Työ liittyy Mittatekniikan keskuksen (MIKES) rahoittamaan suurjännitesuureiden kansalliseen mittanormaalitoimintaan.

Tämän työn luvuissa kaksi ja kolme selostetaan välkyntämittareiden syitä, vaikutuksia ja mittauksen perusteita. Välkyntämittarin rakenteen ja toiminnan määrittelee kansainvälinen standardi IEC 61000-4-15, jota esitellään luvussa neljä. Luvussa viisi esitellään käytettävissä olevia menetelmiä välkyntämittareiden kalibroimiseen ja arvioidaan niiden hyviä ja huonoja puolia. Valittu menetelmä perustuu referenssivälkyntämittariin, jonka toteutuksesta ja toiminnan testauksen tuloksista kerrotaan kuudennessa luvussa.

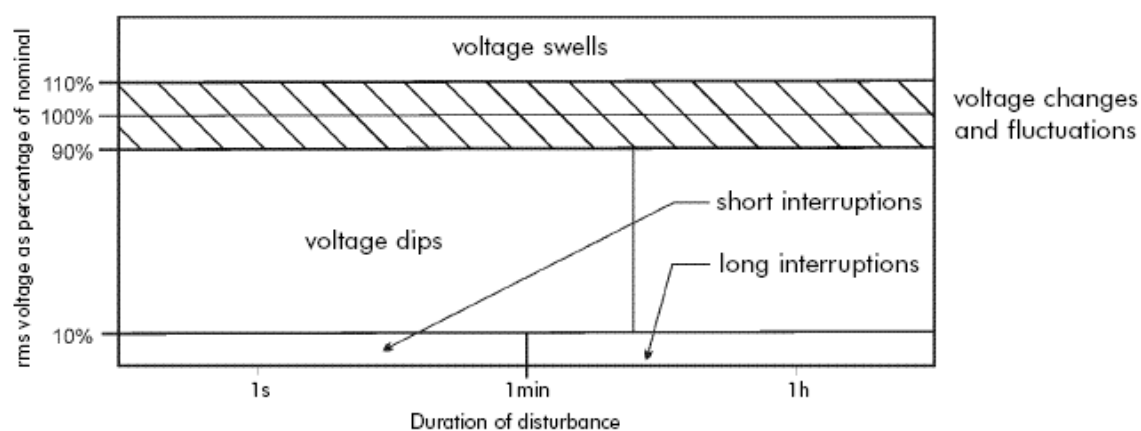
Seitsemännessä luvussa käsitellään välkyntämittareiden kalibrointia varten suoritettavia mittauksia ja mittausten tuloksiin vaikuttavia tekijöitä. Kalibrointijärjestelmän kokeilemiseksi suoritettiin erään kaupallisen sähkönlaatuanalysoijan kalibrointi, jonka tulokset on myös esitetty. Lopuksi kahdeksannessa luvussa pohditaan työn tuloksia ja kalibroinnin kehitysmahdollisuuksia. Liitteenä on vielä järjestelmää varten tehdyt käyttöliittymä- ja laskentaohjelman dokumentaatio.

2 Välkyntä

Määritelmän mukaan välkyntä on näköaistimuksen epävakausta, joka johtuu luminanssiltaan tai spektrijakaumaltaan vaihtelevasta valoärsykkeestä [IEV07]. Sähkövalaistuksen välkyntään syynä on lamppuja syöttävän verkon jännitteen vaihtelu. Tässä luvussa käsitellään lyhyesti jännitteen vaihteluiden syntyä, vaikutuksia ja vähentämistekniikoita.

2.1 Nopeat jännitteenvaihtelut

Jännitteen vaihteluiden luokittelu häiriön keston ja jännitemuutoksen suuruuden mukaan on esitetty kuvassa 1. Välkyntään suhteen oleellinen alue on merkitty kuvaan vinoviivoituksella. Kyseessä ovat siis häiriöt, joissa jännite vaihtelee kymmenen prosentin sisällä normaalin tehollisarvon molemmin puolin.



Kuva 1: Jännitevaihteluiden luokittelu häiriön keston ja jännitemuutoksen suuruuden mukaan [Han06]

Sähköverkon jännite syöttöjohdon siinä päässä, jossa kuorma on, poikkeaa aina jonkin verran lähteen jännitteestä. Tätä havainnollistaa kuva 2, jossa on esitetty syöttöjohdon yksivaiheinen sijaiskytkentä. Yhtälö (1.) osoittaa, kuinka jännite-eron ΔU arvo voidaan johtaa osoitindiagrammista, joka on esitetty kuvassa 3.

$$\frac{E - U_o}{U_o} \approx \frac{\Delta U}{U_o} = R_s \frac{P}{U_o^2} + X_s \frac{Q}{U_o^2} \cong R_s \frac{P}{U_o^2} + \frac{Q}{S_{ZW}} \quad (1.)$$

Yhtälössä E on lähdejännite.

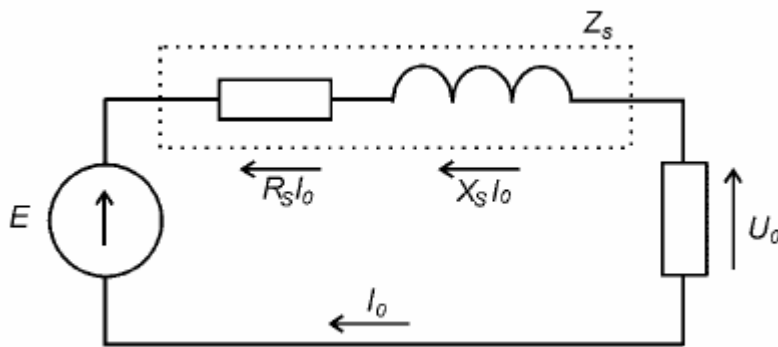
U_o on jännite kuorman navoissa.

I_o on virta.

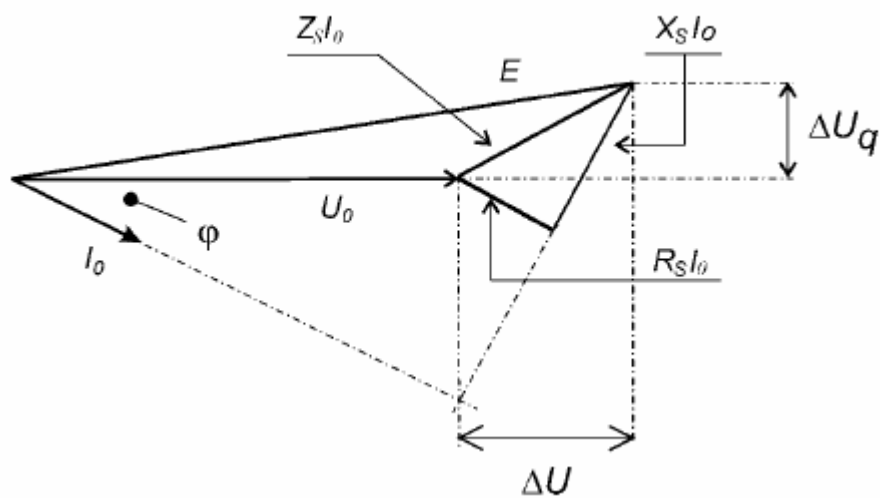
Z_s, X_s, R_s ovat johdon impedanssi, reaktanssi ja resistanssi.

P, Q ovat kuorman pätö- ja loisteho.

S_{ZW} on oikosulkuteho kuorman kytkentäpisteessä.



Kuva 2: Syöttöjohdon yksivaiheinen sijaiskytkentä [Han06]



Kuva 3: Induktiivis-resistiivisen kuorman osoitindiagrammi [Han06]

Jos oletetaan, että johdon resistanssi on pieni verrattuna sen reaktanssiin, mikä pätee käytännön jakeluverkoissa, yhtälö voidaan yksinkertaistaa seuraavaan muotoon:

$$\frac{\Delta U}{U_0} \cong \frac{Q}{S_{zw}}. \quad (2.)$$

Kuorma aiheuttaa jännitteen muutoksen ΔU , joka voi olla vakiona pysyvä jännitehäviö, hidaskuormien jännitteen muutos tai jännitteen vaihtelua. Jännitteen vaihtelu on määritelmän mukaan sarja jännitteen tehollisarvon muutoksia tai jännitteen aaltomuodon verhoikäyrän jaksollista vaihtelua [IEV07].

Jännitteen vaihteluita kuvaavat ominaisuudet ovat amplitudi, eli jännitteen huippu- tai tehollisarvojen maksimin ja minimin erotus, muutosten lukumäärä aikayksikköä kohti sekä vaikutukset, kuten välkyntävoimakkuus. Näiden ominaisuuksien vaikutusta välkyntän havaitsemiseen käsitellään luvussa 3.

2.2 Jännitteenvaihteluiden lähteet

Kuten yhtälöstä (2.) voidaan nähdä, jännitteen muutosten ensisijainen syy on kuorman reaktiivisen tehon heilahtelu. Kuormia, joiden reaktiivinen teho heilahtelee voimakkaasti, ovat esimerkiksi valokaariuunit, valssaamot ja yleisesti kuormat, joiden tehonvaihtelu on suuri verrattuna oikosulkutehoon siinä sähköverkon pisteessä, johon ne on kytketty. On myös huomattava, että pienemmätkin kuormat, kuten moottorit, hitsauskoneet, kuumavesivaraajat, tehonsäätimet, sähkösahat ja -vasarat, pumput, kompressorit, nosturit tai hissit voivat aiheuttaa välkyntää, jos niitä syöttävä verkko on heikko. [Han06]

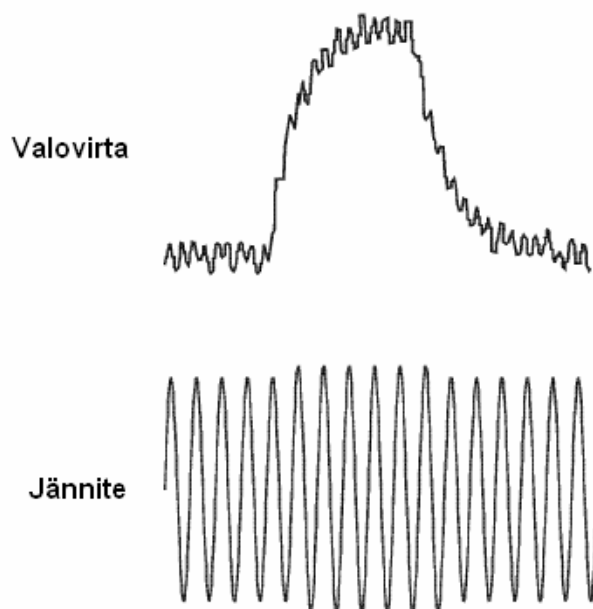
Muita syitä jännitteen vaihteluihin ovat esimerkiksi kondensaattorien kytkennät ja muuntajien käämikytkimien säätö sekä nopeat muutokset esimerkiksi tuuligeneraattorien tuotannossa. Myös jännitteen väliharmoniset (perustaajuuden monikertojen väliset taajuuskomponentit) voivat aiheuttaa välkyntää. [Han06]

2.3 Jännitteen vaihteluiden haitat

Suurin jännitteen vaihteluiden aiheuttama ongelma on valojen välkyntä. Tavallisesti muut sähkölaitteet ovat immuuneja muutaman prosentin jännitteen vaihteluille, jossa valojen välkyntä on jo häiritsevää [UIE91]. Muissakin sähkölaitteissa voi esiintyä häiriöitä, joista kerrotaan tarkemmin luvussa 2.3.2.

2.3.1 Vaikutus valaistukseen

Syöttöjännitteen muutokset vaikuttavat voimakkaasti valonlähteen tuottamaan valovirtaan, mitä havainnollistaa kuva 4. Valovirran vaihtelu huomataan välkyntänä. Erityisesti hehkulamput ovat herkkiä syöttöjännitteen vaihtelulle, sillä valovirta Φ on verrannollinen syöttöjännitteeseen suhteessa $\Phi \cong U^y$, jossa eksponentti y vaihtelee tyypillisesti välillä 3,1 – 3,7. Loistelampuille eksponentti y on tyypillisesti pienempi, noin 1,8. [Han06]



Kuva 4: Jännitteen vaikutus lampun valovirtaan [Han06]

Välkyntä häiritsee ihmisen keskittymistä työhön ja heikentää viihtyvyyttä. Jatkuva välkyntälle altistuminen on väsyttävää. Se voi olla myös todellinen turvallisuusriski esimerkiksi silloin, kun työskennellään pyörivien koneiden kanssa. Välkyntä saattaa tällöin estää havaitsemasta koneiden liikettä.

2.3.2 Muut vaikutukset

Jännitteen heilahteluilla on muitakin haitallisia vaikutuksia, jotka saattavat aiheuttaa häiriöitä tuotantoprosesseissa ja siten lisätä kustannuksia. Vaihteluiden amplitudin täytyy kuitenkin olla melko suuri verrattuna siihen vaihteluun, mikä jo vaikuttaa valaistukseen. Oikosulkumoottoreissa jännitteen vaihtelu aiheuttaa muutoksia vääntömomenttiin ja jättämään. Pahimmassa tapauksessa ne voivat lisätä värähtelyjä, jotka heikentävät moottoreiden mekaanista kestävyyttä ja lyhentävät niiden käyttöikä. Tahtikoneissa jännitteen vaihtelut aiheuttavat huojuntaa ja ennen aikaista roottorien kulumista, muuttavat vääntömomenttia ja tehoa sekä lisäävät häviöitä. Vaiheohjatuissa tasasuuntaajissa jännitteen vaihtelut pienentävät tehokerrointa ja synnyttävät epätyypillisiä harmonisia ja väliharmonisia jännitteitä. Vaihtosuuntaajakäytössä jarrutuksessa jännitteen vaihtelu saattaa aiheuttaa kommutointivirheen, joka voi vaurioittaa komponentteja. Elektrolyysilaitteistojen tehokkuus ja käyttöikä voivat kärsiä jännitteen vaihteluista. Kaikenlaisten sähkölämmityslaitteiden toiminnallinen tehokkuus pienenee, jos jännite heilahtelee voimakkaasti; esimerkiksi valokaariuuneissa sulatusajat pitenevät. [Han06]

2.4 Vähentämistekniikat

Kuten yhtälöstä (2.) voidaan päätellä, jännitteen vaihteluiden amplitudia on mahdollista pienentää kahdella tavalla: kasvattamalla oikosulkutehoa suhteessa kuorman tehoon, tai pienentämällä reaktiivisen tehon muutoksia.

Oikosulkutehon kasvattaminen voidaan toteuttaa esimerkiksi kytkemällä kuorma korkeammalle jännitetasolle, vaihtamalla ongelmallista kuormaa syöttävä muuntaja isompitehoiseen, asentamalla sarjakondensaattoreita tai syöttämällä ongelmia

aiheuttavat kuormat erillisten linjojen kautta. Ongelmallisten kuormien syöttö voidaan myös erottaa muista kuormista käyttämällä muuntajan eri käämityksiä. Reaktiivisen tehon muutoksia voidaan pienentää asentamalla syöttöverkkoon dynaamisia kompensattoreita. [Mor02]

3 Välkynnän mittaus

Välkynnän havaitseminen on subjektiivinen ilmiö, ja siksi välkynnän mittaaminen on melko monimutkainen tehtävä. Tässä luvussa kerrotaan välkynnän mittaustekniikan kehityksestä ja nykyisistä sähkön laatustandardeista.

Välkyntämittauksia tehdään kahta tarkoitusta varten. Ensimmäinen on verkkojännitteen laadun tarkkailu. Mittaamalla jännitteen vaihteluita voidaan verrata välkynnän tasoa standardien määrittelemiin suositusarvoihin. Toinen välkyntämittausten tarkoitus on mitata uuden sähkölaitteen häiriönpäästöä tyyppi hyväksyntää varten.

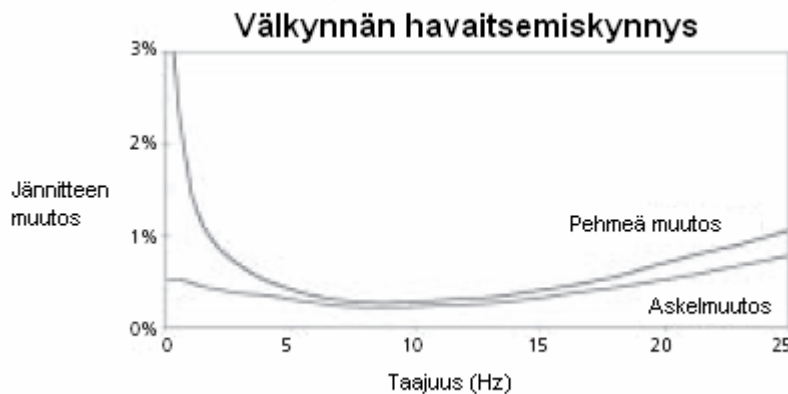
3.1 Välkynnän mittaustekniikan kehitys

Sähkövalojen välkyntä oli tärkeä kysymys jo heti sähköverkkojen perustamisen aikoihin, jolloin tehtiin valintaa tasa- ja vaihtosähkön käytön välillä. Vaihtosähkö tuli käyttöön sähköverkoissa maailmanlaajuisesti, ja vaihtovirran taajuus piti valita tarpeeksi suureksi, jotta hehkulamppujen valo ei välkkyisi virran suunnan vaihdellessa. Tarpeeksi suureksi taajuudeksi todettiin 50 hertsiä. Amerikassa ja joillakin muilla alueilla otettiin käyttöön 60 hertsin taajuus.

Sähköverkkojen käytön alkuaikoina mittaus- ja analysointityökalut olivat alkeellisia. Koska välkyntä oli yleinen ongelma, insinöörit kehittivät kokemukseen perustuvia ohjeita siitä, kuinka suuret jännitteen vaihtelut olivat siedettäviä ja kuinka suuret vastaavasti aiheuttivat valituksia. Nykyään tärkeimmät parametrit jännitteen vaihteluiden kuvaamiseksi ovat lyhyen ja pitkän ajan välkynnän häiritsevyyssindeksit P_{st} ja P_{lt} . Nämä parametrit kuvaavat valaistuksen välkynnän häiritsevyyttä ihmisten kannalta. [Han06]

Välkynnän havaittavuuteen ja ärsyttävyyteen vaikuttavat lampun ominaisuudet ja ihmisen silmän ja aivojen havaitsemisprosessi. Välkynnän havaitsemisprosessin tutkimukset aloitettiin yli neljäkymmentä vuotta sitten. Niissä valitulle joukolla ihmisiä näytettiin eri taajuuksilla ja voimakkuuksilla välkkyviä valoja, ja heidän reaktioitaan

verrattiin jännitteen vaihteluihin, joilla valojen välkyntä oli tuotettu. Kokeiden perusteella pystyttiin laatimaan kuvan 5 mukaiset käyrät välkyntän havaitsemiskynnyksille. Käyrien alapuolella välkyntä on niin pientä, että suurin osa ihmisistä ei pysty sitä havaitsemaan. Käyrien yläpuolella jännitteen muutokset vastaavasti aiheuttavat havaittavaa välkyntää.



Kuva 5: Välkyntän havaitsemiskynnys [BCH05]

Tutkijat Rashbass, Koenderink, van Doorn ja de Lange kehittivät tutkimusten pohjalta matemaattisia malleja, joilla voidaan simuloida lamppu-silmä-aivot -ketjun toimintaa. Mallien avulla välkyntän havaittavuus voidaan mitata suoraan jännitteestä. Tutkimukset osoittavat ihmisen silmän ominaisuuksien vastaavan kaistanpäästösodatinta, jonka päästökaista on noin 0,5 – 35 Hz ja suurin herkkyys valaistusvoimakkuuden vaihteluille on taajuudella 8 –10 Hz. Hehkulamppujen välkyntä havaitaan tällä taajuudella jo 0,3 % jännitteen vaihteluilla. Välkyntän fysiologiset vaikutukset riippuvat häiriön amplitudista, taajuusspektristä ja kestosta. Aivoilla on välkyntän tason muutoksissa muistivaikutus, joka vastaa alipäästösodatinta, jonka aikavakio on 300 ms. Välkyntä on ärsyttävämpää näkökentän laidoilla kuin keskellä. [Han05]

Edellä mainittujen tutkijoiden mallien pohjalta International Union of Electroheat kehitti UIE-välkyntämittarin. Ennen UIE:n mittaria kansallisia malleja välkyntämittarista oli kehitetty jo ainakin Isossa-Britanniassa, Ranskassa, Saksassa ja Japanissa. Niissä oli paljon samoja ominaisuuksia, mutta niiden vertailu osoitti, että standardisoidun mittalaitteen luomiseksi oli tehtävä tiettyjä perustavia päätöksiä. [UIE91]

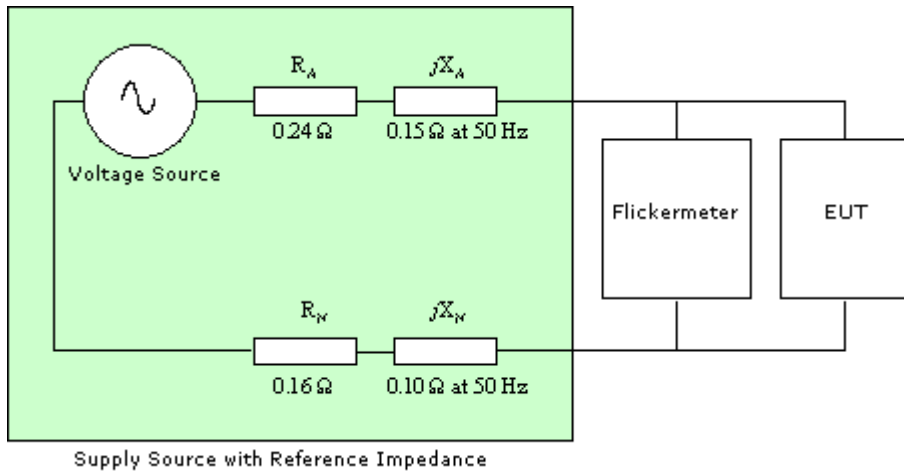
Kansainvälinen sähkötekniikan standardointijärjestö IEC teki välkyntämittarista standardin IEC 868 vuonna 1986. Sen korvasi vuonna 1997 standardi IEC 61000-4-15, joka on vuonna 2003 tehtyine lisäyksineen voimassa myös Amerikassa.

3.2 Sähkön laatustandardit

Kansainvälinen standardi IEC 61000-3-3 määrittelee rajat sallituille jännitteen vaihteluille ja välkynnälle sähkönjakeluverkoissa, joissa nimellisvirta vaihetta kohti on korkeintaan 16 ampeeria. Välkynnän rajat määritellään häiritsevyyksien P_{st} ja P_{lt} avulla ja niiden mittaus suoritetaan välkyntämittarilla. [NPL07]

Standardi IEC 61000-3-3 määrittelee myös sallitut rajat sähköverkkoon liitettävien laitteiden aiheuttamille jännitteen vaihteluille. Standardi vaatii, että uusille sähkölaitteille täytyy tehdä tyyppitesti, joka osoittaa, että laitteet täyttävät standardin vaatimukset. Testissä laitetta käytetään normaalisti, mitataan sen toiminnan aiheuttama välkyntä välkyntämittarilla ja verrataan lukemia standardin määrittelemiin raja-arvoihin.

Mittauksessa on tärkeää, että lähteen referenssi-impedanssi on oikean suuruinen. Sen arvo on määrätty siten, että se vastaa normaalin sähköverkon impedanssia. Referenssi-impedanssin suuruus vaikuttaa välkynnän amplitudiin, ja siksi virhe impedanssin arvossa aiheuttaa virheen laitteen tuottaman välkynnän mittauksessa.



Kuva 6: Sähkölaitteiden EMC-testauksen kaaviokuva, jossa vihreällä pohjalla on jännitelähde ja referenssi-impedanssit ja oikealla testattava laite EUT [NPL07]

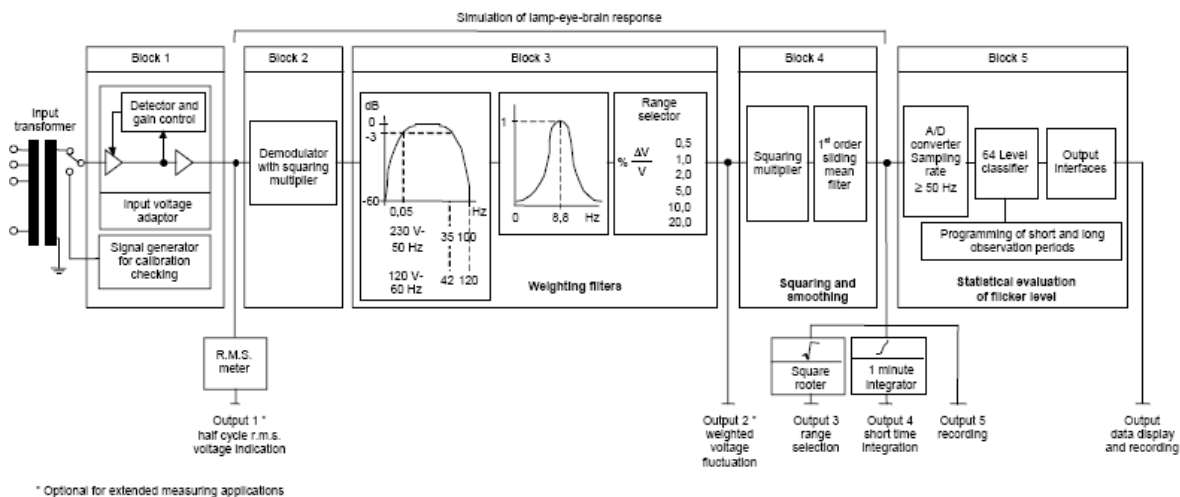
Vastaavasti nimellisvirraltaan yli 16 ampeerin järjestelmien välkynnän raja-arvoille on standardi IEC 61000-3-5.

4 Välkymittaristandardi

Välkymittaria käytetään mittaamaan jännitteen vaihteluita, jotka aiheuttavat havaittavia muutoksia sähköisten valonlähteiden tuottamassa valossa. Välkymittarin tarkoitus on määrittää välkynnän voimakkuus mittaamalla jännitteen vaihteluita ja siten ennustamalla niiden aiheuttama ärsytystaso. Ennustaminen perustuu hehkulampun, ihmisen silmän ja aivojen toiminnan tuntemiseen. Välkymittarin suunnittelu- ja toimintamäärittely on kirjattu standardiin IEC 61000-4-15 [IEC03]. Tämän standardin mukaista välkymittaria nimitetään IEC- tai UIE- välkymittariksi. Alkuperäinen välkymittari suunniteltiin käytettäväksi 230 voltin ja 50 hertsin verkoissa. Myöhemmin standardiin on lisätty määritykset muutoksille, jotka tekevät mahdolliseksi mittarin käytön myös 120 voltin ja 60 hertsin verkoissa. Standardin ohjeet on määritelty analogiselle mittalaitteelle. Erityisiä muuttujia välkymittarin digitaaliselle toteutukselle ei ole standardissa annettu.

4.1 Rakenne ja toiminta

Standardin IEC 61000-4-15 [IEC03] mukaisen välkymittarin lohkokaavio on esitetty kuvassa 7. Tässä luvussa esitellään kunkin lohkon toiminta.



Kuva 7: IEC-välkymittarin lohkokaavio [IEC03]

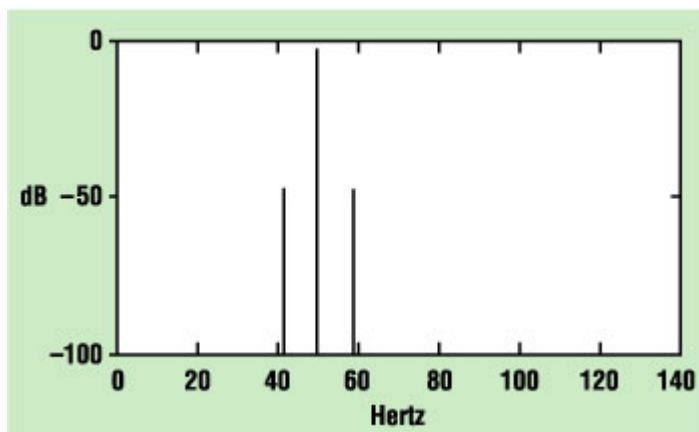
Läheinen tarkastelu paljastaa, että välkymittari on eräänlainen erikoistunut amplitudimoduloidun signaalin vastaanotin. Mitattavassa jännitteessä normaali

verkkajännite toimii kanta-aaltona. Sen amplitudia moduloi välkyntäsignaali, jonka taajuus ja amplitudi määräytyvät verkkoon liitettyjen kuormien toiminnan mukaan.

4.1.1 Välkyntän havaittavuuden mittaaminen

Ensimmäisen lohkon tehtävä on laskea jännitteen referenssiarvo ja skaalata mitattu signaali siihen. Näin välkyntämittaus voidaan tehdä riippumatta ottojännitteen tehollisarvosta. Jännitteen hidas muutos ei vaikuta mittaustulokseen. Ensimmäiseen lohkoon kuuluu myös signaaligeneraattori, jonka avulla laite voidaan kalibroida mittaustaikalla.

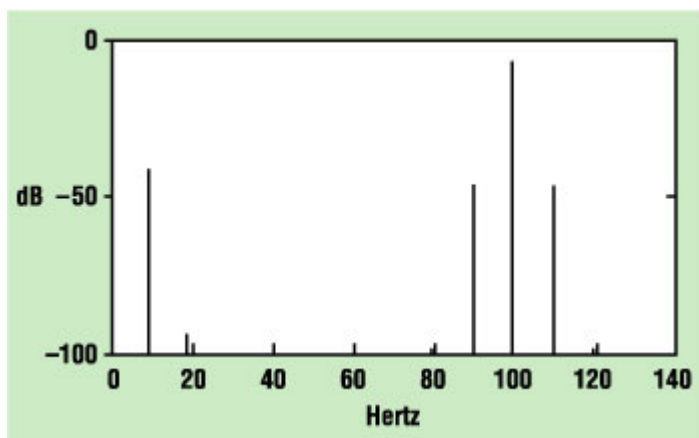
Toisessa lohkossa signaali neliöidään. Tämä simuloi lampun toimintaa. Neliöimällä signaalista saadaan esiin moduloiva taajuus, ja kanta-aalto voidaan suodattaa pois. Tämä on helpointa selittää taajuusalueessa. Alkuperäisessä signaalissa on kanta-aallon taajuuskomponentti ja sen ympärillä molemmiin puolin moduloivan signaalin taajuuskomponentit. Alkuperäisen signaalin spektri on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8: Signaalin spektri, jossa näkyy kanta-aallon taajuuskomponentti 50 Hz kohdalla, sekä 9 Hz modulaation aiheuttamat taajuuskomponentit sen molemmiin puolin [McK99]

Neliöintioperaatiossa kanta-aallon taajuus kaksinkertaistuu. Lisäksi operaatiossa syntyy tasajännitekomponentti ja moduloivan taajuuden aiheuttamat komponentit sekä tasajännitekomponentin että kaksinkertaisen kanta-aallon taajuuden ympärille. Signaalin

spektri neliöinnin jälkeen on esitetty kuvassa 9. Siitä havaitaan, että moduloiva signaali on nyt mahdollista saada esiin suodattamalla.



Kuva 9: Signaalin spektrissä neliöinnin jälkeen näkyy tasajännitekomponentti, kaksinkertaisen kantaallon taajuuden komponentti ja moduloivan signaalin aiheuttamat komponentit niiden ympärillä. [McK99]

Kolmas lohko sisältää kolme suodatinta, joiden tehtävänä on suodattaa alkuperäinen moduloiva signaali esiin ja painottaa sitä tavalla, joka vastaa ihmisen silmän toimintaa. Ensimmäinen on ensimmäisen asteen ylipäästösuodatin, jonka kulmapistetaajuus on 0,05 Hz. Sen tehtävänä on suodattaa signaalista ainoastaan siihen neliöinnin seurauksena syntyneet tasajännitekomponentti ja päästää muut taajuudet läpi.

Toinen suodatin on kuudennen asteen Butterworth-alipäästösuodatin. Sen kulmapistetaajuus on 230 voltin ja 50 hertsin verkon toteutuksessa 35 hertsiä ja 120 voltin ja 60 hertsin verkon toteutuksessa 42 hertsiä. Alipäästösuodatin poistaa signaalista kaksinkertaisen kantaallon taajuuden ja sen molemmiin puolin olevat moduloivan signaalin aiheuttamat taajuuskomponentit. Näin ylipäästösuodattimen ja Butterworth-alipäästösuodattimen jälkeen signaalista on jäljellä enää kiinnostava taajuusalue 0,05 – 35 Hz.

Kolmas suodatin on erityinen kaistanpäästösuodatin, jonka päästökaistan huippu on 8,8 hertsin taajuudella. Suodattimen amplitudivastekäyrän muoto on määritelty koehenkilöillä tehtyjen välkynnän havaittavuuskokeiden perusteella, kuten luvussa 3.1 selostettiin. Tämän painotussuodattimen siirtofunktio on

$$F_W(s) = \frac{\kappa \omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \times \frac{1 + s/\omega_2}{\left(1 + s/\omega_3\right)\left(1 + s/\omega_4\right)}. \quad (3.)$$

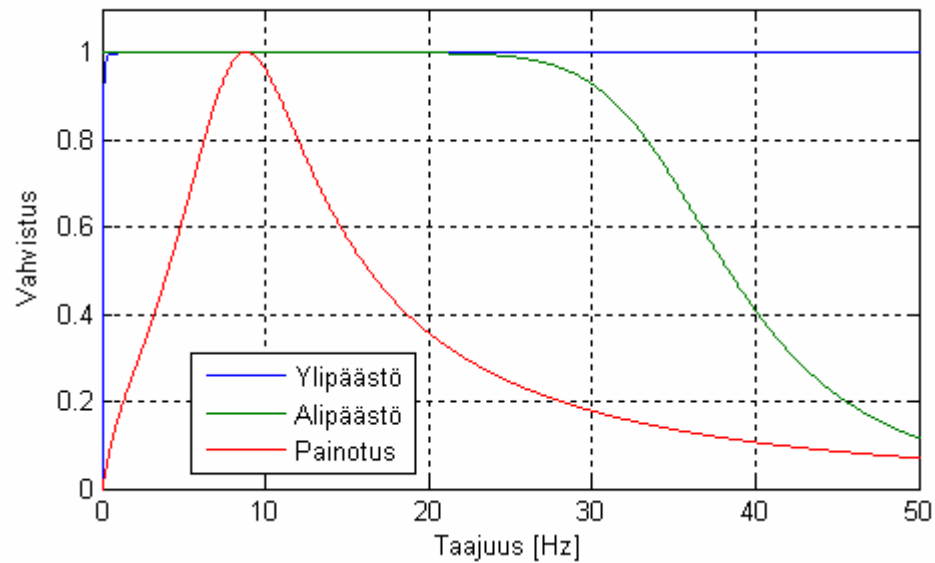
Kaavan (3.) vakioiden arvot on annettu taulukossa 1.

Taulukko 1: Painotussuodattimen siirtofunktion vakiot

Muuttuja	230 V, 50 Hz järjestelmä	120 V, 60 Hz järjestelmä
κ	1,74802	1,6357
λ	$2 \cdot \pi \cdot 4,05981$	$2 \cdot \pi \cdot 4,167375$
ω_1	$2 \cdot \pi \cdot 9,15494$	$2 \cdot \pi \cdot 9,077169$
ω_2	$2 \cdot \pi \cdot 2,27979$	$2 \cdot \pi \cdot 2,939902$
ω_3	$2 \cdot \pi \cdot 1,22535$	$2 \cdot \pi \cdot 1,394468$
ω_4	$2 \cdot \pi \cdot 21,9$	$2 \cdot \pi \cdot 17,31512$

Kuva 10 esittää lohkon 3 suodattimien amplitudivasteet 230 voltin ja 50 hertsin verkon toteutuksessa. Kuvasta nähdään, että 8,8 hertsin taajuuskomponentti pääsee lohkon 3 läpi sellaisenaan, kun taas sitä suuremmat ja pienemmät taajuudet vaimenevat voimakkaasti.

Kolmanteen lohkoon kuuluu myös mittausalueen valitsin, jolla voidaan säätää lohkon vahvistusta sen mukaan, miten suuri jännitteen vaihtelun amplitudi on. Vahvistuksen säätöä ei tarvita, jos viidennen lohkon tilastollisen käsittelyn erottelukyky on riittävän suuri. Tästä aiheesta kerrotaan lisää luvussa 4.1.2.



Kuva 10: Lohkon 3 suodattimien amplitudivasteet 230 V ja 50 Hz verkon mittaritoteutuksessa

Neljännessä lohossa signaali neliöidään jälleen ja suodatetaan alipäästösuodattimella, jonka aikavakio on 300 ms. Alipäästösuodatin simuloi aivojen muistiominaisuutta välkynnän havaitsemisessa. Muisti-ilmiön vaikutuksesta alle 300 ms sisällä tapahtuneet useat välkyntätason muutokset havaitaan yhtenä. Neljännen lohkon ulostulon (ulostulo 5) arvo on verrannollinen jännitemuutoksen neliöön ja vastaa hetkellistä välkynnän havaittavuutta. [CCU04]

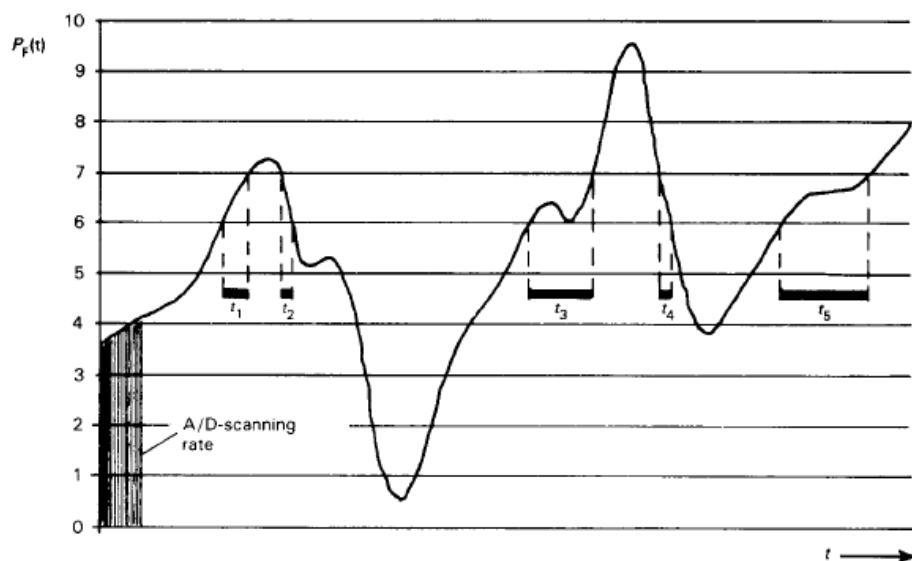
4.1.2 Tilastollinen käsittely

Välkynnän havaittavuuskyyrät voivat olla hyvin erilaisia erityyppisten kuormien vaikutuksesta. Jotkut kuormat aiheuttavat voimakasta välkyntää lyhyissä jaksoissa, kun taas toiset voivat aiheuttaa jatkuvaa lievää välkyntää. Jotta välkynnän häiritsevyys voitaisiin arvioida sen aiheuttajasta riippumatta, täytyy mittaustulosta käsitellä sopivan pituisissa jaksoissa tilastollisesti. Sopivaksi ajanjaksoksi on arvioitu kymmenen minuuttia. [UIE91]

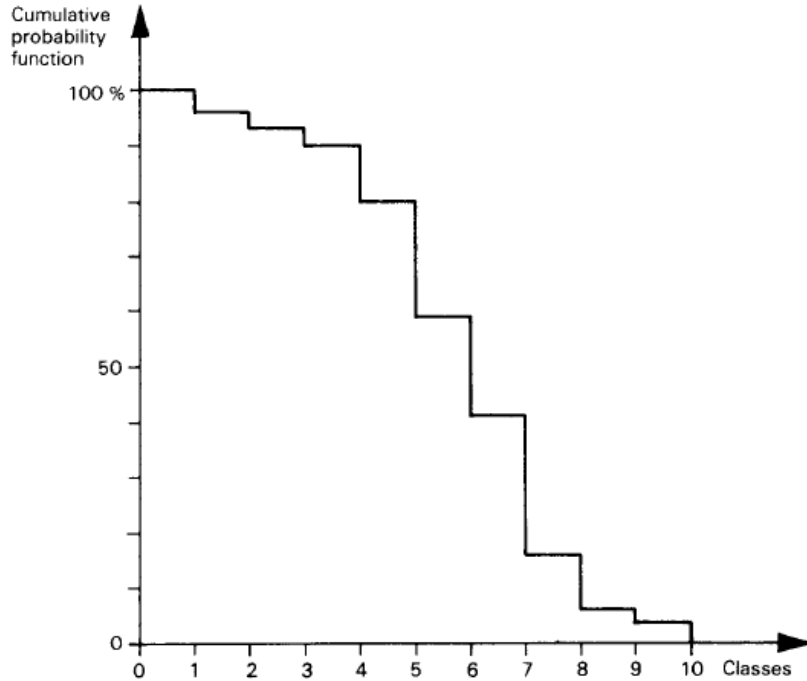
Tilastollinen analyysi suoritetaan viidennessä lohossa. Standardin mukaan ulostulon 5 analogisesta signaalista (hetkellinen välkynnän havaittavuusarvo) otetaan vähintään 50

näytettä sekunnissa ja muunnetaan ne digitaaliseen muotoon vähintään kuuden bitin resoluutiolla. Näytteet luokitellaan suuruutensa mukaan vähintään 64 luokkaan.

Seuraavissa standardista lainatuissa kuvissa (kuvat 11 ja 12) havainnollistetaan tilastollista menetelmää. Selkeyden vuoksi kuvissa on käytetty vain kymmentä luokkaa. Näytteiden määrä kussakin luokassa lasketaan ja niistä muodostetaan kumulatiivinen todennäköisyysjakauma. Jakaumasta etsitään välkyntätasot, jotka tietyt osuudet näytteistä ylittävät. Tasot on valittu siten, että ne kuvaavat parhaiten kumulatiivisen todennäköisyysjakaumakäyrän muotoa.



Kuva 11: Välkyntän havaittavuus ajan funktiona esimerkkitapauksessa [IEC03]



Kuva 12: Kuvan 11 esittämän välkynnän kumulatiivinen todennäköisyysjakauma [IEC03]

Välkynnän lyhytaikainen häiritsevyysindeksi P_{st} lasketaan kaavasta

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_{1s} + 0,0657P_{3s} + 0,28P_{10s} + 0,08P_{50s}} \quad (4.)$$

Prosenttipisteet $P_{0,1}$, P_1 , P_3 , P_{10} ja P_{50} tarkoittavat hetkellisen välkynnän havaittavuuden arvoja, jotka ylittyvät 0,1; 1; 3; 10 ja 50 prosentissa tarkasteluajan näytteistä. Kirjain s tarkoittaa tässä tasoitettua arvoa, jotka saadaan seuraavista kaavoista:

$$P_{1s} = \frac{(P_{0,7} + P_1 + P_{1,5})}{3},$$

$$P_{3s} = \frac{(P_{2,2} + P_3 + P_4)}{3},$$

$$P_{10s} = \frac{(P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})}{5} \text{ ja}$$

$$P_{50s} = \frac{(P_{30} + P_{50} + P_{80})}{3}.$$

Neljännän lohkon 0,3 sekunnin aikavakio varmistaa, ettei $P_{0,1}$ voi muuttua äkillisesti, ja siksi tälle prosenttipisteelle ei tarvita tasoitusta. [UIE91]

Kymmenen minuutin arviointijakso on todettu sopivaksi mittaamaan yksittäisten välkynnän lähteiden vaikutusta. Tapauksissa, joissa kuorman toimintasykli on pitkä, tai vaikuttamassa on useita satunnaisesti vaihtelevalla teholla toimivia kuormia, on syytä arvioida välkynnän häiritsevyyttä pidemmän ajan indeksillä [UIE91]. Pitkän ajan välkynnän häiritsevyyksindeksi lasketaan kaavalla

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N P_{sti}^3}{N}}, \quad (5.)$$

jossa P_{sti} ($i = 1, 2, 3, \dots$) tarkoittaa peräkkäisiä lyhyen ajan häiritsevyyksindeksejä P_{st} . [IEC03]

Tilastollisen analyysin tarkkuuden parantamiseksi on esitetty standardissa muutamia keinoja. Jos prosenttipisteet eivät osu tasan luokkien raja-arvoihin, ne voidaan määrittää interpoloimalla. Interpolointi voidaan tehdä joko lineaarisesti tai epälineaaraisesti. Luokkien rajojen jakaminen logaritmisesti pienentää suhteellista virhettä sijoiteltaessa näytepisteitä luokkiin. [IEC03]

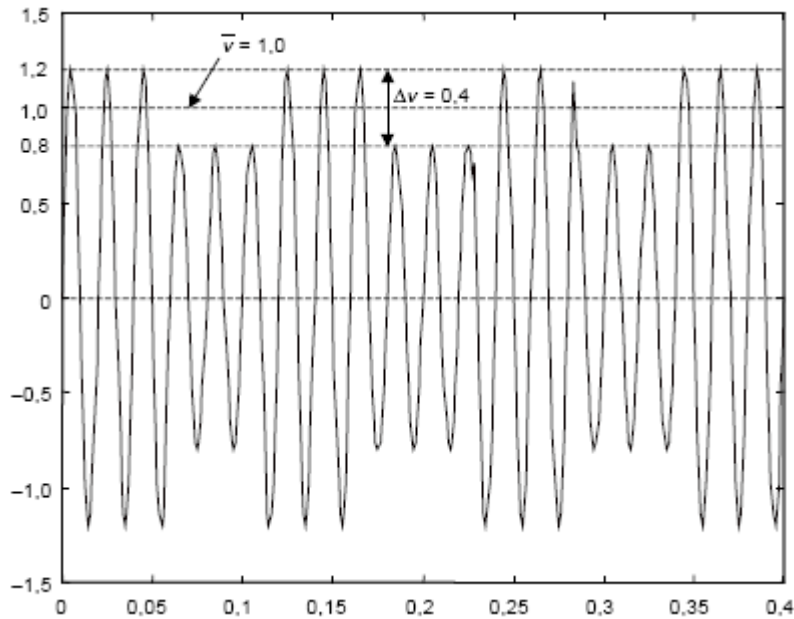
4.2 Tarkkuusvaatimukset

Standardin mukaan ulostulon 5 (hetkellinen välkynnän havaittavuus) maksimiarvon tulisi olla 1 taulukossa 2 mainituilla modulaatiotaajuuksilla ja niitä vastaavilla jännitteenvaihteluilla. Arvo 1 vastaa ihmisen havaitsemiskynnystä.

Jännitteenvaihteluiden suuruudet on määrätty sinimuotoisille ja suorakulmaisille modulaatioille. Ulostulon arvo 1 tulee saavuttaa jännitteenvaihteluiden arvoilla, jotka ovat $\pm 5\%$ sisällä taulukon arvoista. Jännitteenvaihteluiden amplitudi määritellään prosentteina verkkojännitteen amplitudista kuvan 13 havainnollistamalla tavalla.

Taulukko 2: Jännitteenvaihtelut, joilla ulostulon 5 maksimiarvon tulee olla yksi [IEC03]

Mod. taajuus	Jännitteenmuutos $\Delta V/V$ (%)				Mod. taajuus	Jännitteenmuutos $\Delta V/V$ (%)			
	Sinimuotoinen modulaatio		Suorakulmainen modulaatio			Sinimuotoinen modulaatio		Suorakulmainen modulaatio	
f_{mod}	230 V, 50 Hz	120 V, 60 Hz	230 V, 50 Hz	120 V, 60 Hz	f_{mod}	230 V, 50 Hz	120 V, 60 Hz	230 V, 50 Hz	120 V, 60 Hz
0,5	2,340	2,457	0,514	0,600	10,5	0,270	0,355	0,213	0,280
1,0	1,432	1,463	0,471	0,547	11,0	0,282	0,374	0,223	0,297
1,5	1,080	1,124	0,432	0,504	11,5	0,296	0,394	0,234	0,309
2,0	0,882	0,940	0,401	0,471	12,0	0,312	0,420	0,246	0,323
2,5	0,754	0,814	0,374	0,439	13,0	0,348	0,470	0,275	0,369
3,0	0,654	0,716	0,355	0,421	14,0	0,388	0,530	0,308	0,411
3,5	0,568	0,636	0,345	0,407	15,0	0,432	0,593	0,344	0,459
4,0	0,500	0,569	0,333	0,394	16,0	0,480	0,662	0,376	0,513
4,5	0,446	0,514	0,316	0,371	17,0	0,530	0,737	0,413	0,580
5,0	0,398	0,465	0,293	0,349	18,0	0,584	0,815	0,452	0,632
5,5	0,360	0,426	0,269	0,323	19,0	0,640	0,897	0,498	0,692
6,0	0,328	0,393	0,249	0,302	20,0	0,700	0,981	0,546	0,752
6,5	0,300	0,366	0,231	0,282	21,0	0,760	1,071	0,586	0,818
7,0	0,280	0,346	0,217	0,269	22,0	0,824	1,164	0,604	0,853
7,5	0,266	0,332	0,207	0,258	23,0	0,890	1,262	0,680	0,946
8,0	0,256	0,323	0,201	0,255	24,0	0,962	1,365	0,743	1,072
8,8	0,250	0,321	0,199	0,253	25,0	1,042	1,472	-	-
9,5	0,254	0,330	0,200	0,257	33,33	2,130	-	1,67	-
10,0	0,260	0,339	0,205	0,264	40,0	-	4,424	-	3,46



Kuva 13: Suorakulmainen jännitteenmuutos, $\Delta V/V = 40\%$; 8,8 Hz; 17,6 muutosta minuutissa [IEC03]

Häiritsevyyssindeksin laskennan testaamiseksi standardissa on määritelty myös suorakulmaisen modulaation taajuuudet ja niitä vastaavat jännitteenmuutokset, joilla häiritsevyyssindeksin P_{st} tulee olla yksi. Nämä arvot ovat taulukossa 3. Mitattu P_{st} -arvo saa poiketa arvosta 1 viisi prosenttia suuntaan tai toiseen.

P_{st} -mittauksen tulee olla lineaarinen siten, että jännitemuutoksen amplitudin kasvaessa tietyllä kertoimella myös P_{st} -lukeman pitää kasvaa samalla kertoimella.

Välkyntämittarin valmistajan tulee ilmoittaa, millä alueella mittari toimii lineaarisesti.

Taulukko 3: Jännitteenvaihtelut, joilla välkyntä häiritsevyyksensä P_{st} tulee olla yksi [IEC03]

Muutoksia minuutissa	Modulaatio- taajuus [Hz]	Jännitteenmuutos $\Delta V/V\%$	
		230 V, 50 Hz	120 V, 60 Hz
1	$8,333 \cdot 10^{-3}$	2,724	3,166
2	$16,67 \cdot 10^{-3}$	2,211	2,568
7	$58,33 \cdot 10^{-3}$	1,459	1,695
39	0,3250	0,906	1,044
110	0,9167	0,725	0,841
1620	13,50	0,402	0,547
4000	33,33	2,40	-
4800	40,00	-	4,834

4.3 Standardin puutteita

Välkyntämittarin standardissa on muutamia puutteita ja epäselvyyksiä, jotka vaikeuttavat välkyntämittarin suunnittelua mahdollisimman tarkasti standardin mukaiseksi. Ehkä suurin puute on se, että standardista puuttuvat kokonaan määrittäykset välkyntämittarin digitaaliselle toteutukselle. Tämä antaa tietysti suunnitteluun vapautta, mutta aiheuttaa myös hajontaa mittaustuloksissa. Kaupallisten välkyntämittarien testit ovat osoittaneet, että eri mittarit saavat antaa huomattavasti toisistaan poikkeavia tuloksia mitatessaan samoja testisignaaleja. Näin voi olla siitä huolimatta, että testatut mittarit täyttävät standardin vaatimukset. Epävarmuuksia mittaustuloksiin aiheuttavat erityisesti jännitekuopat ja vaihehyyt. [Han03], [Kop01]

Kalibroinnin kannalta hankala asia on se, että standardin suunnitteluohjeiden ideaalisellakaan toteutuksella välkyntämittari ei näytä täsmälleen arvoa 1 taulukoiden 2 ja 3 määrittämällä signaaleilla. Ideaalinen suunnitteluohjeiden mukainen mittari kyllä läpäisee viiden prosentin tarkkuusvaatimukset, mutta ongelmaksi muodostuu se, ovatko suunnitteluohjeet vai taulukot määräävämpiä. [CCU04]

Häiritsevyyksensä laskenta ei ole jännitteenmuutosten amplitudin suhteen lineaarinen. Tämä johtuu siitä, että mitattavan jännitteen tehollisarvo riippuu jännitteen

vaihtelun amplitudista. Se, kumpaan suuntaan amplitudi vaikuttaa, riippuu modulaation taajuudesta. Tämä asettaa kyseenalaiseksi vaatimuksen välkyntämittarin toiminnan lineaarisuudesta. [Gut07]

Standardissa referenssilamppuna on 60 watin hehkulamppu. Se valittiin aikoinaan referenssiksi, koska se oli yleisesti käytössä ja herkkä jännitteen vaihteluille. Nykyisin loistelamput ja muut uudet lampputyypit ovat laajalti syrjäyttäneet hehkulamput, joille kaavaillaan jopa myyntikieltoa energiansäästösyistä. Välkyntämittari ei siis arvioi välkyntänsä havaittavuutta oikein, kun käytössä on uusia lampputyyppejä. Pääasiassa ne ovat vähemmän herkkiä jännitteen vaihteluille, mutta tietyt häiriöt, esimerkiksi suuritaajuiset väliharmoniset, saattavat aiheuttaa välkyntää loistelampuissa. Tutkimuksissa on todettu, että nykyisen standardin mukaisen välkyntämittarin kyky mitata yli 102 hertsin taajuuksien väliharmonisten aiheuttamaa välkyntää on heikko. [Wil05], [Hal03]

5 Välkyntämittareiden kalibrointimenetelmät

Tässä luvussa käsitellään mahdollisia menetelmiä välkyntämittareiden kalibrointiin. Välkyntämittareiden kalibrointiin on mahdollista käyttää kolmea menetelmää, jotka ovat kalibrointi testisignaalin avulla, vertailu referenssimittarin kanssa ja vaihtelevatehoista kuormaa mallintavan kalibraattorin käyttö.

5.1 Kalibrointi testisignaalin avulla

Signaalia voidaan käyttää välkyntämittareiden kalibroimiseen silloin, kun välkyntämittarin oikea vaste kyseisen muotoiselle signaalille on tunnettu tai laskettavissa. Vaste sinimuotoisille ja suorakulmaisille modulaatioille on määritetty standardissa IEC 61000-4-15. Kalibrointi on helpointa toteuttaa tuottamalla suorakaideaallolla moduloitua sinisignaalia. Tällöin signaalilla on kaksi tehollisarvon tasoa, jotka vaihtelevat modulaatiosignaalin taajuudella. Kun modulaatio on hidasta, voidaan jännitetasot mitata tarkasti aika-alueessa. Kun moduloivan signaalin taajuus on suuri, joudutaan jännitetasot laskemaan taajuustason analyysin perusteella. Tätä menetelmää ovat kehittäneet esimerkiksi National Physical Laboratory [NPL07] ja National Measurement Institute Australia [Bud05].

Yksinkertainen suorakulmaisella signaalilla moduloitu sinisignaali vastaa hyvin tavallisia kuormien kytkennöistä johtuvia jännitteen vaihteluita. Käytännössä sähköverkoissa esiintyvät jännitteen vaihtelut ovat kuitenkin huomattavasti monimutkaisempia kuin suorakulmainen ja sinimuotoinen modulaatio.

Monimutkaisempien jännitteen vaihteluiden vaikutusta välkyntänsä havaittavuuteen on mahdotonta selvittää muuten kuin mittaamalla niitä ideaalisen välkyntämittarin mallin mukaan rakennetulla laitteella. [Cla05]

5.2 Vertailu referenssimittarin kanssa

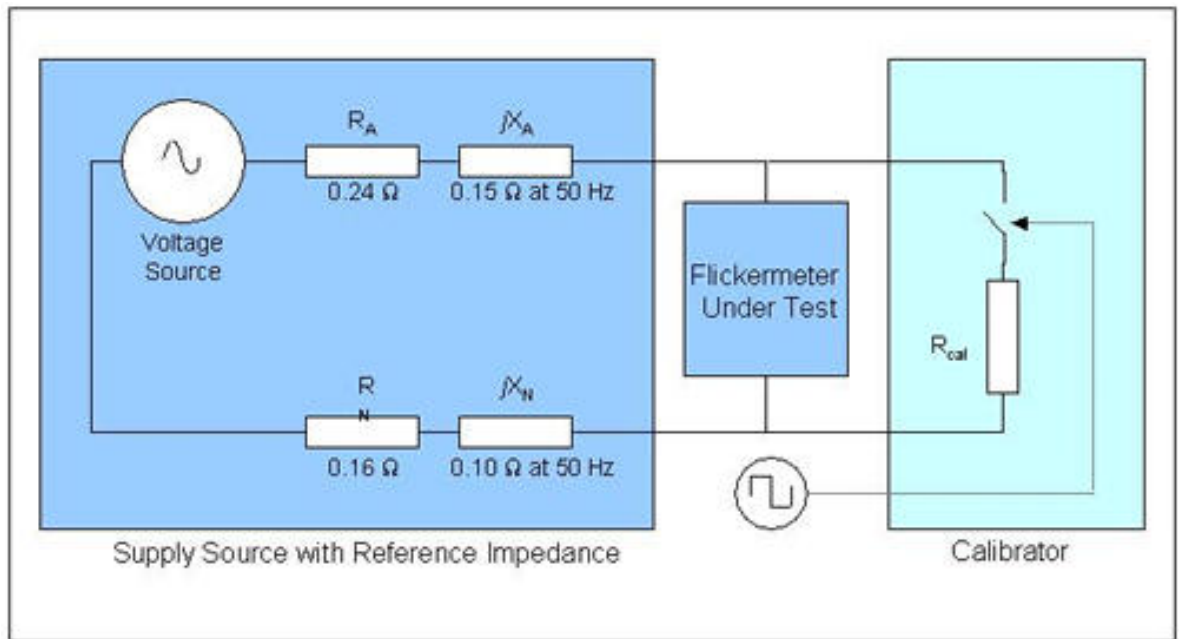
Referenssimittari on välkyntämittari, joka on toteutettu standardin mukaan ja jonka epävarmuus on tunnettu. Se mittaa oikein kaikki mahdolliset signaalit, joten testisignaalin ei tarvitse olla tarkalleen tietynlainen. Kalibroivan laitteen virhe saadaan vertaamalla sen mittaamaa välkyntä häiritsevyyksiä rinnalle kytketyn referenssimittarin näyttämään tulokseen.

Referenssimittarin käyttö tekee mahdolliseksi välkyntämittarien toiminnan testaamisen monipuolisilla jännitteen vaihtelun muodoilla, joita esiintyy oikeissa sähköverkoissa. Ongelmana tässä menetelmässä on se, että referenssimittarin epävarmuutta on vaikea arvioida luotettavasti standardin epäselvyyksien takia. National Physical Laboratory on kehittänyt referenssimittarin, jonka rakennetta ja toimintaa esitellään laitoksen Internet-sivuilla [NPL07].

5.3 Kalibraattori

Sähkölaitteiden sähkömagneettista yhteensopivuutta testaavat järjestelmät voidaan kalibroida yksinkertaisesti kalibraattorin avulla. Kalibraattori muodostuu joukosta ei-induktiivisia vastuksia. Vastusten arvot on valittu siten, että ne aiheuttavat tunnetun jännitehäviön, joka vastaa tiettyä pistettä välkyntämittarin vastekäyrällä suorakulmaiselle modulaatiolle. Mittausjärjestelyn lohkoakaavio on esitetty kuvassa 14. Menetelmää on kehittänyt ainakin National Physical Laboratory. [NPL07]

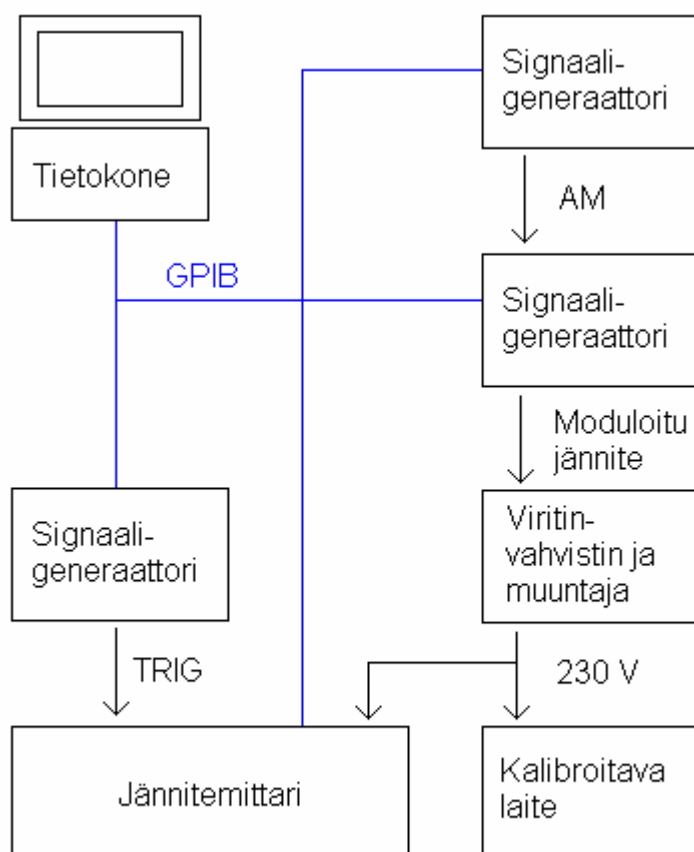
Tällä menetelmällä voidaan kalibroida koko järjestelmä, johon kuuluvat sekä välkyntämittari että lähteen impedanssi. Ongelmana on se, että mahdollinen virhe lähteen referenssi-impedanssin suuruudessa vaikuttaa välkyntämittarin näyttämään, ja tällä menetelmällä virheen lähdettä ei saada selville.



Kuva 14: Sähkölaitteiden EMC-testausjärjestelmän kalibrointi kalibraattorin avulla [NPL07]

6 Kalibrointijärjestelmän toteutus

Välkyntämittareiden kalibrointia varten koottu mittausjärjestelmä on esitetty kuvassa 15. Siinä jännitemittari ja kolme signaaligeneraattoria on liitetty tietokoneeseen GPIB-väylän kautta. GPIB on lyhenne sanoista general purpose interface bus, joka on standardin IEEE-488 mukainen digitaalinen tiedonsiirtoväylä. GPIB-väylä on liitetty tietokoneeseen USB-portin kautta sovittimen avulla. Signaaligeneraattorit ja jännitemittari ohjelmoidaan ja jännitemittaria luetaan tietokoneella tarkoitusta varten ohjelmoidun käyttöliittymän kautta.



Kuva 15: Kalibrointijärjestelmän kaaviokuva

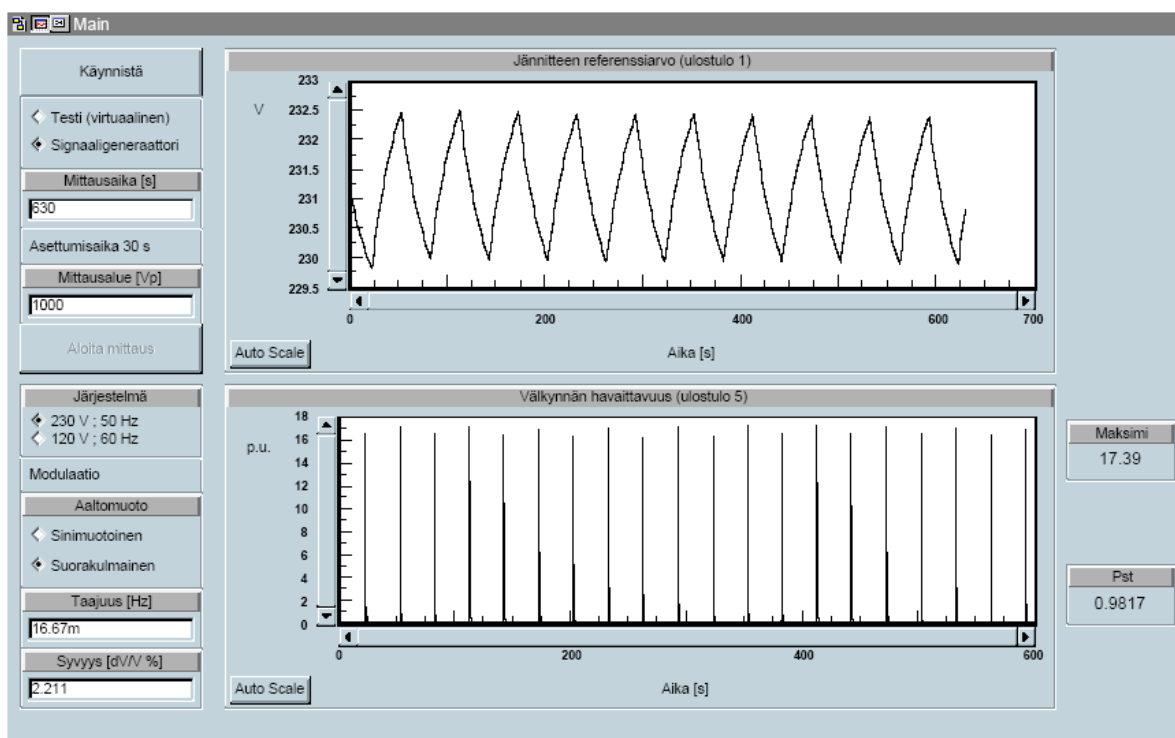
Kalibrointimenetelmäksi on valittu referenssimittari, jonka toteutus perustuu digitaalisella jännitemittarilla tehtävään näytteenottoon. Mitattavasta jännitteestä otetaan

näytteitä valitulla taajuudella. Näytteenoton tahdistukseen käytetään signaaligeneraattoria. Kahta muuta signaaligeneraattoria käytetään testisignaalin tuottamiseen.

6.1 Käyttöliittymä

Signaaligeneraattorien ja jännitemittarin ohjelmointi ja jännitemittarin lukeminen suoritetaan Agilent VEE -ohjelmointityökalulla rakennetulla ohjelmalla. Ohjelman dokumentointi on liitteessä 1.

Kuvassa 16 on referenssivälkyntämittarin käyttöliittymä. Siinä voidaan valita käyttötavaksi joko virtuaalinen testi, jolloin jännitenäytteet generoidaan ohjelmallisesti, tai oikea mittaus, jossa testisignaali tuotetaan signaaligeneraattoreilla.



Kuva 16: Referenssivälkyntämittarin käyttöliittymä

Mittausaika voidaan valita vapaasti, mutta se on standardin mukaan kymmenen minuuttia. Mittausaikaan pitää lisätä 30 sekuntia, joka kuluu alussa suodattimien asettumiseen. Jännitemittarin mittausalue tulee valita siten, että mitattavan jännitteen

amplitudi huipusta huippuun on mittausaluetta pienempi. Järjestelmäksi voidaan valita joko 230 V ja 50 Hz tai 120 V ja 60 Hz. Valinta vaikuttaa sekä signaaligeneraattoreiden tuottamaan jännitteeseen että välkyntämittarien suodattimien kertoimiin.

Modulaatiosignaalin muoto, taajuus ja syvyys voidaan myös valita.

Mittauksen päätyttyä ohjelma käsittelee mittauksesta saadun näytejonon ja esittää tulokset. Ylemmässä kuvaajassa on ulostulon 1 eli signaalin referenssijännitteen arvo ajan funktiona. Alemmassa kuvaajassa on vastaavasti välkyntän havaittavuus.

Havaittavuuden maksimiarvo sekä välkyntän häiritsevyysindeksi P_{st} voidaan lukea oikean laidan kentistä.

6.2 Kalibrointisignaalin tuottaminen

Amplitudimoduloidun jännitesignaalin tuottamiseen käytetään kahta Agilent 33220A -signaaligeneraattoria. Ensimmäinen signaaligeneraattoreista tuottaa verkkotaajuista sinimuotoista signaalia ja toinen sitä moduloivaa signaalia. Moduloiva signaali on kytketty verkkotaajuista sinisignaalia tuottavan generaattorin ulkoisen modulaatiosignaalin sisäänmenoon. Moduloitu sinisignaali puolestaan on kytketty viritinvahvistimeen ja siitä vanhaan ovikellon muuntajaan. Näin signaalin jännitetaso saadaan nostettua verkkojännitteen tasolle.

Molemmat signaaligeneraattorit ohjelmoidaan ”Käynnistä” -painikkeen painalluksesta, ja käyttöliittymän kenttien arvojen määrittämisen testisignaalin tuotto alkaa. Modulaation syvyys on mahdollista antaa neljän numeron tarkkuudella ja taajuus kahdeksan numeron tarkkuudella. Testisignaalin ominaisuuksien tutkiminen ei ole ollut tässä työssä varsinaisena kiinnostuksen kohteena, joten tuotetun signaalin tarkkuutta ja stabiilisuutta ei ole tarkasteltu.

6.3 Jännitteen mittaus

Näytteiden ottoon jännitteestä käytetään Agilent 3458A -yleismittaria. Mittarin suurin mahdollinen näytteenottotaajuus on 50 kS/s. Näytteenoton tahdistamiseen käytetään

Agilent 33120A -signaaligeneraattoria. Se ohjelmoidaan tuottamaan suorakaideaaltoa halutulla näytteenottotaajuudella, joka on tässä toteutuksessa 7200 Hz.

Signaaligeneraattorin ulostulo kytketään jännitemittarin ulkoisen liipaisusignaalin sisäänmenoon.

Mittaus käynnistyy painettaessa käyttöliittymän ”Aloita mittaus” -painiketta. Mittari ohjelmoidaan mittaamaan mittausajan ja näytteenottotaajuuden määräämä lukumäärä näytteitä. Tietokone lukee näytteet mittarilta GPIB-väylän kautta mittauksen aikana. Tämä vaatii tietokoneelta paljon prosessoritehoa, ja mittaus häiriintyy heti, jos tietokoneella suoritetaan samaan aikaan jotakin edes hetkellisesti paljon prosessoritehoa vaativaa ohjelmaa.

6.4 Välkynnän laskentaohjelma

Välkynnän laskenta on toteutettu Agilent VEE -ohjelman sisällä Matlab-komentokielellä. Välkyntämittarin lohkot (ks. luku 4) on toteutettu mahdollisimman tarkasti standardin mukaan digitaalisina versioina. Kertoimet digitaalisten suodattimien siirtofunktioihin on saatu muuntamalla standardin analogiset siirtofunktiot digitaalisiksi bilineaarisella muunnoksella. Tähän on Matlabissa olemassa valmiina funktio bilinear. Näytejonojen suodattaminen suoritetaan funktiolla filter, jolle syötetään argumentteina digitaalisen siirtofunktion osoittaja- ja nimittäjäpolynomin kertoimet sekä itse näytejono. Funktiolle filter voidaan antaa argumenttina myös alkuarvo, mitä on käytetty hyväksi ensimmäisen lohkon toteutuksessa.

Tästä eteenpäin on tarkasteltu vain välkyntämittarin toteutusta 230 voltin ja 50 hertsin järjestelmille. Ohjelmassa on toteutus myös 120 voltin ja 60 hertsin järjestelmille, mutta se poikkeaa edellisestä vain Butterworth-alipäästösuodattimen ja painotussuodattimen siirtofunktioiden kertoimissa.

6.4.1 Lohko 1

Jännitteen referenssiarvo lasketaan ensimmäisessä lohkoissa. Referenssimittarin toteutuksessa se tehdään neliöimällä ja suodattamalla. Mittausjakson näytejonon näytteet kerrotaan itsellään, ja tulos suodatetaan ensimmäisen asteen alipäästösuodattimella. Suodattimen alkuarvoksi otetaan jännitteen tehollisarvon neliö koko mittausjakson ajalta. Alkuarvon käyttö on välttämätöntä, koska muuten referenssijännitteen suodattimen asettumiseen kuluisi useita minutteja. Suodattimen analoginen siirtofunktio on

$$F_R(s) = \frac{1}{1 + s\tau_R}, \quad (6.)$$

missä s on Laplace-muuttuja ja τ_R on suodattimen aikavakio.

Standardin mukaan referenssijännitteen nousuajan t_r (10 % - 90 % lopullisesta arvosta) askelmaiselle muutokselle tulee olla yksi minuutti. Aikavakio τ_R voidaan laskea tästä

kaavalla $\tau_R = \frac{t_r}{\ln 9}$, josta arvoksi saadaan $\tau_R \approx 27,3072$ s.

Muuntamalla analoginen siirtofunktio bilineaarisella muunnoksella digitaaliseksi siirtofunktioksi saadaan

$$H_R(z) = C_R \frac{1 + z^{-1}}{1 + az^{-1}}.$$

Kaavat vakiokertoimien arvojen laskemiseksi ja niiden arvot on lueteltu taulukossa 4. Taulukon kaavoissa esiintyvä f_s on näytteenottotaajuus, joka on 7200 näytettä sekunnissa.

Taulukko 4: Referenssijännitteen digitaalisen suodattimen siirtofunktion kertoimet

Muuttuja	Kaava	Arvo
C_R	$\frac{1}{1 + 2\tau_R f_s}$	$2,54308 \cdot 10^{-6}$
a	$\frac{1 - 2\tau_R f_s}{1 + 2\tau_R f_s}$	$-9,99995 \cdot 10^{-1}$

6.4.2 Lohko 2

Toisen lohkon tehtävänä on signaalin neliöinti. Tämä tapahtuu digitaalisessa toteutuksessa yksinkertaisesti siten, että jokainen näytejonon piste kerrotaan itsellään.

6.4.3 Lohko 3

6.4.3.1 Ylipäästösuodatin

Ensimmäisen asteen ylipäästösuodattimen analoginen taajuusvaste on seuraavanlainen:

$$F_{HP}(s) = \frac{s \tau_{HP}}{1 + s \tau_{HP}}, \quad (7.)$$

missä s on Laplace-muuttuja ja τ_{HP} on suodattimen aikavakio, joka saadaan suodattimen kulmapistetaajuudesta $f_{cHP} = 0,05$ Hz kaavalla $\tau_{HP} = \frac{1}{2\pi f_{cHP}}$. Ylipäästösuodattimen aikavakioksi tulee siis $\tau_{HP} \approx 3,18310$ s.

Suodattimen siirtofunktion digitaalseksi vastineeksi saadaan bilineaarisella muunnoksella

$$H_{HP}(z) = C_{HP} \frac{1 + bz^{-1}}{1 + cz^{-1}}. \quad (8.)$$

Vakiokertoimet on lueteltu taulukossa 5, jossa f_s on valittu näytteenottotaajuus 7200 S/s.

Taulukko 5: Kolmannen lohkon ylipäästösuodattimen digitaalisen siirtofunktion kertoimet

Muuttuja	Kaava	Arvo
C_{HP}	$\frac{2\tau_{HP} f_s}{(1 + 2\tau_{HP} f_s)}$	$9,99978 \cdot 10^{-1}$
b	-1	-1
c	$\frac{(1 - 2\tau_{HP} f_s)}{(1 + 2\tau_{HP} f_s)}$	$-9,99956 \cdot 10^{-1}$

6.4.3.2 Alipäästösuodatin

Butterworth-alipäästösuodatin, jonka asteluku on k ja kulmapistetaajuus f_{cBW} , voidaan jakaa $k/2$ peräkkäiseen toisen asteen suodattimeen [Mom00]. Differenssiyhtälö i :nulle suodattimelle on:

$$y_{n,i} = A_i(x_{n,i} + 2x_{n-1,i} + x_{n-2,i}) - B_i y_{n-1,i} - C_i y_{n-2,i}, \quad (9.)$$

missä i on siis suodattimen järjestysluku ja n indeksi näytepisteille.

Differenssiyhtälöstä voidaan johtaa suodattimen siirtofunktio ryhmittelemällä y - ja x -termit yhtäläisyysmerkin eri puolille. Siirtofunktion osoittajapolynomin kertoimiksi tulevat x -termien kertoimet ja nimittäjäpolynomin kertoimiksi y -termien kertoimet.

Siirtofunktioksi i :nulle suodattimelle saadaan

$$H_{BW i}(z) = \frac{A_i + 2A_i z^{-1} + A_i z^{-2}}{1 + B_i z^{-1} + C_i z^{-2}}. \quad (10.)$$

Siirtofunktion vakiot on lueteltu taulukossa 6. Taulukon kaavoissa f_{cBW} on Butterworth-suodattimen kulmapistetaajuus, joka on välkyntämittarin 230 voltin ja 50 hertsin toteutuksessa 35 Hz, f_s on näytteenottotaajuus 7200 S/s ja k on suodattimen asteluku, joka on standardin mukaan 6.

Matlabissa on myös Butterworth-suodattimen tekemiseen valmiina funktio butter, mutta jostain syystä butter-funktion avulla tehdyn suodattimen amplitudivaste alkaa värähdellä voimakkaasti, kun näytteenottotaajuutta kasvatetaan.

Taulukko 6: Butterworth-alipäästösuodattimen siirtofunktion kertoimet [Mom00]

Muuttuja	Kaava	Arvo $i=1$	Arvo $i=2$	Arvo $i=3$
A_i	$\frac{R^2}{1+R^2-2R\cos\theta_i}$	$2,35063 \cdot 10^{-4}$	$2,38352 \cdot 10^{-4}$	$2,40293 \cdot 10^{-4}$
B_i	$\frac{2(R^2-1)}{1+R^2-2R\cos\theta_i}$	-1,98339	-1,95681	-1,94179
C_i	$\frac{1+R^2+2R\cos\theta_i}{1+R^2-2R\cos\theta_i}$	$9,84316 \cdot 10^{-1}$	$9,57725 \cdot 10^{-1}$	$9,42695 \cdot 10^{-1}$
R	$\tan\left(\frac{\pi f_{cHP}}{f_s}\right)$	$1,52728 \cdot 10^{-2}$	$1,52728 \cdot 10^{-2}$	$1,52728 \cdot 10^{-2}$
θ_i	$\frac{\pi(2i+k-1)}{2k}$	1,83260	2,35619	2,87979

6.4.3.3 Painotussuodatin

Painotussuodattimen analoginen siirtofunktio (3.) jaetaan kahteen osaan ja muunnetaan se digitaaliseksi bilineaarisella muunnoksella,

$$H_{w1}(z) = \frac{d - dz^{-2}}{e + fz^{-1} + gz^{-2}} \text{ ja} \quad (11.)$$

$$H_{w2}(z) = \frac{h + jz^{-1} + lz^{-2}}{m + nz^{-1} + oz^{-2}}. \quad (12.)$$

Kaavojen vakiot on laskettu taulukossa 7. Taulukon kaavoissa esiintyvät vakiot κ , λ , ω_1 , ω_2 , ω_3 ja ω_4 on määritetty taulukossa 1 ja f_s on näytteenottotaajuus 7200 S/s. Arvot on normalisoitu siten, että siirtofunktioiden nimittäjien ensimmäisiksi kertoimiksi tulee 1.

Taulukko 7: Painotussuodattimen digitaalisen siirtofunktion kertoimet [NPL07]

Muuttuja	Kaava	Arvo	Normalisoitu arvo
d	$2\kappa\omega_1 f_s$	$1,44792 \cdot 10^6$	$6,95787 \cdot 10^{-3}$
e	$4f_s^2 + 4\lambda f_s + \omega_1^2$	$2,08098 \cdot 10^8$	1
f	$2\omega_1^2 - 8f_s^2$	$-4,14713 \cdot 10^8$	-1,99288
g	$4f_s^2 - 4\lambda f_s + \omega_1^2$	$2,06629 \cdot 10^8$	$9,92939 \cdot 10^{-1}$
h	$1 + 2\frac{f_s}{\omega_2}$	$1,00628 \cdot 10^3$	$5,08975 \cdot 10^{-3}$
j	2	2	$1,01159 \cdot 10^{-5}$
l	$1 - 2\frac{f_s}{\omega_2}$	$-1,00428 \cdot 10^3$	$-5,07963 \cdot 10^{-3}$
m	$1 + \frac{2f_s}{\omega_3} + \frac{2f_s}{\omega_4} + \frac{4f_s^2}{\omega_3\omega_4}$	$1,97708 \cdot 10^5$	1
n	$2 - \frac{8f_s^2}{\omega_3\omega_4}$	$-3,91461 \cdot 10^5$	-1,98000
o	$1 - \frac{2f_s}{\omega_3} - \frac{2f_s}{\omega_4} + \frac{4f_s^2}{\omega_3\omega_4}$	$1,93758 \cdot 10^5$	$9,80021 \cdot 10^{-1}$

6.4.4 Lohko 4

Neljannen lohkon alipäästösuodattimen analoginen siirtofunktio on

$$F_V(s) = \frac{1}{1 + s\tau_V}, \quad (13.)$$

missä $\tau_V = 300$ ms on suodattimen aikavakio. Tässä käytetään jälleen bilineaarista muunnosta muuttamaan siirtofunktio digitaaliseksi.

$$H(z) = C_V \frac{1 + z^{-1}}{1 + pz^{-1}} \quad (14.)$$

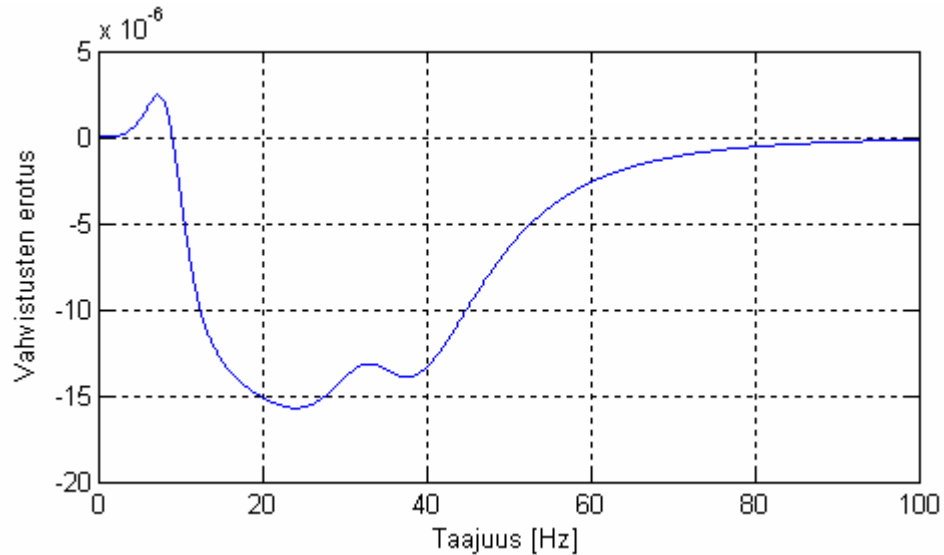
Taulukko 8: Lohkon 4 alipäästösuodattimen digitaalisen siirtofunktion kertoimet

Muuttuja	Kaava	Arvo
C_V	$\frac{1}{1 + 2\tau_V f_s}$	$2,31428 \cdot 10^{-4}$
p	$\frac{1 - 2\tau_V f_s}{1 + 2\tau_V f_s}$	$-9,99537 \cdot 10^{-1}$

6.4.5 Näytteenottotaajuuden valinta

Näytteenottotaajuus vaikuttaa merkittävästi siihen, miten tarkasti bilineaarisella muunnoksella muodostettujen digitaalisten suodattimien amplitudivasteet täsmäävät analogisen toteutuksen kanssa. Valitulla näytteenottotaajuudella 7200 näytettä sekunnissa lohkon 3 digitaalisten suodattimien amplitudivasteen ja standardin vastaavien analogisten suodattimien amplitudivasteen erotus on esitetty kuvassa 17.

Amplitudivasteet saataisiin vastaamaan toisiaan yhtä hyvin pienemmällä näytteenottotaajuudella, jos suodattimien muuttamisessa digitaalisiksi käytettäisiin kovarianssi-invarianttia muunnosta. Sitä ovat hyödyntäneet esimerkiksi Lassi Toivonen ja Jorma Mörsky digitaalisen välkyntämittarin toteutuksessaan [Toi95]. Matlabissa ei ole kuitenkaan olemassa funktiota tämän muunnoksen tekemiseen, joten sen käyttö olisi hankalaa.



Kuva 17: Lohkon 3 digitaalisten ja analogisten suodattimien amplitudivasteen erotus

6.4.6 Skaalauskerroin

Suodattimien vaimennuksen takia neljännen lohkon ulostulon arvo on kerrottava tietyllä vakiolla, jotta välkyntämittarin vaste olisi oikeaa suuruusluokkaa. Tämä vakio voidaan laskea määrittelemällä ulostulon 5 maksimiarvoksi tasan 1 silloin, kun moduloiva signaali on 8,8 Hz sinisignaali, jonka syvyys ($\Delta V/V = d(\omega_F)$) on 0,25 %.

Skaalauskerroin S lasketaan käyttämällä hyväksi analogisten suodattimien laskennallisia amplitudivasteita seuraavasti:

$$S = \frac{2}{\left(\frac{d(\omega_F)}{2} |F_{HP}(\omega_F)| |F_{BW}(\omega_F)| |F_W(\omega_F)| \right)^2 \cdot (1 + |F_V(2\omega_F)|)} \quad (15.)$$

Analogisten suodattimien amplitudivasteet lasketaan kaavoista (16.)-(19.). Alaindeksit HP, BW, W, ja V viittaavat ylipäästösuodattimeen, Butterworth-alipäästösuodattimeen, painotussuodattimeen ja neljännen lohkon alipäästösuodattimeen, kuten aiemmin luvuissa 6.4.3 ja 6.4.4. [Mom98]

$$|F_{HP}(\omega)| = \frac{\omega}{\omega_{cHP}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{cHP}}\right)^2}} \quad (16.)$$

$$|F_{BW}(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{cBW}}\right)^2}} \quad (17.)$$

$$|F_W(\omega)| = \frac{\kappa^2 \omega_1^2 \omega^2}{\sqrt{(\omega_1^2 - \omega^2)^2 + 4\lambda^2 \omega^2}} \cdot \frac{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}{\left(1 + \left(\frac{\omega}{\omega_3}\right)^2\right) \left(1 + \left(\frac{\omega}{\omega_4}\right)^2\right)} \quad (18.)$$

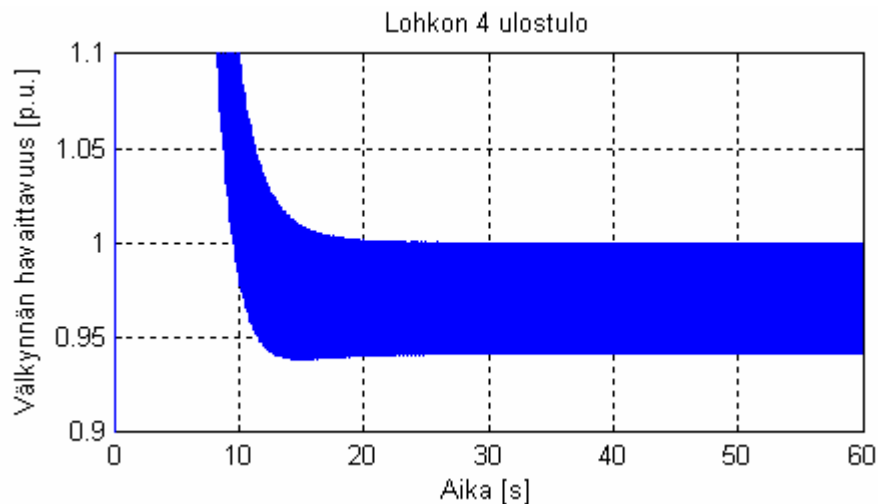
$$|F_V(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau_V)^2}} \quad (19.)$$

Kaavoissa ω on modulaatiosignaalin kulmataajuus, ω_{cHP} ja ω_{cBW} ylipäästö- ja Butterworth-alipäästösuodattimien kulmapistetaajuudet kulmataajuuksina ja τ_V on lohkon 4 alipäästösuodattimen aikavakio. Vakiot κ , λ , ω_1 , ω_2 , ω_3 ja ω_4 on määritetty taulukossa 1.

Kuten yllä määriteltiin $\omega_F = 2\pi \cdot 8,8$ Hz ja $d(\omega_F) = 0,0025$. Tällöin skaalauskerroimen arvoksi saadaan $S \approx 1238353,904$.

6.4.7 Suodattimien asettumisaika

Lohkojen 3 ja 4 suodattimien täytyy antaa asettua pysyvän tilan arvoon ennen kuin varsinaisen välkyntämittauksen voi aloittaa. Kuvassa 18 on esitetty tyypillinen lohkon 4 ulostulosignaali. Siitä havaitaan, että alun korkeista lukemista pysyvään jaksolliseen tilaan asettuminen kestää noin 20 sekuntia. Suodattimien asettumisen aikana esiintyvät liian suuret arvot on leikattava tilastollisesta käsittelystä pois, jotta ne eivät vääristäisi laskennan tulosta. Tämä toteutetaan siten, että välkyntän laskentaohjelma leikkaa näytejonosta ensimmäisten 30 sekunnin jakson pois lohkon 4 jälkeen. Sen jälkeen poikkeamat normaalin tilan arvoista ovat jo niin pieniä, että ne voidaan jättää ottamatta huomioon.



Kuva 18: Suodattimien asettumisaika signaalilla, jonka sinimuotoisen modulaation taajuus on 8,8 Hz ja syvyys 0,25 %

6.4.8 Tilastollisen käsittelyn toteutus

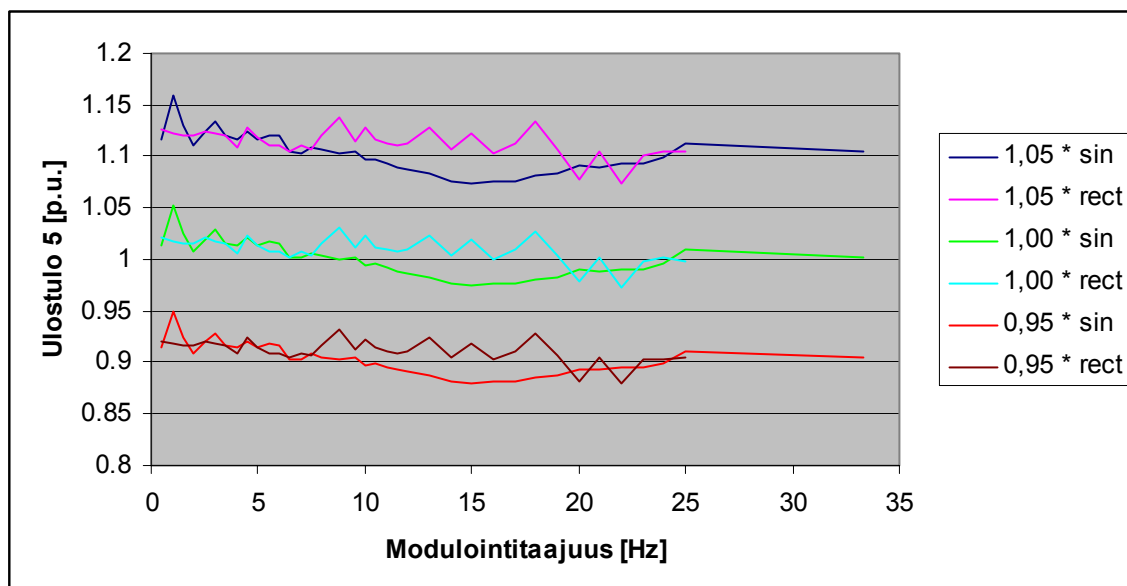
Välkynnän häiritsevyysindeksin laskenta suoritetaan välkyntämittarin viidennessä lohossa. Signaali on tässä toteutuksessa jo valmiiksi digitaalinen, joten A/D-muunnosta ei tarvitse tehdä. Lohkon 4 ulostulon näytteet luokitellaan 200 000 logaritmisesti jaettuun luokkaan. Luokkien määrä on valittu samaksi kuin National Physical Laboratoryn toteutuksessa (ks. [NPL07]). Luokkien suuren lukumäärän ansiosta suurin mahdollinen näytteen ja sitä vastaavan luokan arvon erotus on pieni. Alimman luokan alarajaksi otetaan lohkon 4 ulostulosignaalin minimiarvo ja vastaavasti ylimmän luokan ylärajaksi signaalin maksimiarvo. Luokkien raja-arvot sijoitetaan tälle välille logaritmisesti. Jokainen signaalin näyte sijoitetaan suuruuttaan vastaavaan luokkaan, jolloin näytteiden arvoista saadaan histogrammi. Histogrammin arvoista saadaan edelleen yhteen laskemalla kumulatiivinen todennäköisyysjakauma. Jakaumasta etsitään prosenttipisteet luvun 4.1.2 kuvailemalla tavalla. Prosenttipisteiden sattuessa luokkien väliin niiden arvo lasketaan lineaarisesti interpoloimalla. Menetelmässä suurin mahdollinen virhe prosenttipisteiden arvoille on NPL:n mukaan 130 ppm eli 0,013 %.

6.5 Toiminnan testaus

Referenssimittarin laskentaosaa on testattu taulukoiden 2 ja 3 määrittelemillä signaaleilla. Signaalit on tuotettu virtuaalisesti ohjelman sisällä Matlab-komentokielellä.

6.5.1 Ulostulon 5 vaste

Kuvassa 19 on esitetty referenssimittarin laskentaosan ulostulon 5 maksimi-arvo, kun siihen on syötetty sinimuotoisella ja suorakulmaisella signaalilla moduloitua 50 hertsin signaalia taulukon 2 mukaan. Kuvaajan vaaka-akselilla on moduloivan signaalin taajuus. Taajuuksia vastaavat modulointisyvyydet on annettu taulukossa 2. Standardin mukaan modulaation syvyys tulee säätää siten, että ulostulon 5 maksimi-arvoksi saadaan tasan yksi. Tällöin modulaation syvyyden tulee olla välillä 0,95 – 1,05 kertaa taulukon 2 arvo. Kuvassa 19 alimmat käyrät kuvaavat ulostulon 5 vastetta 0,95-kertaisilla taulukon 2 arvoilla, keskimmäiset on saatu taulukon 2 arvoilla, ja kaksi ylintä käyrää 1,05-kertaisilla taulukon 2 arvoilla. Kuvasta voidaan todeta, että ulostulon 5 arvo 1 saavutetaan kaikilla taajuuksilla vaaditulla modulaatiosyvyyden vaihteluvälillä.

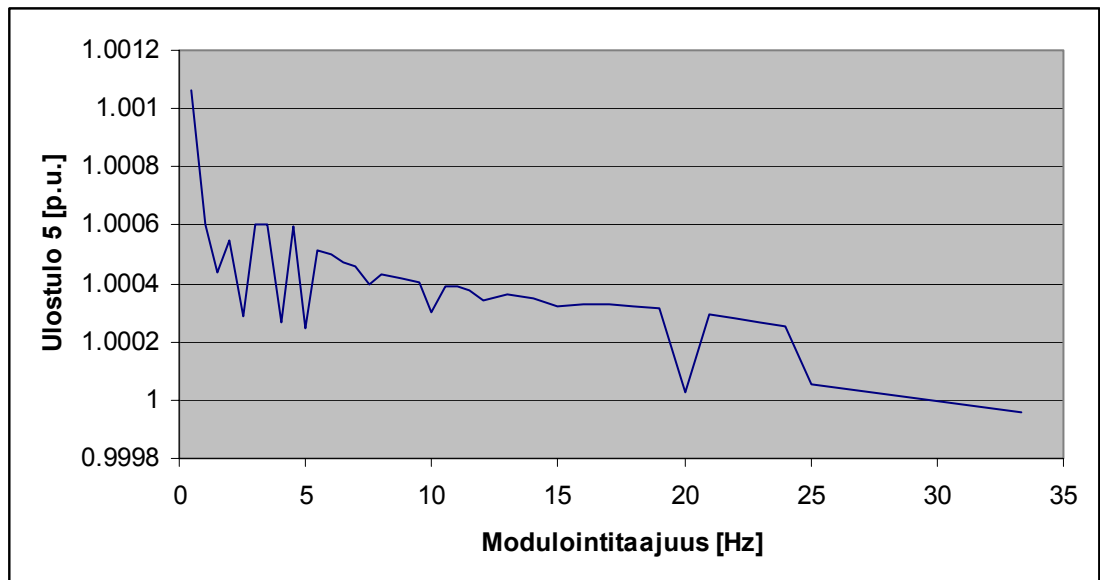


Kuva 19: Ulostulon 5 maksimi-arvot taulukon 2 modulaatiosyvyyksillä sinimuotoisella ja suorakulmaisella modulaatiolla sekä samat 1,05- ja 0,95-kertaisilla taulukon arvoilla

Modulaatiosyvydet, joilla ulostulon 5 maksimiarvoksi saadaan tasan 1 ideaalisella suodattimien toteutuksella, voidaan laskea analyttisesti käyttämällä suodattimien laskennallisia taajuusvasteita. Kaavat taajuusvasteille on esitetty luvussa 6.4.6, kaavat (16.)-(19.). Näitä kaavoja käyttäen voidaan laskea sinimuotoisen modulaation kulmataajuudelle ω_F modulaatiosyvyys $d(\omega_F)$, jolla ideaalisen välkyntämittarin ulostulon 5 maksimiarvon tulisi olla 1.

$$d(\omega_F) = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{S} |F_{HP}(\omega_F)| |F_{BW}(\omega_F)| |F_W(\omega_F)| \cdot \sqrt{1 + |F_V(2\omega_F)|}} \quad (20.)$$

Kuvassa 20 on esitetty referenssimittarin ulostulon 5 maksimiarvo sinimuotoisella modulaatiolla kaavalla (20.) lasketuilla modulaatiosyvyyksillä.



Kuva 20: Ulostulon 5 maksimiarvo sinimuotoisella modulaatiolla ja kaavalla (20.) lasketuilla modulaatiosyvyyksillä

Kuvasta nähdään, että ulostulon 5 arvo osuu arvoon 1 noin 0,1 % tarkkuudella. Suuremmat poikkeamat pienillä taajuuksilla voidaan selittää sillä, että kaavojen (15.) ja (20.) johdossa tehdyt oletukset eivät täysin päde pienimmillä taajuuksilla. [Mom98]

Lähteessä [Mom98] tehtyjen oletusten perusteella on myös mahdollista laskea odotetut P_{st} -arvot tietyille modulaatiosyvyyksille sinimuotoisilla ja suorakulmaisilla

modulaatioilla, joiden taajuus on 4000 muutosta minuutissa. Ulostulon 5 välkynnän hetkellisen havaittavuuden arvo saadaan kaavasta

$$p_{F5}(t) = \frac{S}{2} \left(\left(\frac{d}{2} |F_{HP}(\omega_F)| |F_{BW}(\omega_F)| |F_W(\omega_F)| \right)^2 \cdot [1 + |F_V(2\omega_F)| \cos(2\omega_F t)] \right). \quad (21.)$$

Kaavasta (21.) nähdään, että hetkellisen havaittavuuden arvo seuraa kosinikäyrää, jonka taajuus on $2\omega_F t$. Välkyntätaso, jonka havaittavuusarvo ylittää tietyn osan mittaustajasta, voidaan siis laskea yhdestä kosinisisignaalin jaksosta. Tietylle prosenttipisteelle P kaikki $p_{F5}(t)$:n arvot, joissa $2\omega_F t$ on välillä

$$\left(\frac{-P}{100 \cdot 2} \cdot 2\pi \right) < 2\omega_F t < \left(\frac{P}{100 \cdot 2} \cdot 2\pi \right) \quad (22.)$$

ylittävät ne arvot, joissa $2\omega_F t = ((P/100 \cdot 2) \cdot 2\pi)$. Korvaamalla kaavassa (21.) lauseke $2\omega_F t$ lausekkeella $((P/100 \cdot 2) \cdot 2\pi)$ voidaan laskea välkynnän havaittavuustaso, jonka P % ulostulon 5 arvoista ylittää. Prosenttipisteet $P_{0,1}$, $P_{0,7}$ jne. voidaan näin laskea. Nämä laskelmat pätevät sinimuotoiselle modulaatiolle. Lähteessä [Mom98] todetaan myös, että välkyntätaajuudella $33 \frac{1}{3}$ Hz suodattimien vasteen suhde sinimuotoisille ja suorakulmaisille modulaatioille on hyvällä tarkkuudella $1/3$. Tätä tietoa käyttäen lähteessä [NPL07] on laskettu oikea P_{st} -arvo suorakulmaiselle modulaatiolle tällä taajuudella, ja tulokseksi on saatu 1,024250, joka vastaa melko tarkasti referenssimittarilla mitattua arvoa (ks. seuraava alaluku).

6.5.2 Tulokset häiritsevyyksindeksille

Referenssimittarilla on mitattu myös taulukon 3 määrittelemät suorakaidemoduloidut signaalit. Taulukossa 9 on esitetty mittausten tulokset.

Taulukko 9: Referenssimittarin näyttämät P_{st} -arvot standardin testipisteissä

Muutoksia minuutissa	dV/V (%)	P_{st}	Virhe (%)
1	2,724	1,002	0,2
2	2,211	1,008	0,8
7	1,459	1,006	0,6
39	0,906	1,013	1,3
110	0,725	1,004	0,4
1620	0,402	0,987	-1,3
4000	2,4	1,024	2,4

Standardin mukaan välkyntämittarin tulisi näyttää arvoa $1 \pm 0,05$ taulukon 9 määrittämällä testisignaaleilla. Referenssimittarin näyttämät P_{st} -arvot mahtuvat siis tähän haarukkaan, mutta poikkeavat arvosta 1 kalibrointitarkoitusta ajatellen huomattavan paljon. Pisteet on kuitenkin määritetty käyttämällä simulaatiota, joka perustuu vain suunnilleen standardin määrittelyihin, ja siksi erot ovat odotettavia [NPL07].

6.6 Epävarmuuden arviointi

Referenssimittarin mittausten epävarmuutta arvioitaessa täytyy ottaa huomioon itse jännitteen mittauksen epävarmuus, välkyntän havaittavuusarvon laskentaprosessin virhelähteet ja tilastollisen käsittelyn virhe. Välkyntän havaittavuusarvon laskennan virheet syntyvät lähinnä lohkon 3 suodattimissa, ja niiden virheen on luvussa 6.4.3 todettu olevan luokkaa 0,1 %. Tilastollisen käsittelyn virhe on luokkien logaritmisena ja suuren lukumäärän ansiosta hyvin pieni, luokkaa 0,01 %. Kaikkien virhelähteiden yhteisvaikutuksen arvioiminen on laskennan monimutkaisuuden takia varsin hankala tehtävä. Se vaatisi myös lisää tutkimuksia jännitemittarin lineaarisuuden ja kohinan vaikutuksista laskentaprosessiin.

Kalibroinnin tulosten epävarmuuteen vaikuttaa vielä referenssimittarin epävarmuuksien lisäksi joitakin standardissa määrittelemättömiä asioita kuten suodattimien

asetumisaika, referenssijännitteen laskentatapa, modulaation vaihe mittauksen alussa ja modulaation vaihe suhteessa kanta-aaltoon. Niillä saattaa National Physical Laboratoryn tutkimusten mukaan olla jopa prosenttien vaikutus vertailtavien mittareiden näyttämiin tuloksiin.

6.7 Vaihehyppyjen mittaaminen

Nykyisessä toteutuksessa käytetty näytteenottotaajuus 7200 S/s on riittävä, kun mitataan amplitudimoduloitua sinimuotoista jännitettä. Todellisissa olosuhteissa jännitteessä saattaa kuitenkin olla vaihehyppyjä, jotka myös aiheuttavat välkyntää. Vaihehyppyt ovat jännitteen vaiheen nopeita muutoksia. Niitä voi syntyä valokaariuunien normaalissa toiminnassa tai vaihdettaessa tehonsyötön lähdettä kytkimellä. Tarkka välkyntän mittaaminen vaatii hyvää vaiheresoluutiota δ , joka lasketaan kaavasta

$$\delta = 360^\circ \cdot \frac{f_n}{f_s}, \quad (23.)$$

missä f_n on verkkojännitteen taajuus ja f_s on näytteenottotaajuus [Mom06].

Oikeaan välkyntän häiritsevyyssindeksin mittaustulokseen vaaditaan $0,25^\circ$ vaiheresoluutio, joka saavutetaan kaavan mukaan 72 kS/s näytteenottotaajuudella 50 hertsin järjestelmässä. Viiden prosentin tarkkuuteen päästään 36 kS/s näytetaajuudella. Tämän diplomityön toteutuksen näytteenottotaajuudella 7,2 kS/s välkyntän häiritsevyyssindeksin mittaustulokseksi voi olla noin 20 prosenttia. [Mom06]

Näytteenottotaajuuden kasvattaminen on nykyisellä laitteistolla mahdollista vain taajuuteen 50 kS/s saakka, joka on Agilent 3458A -mittarin maksiminäytetaajuus käytössä olevalla toimintatavalla. Nykyisellä laitteistolla päästään siis standardin vaatimaan viiden prosentin tarkkuuteen, joka vaatii 36 kS/s näytetaajuuden, mutta tarkkaan referenssimittariin tarvittaisiin siis 72 kS/s.

6.8 Prosessoinnin rajoitukset

Toisena ongelmana näytteenottotaajuuden kasvattamisessa on näytejonon pituus. Pisin näytejono, jota työssä käytössä ollut tietokone pystyy käsittelemään, on noin kuusi miljoonaa näytettä. Se tulee täyteen 7,2 kS/s näytetaajuudella alle 14 minuutissa.

Näytetaajuudella 36 kS/s voitaisiin mitata alle kolme minuuttia. Välkynnän häiritsevyyssindeksin mittaukseen tarvitaan kuitenkin standardin mukaan 10 minuutin mittausjakso. Näytejonoa pitäisi siis pystyä käsittelemään lyhyemmissä osissa jo mittauksen aikana. Se ei onnistu nykyisellä toteutuksella, koska tietokoneen muu käyttö mittauksen ollessa käynnissä aiheuttaa mittaukseen häiriöitä.

7 Kalibroinnin suorittaminen

Välkyntämittareiden kalibroinnin suorittamiseen ei ole olemassa selkeitä ohjeita. Sellaisia ollaan kehittämässä, mutta ohjeet ovat vielä toistaiseksi luonnosasteella. Tässä luvussa käsitellään sitä, mitä mittauksia kalibrointia varten tulisi tehdä. Lopussa on myös esitetty tulokset erään kaupallisen sähkönlaatuanalysoijan kalibroinnista.

7.1 Suoritettavat mittaukset

Standardin mukaan välkyntämittarin vaste lohkon 4 ulostuloon saakka tulee testata sinimuotoisella ja suorakulmaisella modulaatiolla taulukoiden mukaan. Testi tulee suorittaa muuttamalla signaalin modulaatiota siten, että lohkon 4 ulostulon huippuarvo on 1. Digitaalisista välkyntämittareista ei kuitenkaan pysty yleensä lukemaan tätä hetkellistä välkyntänsä havaittavuusarvoa, vaan vain tietyin väliajoin päivittyvän P_{st} -arvon. Myös referenssimittarissa hetkellisen välkyntänsä havaittavuuden signaalin huippuarvo on jokseenkin turha tieto, koska se on koko mittausjakson suurin arvo, joka saattaa vaihdella melko paljon. Hyödyllisempi tieto olisi jaksollisen modulaatiosignaalin tapauksessa huippuarvojen keskiarvo, mikä voidaan suunnilleen arvioida kuvaajasta. Sen laskeminen olisi kuitenkin ohjelmallisesti hieman hankalaa ja tarpeellisuuskin olisi kyseenalainen.

Häiritsevyyksien mittausta tulee standardin mukaan testata taulukon 3 määrittämällä suorakaidemoduloiduilla signaaleilla. P_{st} -arvon mittaus kymmenen minuutin jaksoista löytyy yleisesti kaikista sähkönlaatuanalysoijista, ja vertailu referenssimittarin kanssa on helppo suorittaa. Mittauksessa on tärkeää, että vertailtavat mittarit mittaavat testisignaalia saman ajanjakson. Referenssimittari on siis käynnistettävä 30 sekuntia ennen kalibroitavan laitteen mittausjakson alkua suodattimien asettumisajan vuoksi.

7.2 Testiprotokolla

Digitaalisten välkyntämittarien toiminnassa esiin tulleiden poikkeavuuksien takia kansainvälinen työryhmä CCU2 on laatinut luonnoksen ohjeista välkyntämittareiden testaukseen [CCU04]. Sen tarkoituksena on tarjota valmistajien, loppukäyttäjien ja testilaboratorioiden käyttöön systemaattinen metodi tarkastaa välkyntämittarien standardin mukainen toiminta. Testisignaali on suunniteltu vastaamaan kaikenlaisia jännitteen vaihteluita, joita sähköverkoissa käytännössä esiintyy. Tällaisia ovat normaalien suorakulmaisten ja sinimuotoisten modulaatioiden lisäksi väliharmoniset, jännitekuopat, vaihehyppyt sekä näiden yhdistelmät. Ohjearvot testisignaaleista mitatulle välkyntämittarille on saatu käyttämällä välkyntämittarisimulaatiota. Testiprotokollan oli määrä valmistua vuoden 2006 aikana, mutta se on edelleen luonnosasteella.

7.3 Kokeilu kaupallisen välkyntämittarin kalibrointiin

Kalibrointijärjestelmää on kokeiltu käytännössä erään kaupallisen laitteen kalibrointiin. Järjestelmällä tuotettiin standardin P_{st} -mittauksen testaukseen tarkoitetun taulukon määrittämiä suorakaidemoduloituja signaaleja, ja mitattiin niitä referenssimittarilla ja kalibroitavalla laitteella. Kutakin signaalia mitattiin yhden kymmenen minuutin jakson ajan. Mittausten tulokset on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10: Kaupallisen välkyntämittarin kalibrointikokeilun tulokset

Muutoksia / min	dV/V (%)	Referenssi-mittari	Kalibroitava laite	Ero (%)
1	2,724	0,976	1,004	3
2	2,211	0,981	0,994	1
7	1,459	0,982	0,983	0
39	0,906	0,995	0,979	-2
110	0,725	0,981	0,963	-2
1620	0,402	0,951	0,967	2
4000	2,4	0,958	0,759	-21

Huomataan, että kalibroitu laite pysyi standardin määäämissä viiden prosentti rajoissa kaikilla muilla paitsi viimeisellä, 4000 jännitemuutosta minuutissa sisältävällä testisignaalilla. Tämä testipiste on lisätty standardiin vasta viimeisimmän lisäyksen yhteydessä vuonna 2003. On mahdollista, että kalibroitavan laitteen suunnittelussa ei ole ehditty ottaa sitä huomioon. Taulukossa ei ole mainittu referenssimittauksen epävarmuusarviota, koska sitä ei ole pystytty määrittämään tarpeeksi luotettavasti.

8 Pohdinta ja johtopäätökset

Diplomityössä kehitetyllä laitteistolla on mahdollista suorittaa välkyntämittareiden kalibrointi nykyisen standardin IEC 61000-4-15 vaatimusten mukaan. Laitteisto sisältää testisignaalia tuottavat signaaligeneraattorit, digitaalisen jännitemittarin sekä tietokoneohjelman, joka toimii kalibrointijärjestelmän käyttöliittymänä. Digitaalisen jännitemittarin mittaustuloksista lasketaan ohjelmassa välkyntävyyden havaittavuus ja häiritsevyysoindeksi. Laskenta on toteutettu mahdollisimman tarkasti standardin määritysten mukaan, jotta järjestelmää voidaan käyttää referenssimittarina. Käytännön sähkölaatuanalysointia voidaan kalibroida vertaamalla niiden mittaustuloksia referenssimittarin antamiin tuloksiin.

Työssä rakennetun referenssimittarin epävarmuuden luotettava arviointi on vaikeaa. Välkyntävyyden laskenta pystytään toteuttamaan varsin tarkasti, mutta ideaalinenkaan toteutus ei anna täysin oikeita tuloksia standardissa määriteltyjen testisignaalien mittaustuloksissa. Epävarmuuden arviointi vaatisi myös vielä lisää tutkimuksia siitä, miten jännitemittauksen lineaarisuus ja kohina vaikuttavat välkyntävyyden laskentaprosessin tuloksiin.

Välkyntämittaristandardi vaatii edelleen kehittämistä. Tutkimusten mukaan kaupalliset välkyntämittarit mittaavat huomattavasti toisistaan poikkeavia lukemia mitattaessa samoja signaaleja, vaikka kyseiset mittarit täyttävätkin standardin tarkkuusvaatimukset. Näyttää todennäköiseltä, että standardiin liitetään tulevaisuudessa ohjeet välkyntämittareiden testaamiseen nykyisiä sini- ja suorakaidemoduloituja signaaleja monimutkaisemmilla testisignaaleilla. Näiden signaalien tuottamiseen täytyy kehittää uusi menetelmä, sillä työssä toteutetulla laitteistolla saadaan aikaan vain jaksollisia modulaatiosignaaleja.

Mittaustulosten parantaminen täytyy parantaa, jotta sillä voitaisiin mitata luotettavasti välkyntävyyden vaihteluja. Tutkimuksen mukaan näytteenottotaajuuden tulisi olla 72 kS/s, jos testisignaali sisältää vaihehyppyjä. Vaihehyppyjen aiheuttaman välkyntävyyden mittaustulokset kuuluvat kehitteillä olevan testiprotokollan määrittämään

mittausohjelmaan. Referenssimittarin nykyiseen toteutukseen verrattuna näytteenottotaajuuden tulisi siis olla kymmenkertainen. Tähän ei päästä nykyisellä laitteistolla.

Referenssimittarin ei tarvitse toimia reaaliaikaisesti, koska mittaustuloksia voidaan vertailla jälkeenpäin. Mittausdatan tallentamisesta ja prosessoinnista tulee kuitenkin ongelma, kun mitataan pitkiä ajanjaksoja suurella näytteenottotaajuudella. Nykyisessä toteutuksessa mittausta ja mittausdatan käsittelyä ei ole mahdollista suorittaa samanaikaisesti. Jos se olisi mahdollista, voitaisiin mittausaikoja pidentää, koska se poistaisi tarpeen pitkien näytejonojen tallentamisesta ja käsittelystä yhdellä kertaa.

Lähdeluettelo

- [BCH05] BC Hydro, Power Quality: A guide to voltage fluctuation and light flicker, March 2005,
http://www.bchydro.com/rx_files/psbusiness/psbusiness23448.pdf
- [Bud05] I. Budowsky, G. Hammond, Precision measurement of power harmonics and flicker, IEEE transactions on instrumentation and measurement, vol. 45, no. 2, April 2005
- [Cla05] P. Clarkson, P. S. Wright, A model based approach for the calibration of IEC standard flickermeters using complex waveforms, British electromagnetic measurements conference, 14th - 17th November 2005, Teddington, UK
- [CCU04] CCU2 – Cigré C4.1.01 / CIRED 2 / UIE WG2 joint working group on power quality, Flicker meter test protocol – draft 11
- [Gut07] J. J. Gutierrez, J. Ruiz, S. Ruiz de Gauna, Linearity of the IEC flickermeter regarding amplitude variations of rectangular fluctuations, IEEE transactions on power delivery, Vol. 22, No. 1, January 2007
- [Hal03] S. M. Halpin et. al., Voltage and lamp flicker issues: should the IEEE adopt the IEC approach?, IEEE transactions on power delivery, vol. 18, no. 3, July 2003
- [Han03] Z. Hanzelka et. al., Comparative tests of flicker meters, CIRED 17th international conference on electricity distributions, Barcelona Spain, 12-15 May 2003
- [Han05] Z. Hanzelka, A. Bień, Voltage disturbances – flicker measurement, Leonardo power quality initiative, Power quality application guide 5.2.3, 2005
- [Han06] Z. Hanzelka, A. Bień, Voltage disturbances – flicker, Leonardo power quality initiative, Power quality application guide 5.1.4, 2006
- [IEC03] International Electrotechnical Commission, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 15: Flickermeter – Functional and design specifications, International Standard 61000-4-15

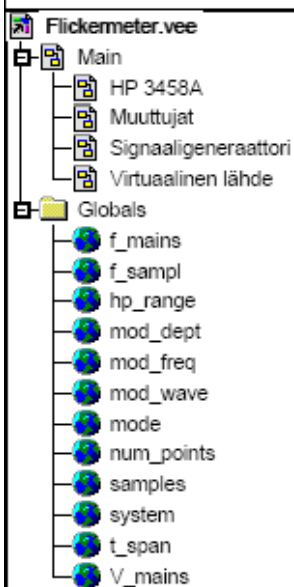
- [IEV07] IEC International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online database, <http://std.iec.ch/iec60050>
- [Kop01] P. Koponen, A. Mäkinen, R. Seesvuori, Voltage dips cause problems with digital flickermeters, 2001 IEEE Porto Power Tech Conference
- [McK99] J. McKim, The UIE flickermeter demystified, Compliance Engineering, May 1999, <http://www.ce-mag.com/archive/1999/mayjune/McKim.html>
- [Mom98] W. Mombauer, Calculating a new reference point for the IEC flickermeter, ETEP vol. 8, no. 6, November/December 1998, pages 429-436
- [Mom00] W. Mombauer, EMV – Messung von Spannungsschwankungen und Flickern mit dem IEC-Flickermeter, VDE Verlag (109), 2000, ISBN 3-8007-2525-8
- [Mom06] W. Mombauer, Flicker caused by phase jumps, ETEP Vol. 16, No. 6, November/December 2006, s. 545-567
- [Mor02] M. M. Morcos, J. C. Gomez, Flicker sources and mitigation, IEEE power engineering review, November 2002
- [NPL07] National Physical Laboratory (UK), Calibration of harmonic and flicker analysers, Harmonics and flicker learning, http://www.npl.co.uk/electromagnetic/dclf/harmonics_flicker_learn.html
- [Toi95] L. Toivonen, J. Mörsky, Digital multirate algorithms for measurement of voltage, current, power, and flicker, IEEE transactions on power delivery, vol. 10, no. 1, January 1995, pages 116-126
- [UIE91] UIE – International Union for Electroheat, WG disturbances, Flicker measurement and evaluation, Paris 1991
- [Wil05] Wilsun Xu, Deficiency of the IEC flicker meter for measuring interharmonic-caused voltage flickers, Power engineering society general meeting, 2005

Liite 1: Kalibrointiohjelman dokumentaatio

Dokumentaatio on tehty Agilent VEE -ohjelman Print Program -toiminnolla.

```
Save File Name: D:\Dtyo\Ohjelma\Flickermeter.vee  
Save File Last Revised: Tue May 29 10:06:57 2007  
Save File Format: 2.3  
VEE Pro Revision: 6.03  
Execution mode: VEE 6 Execution Mode
```

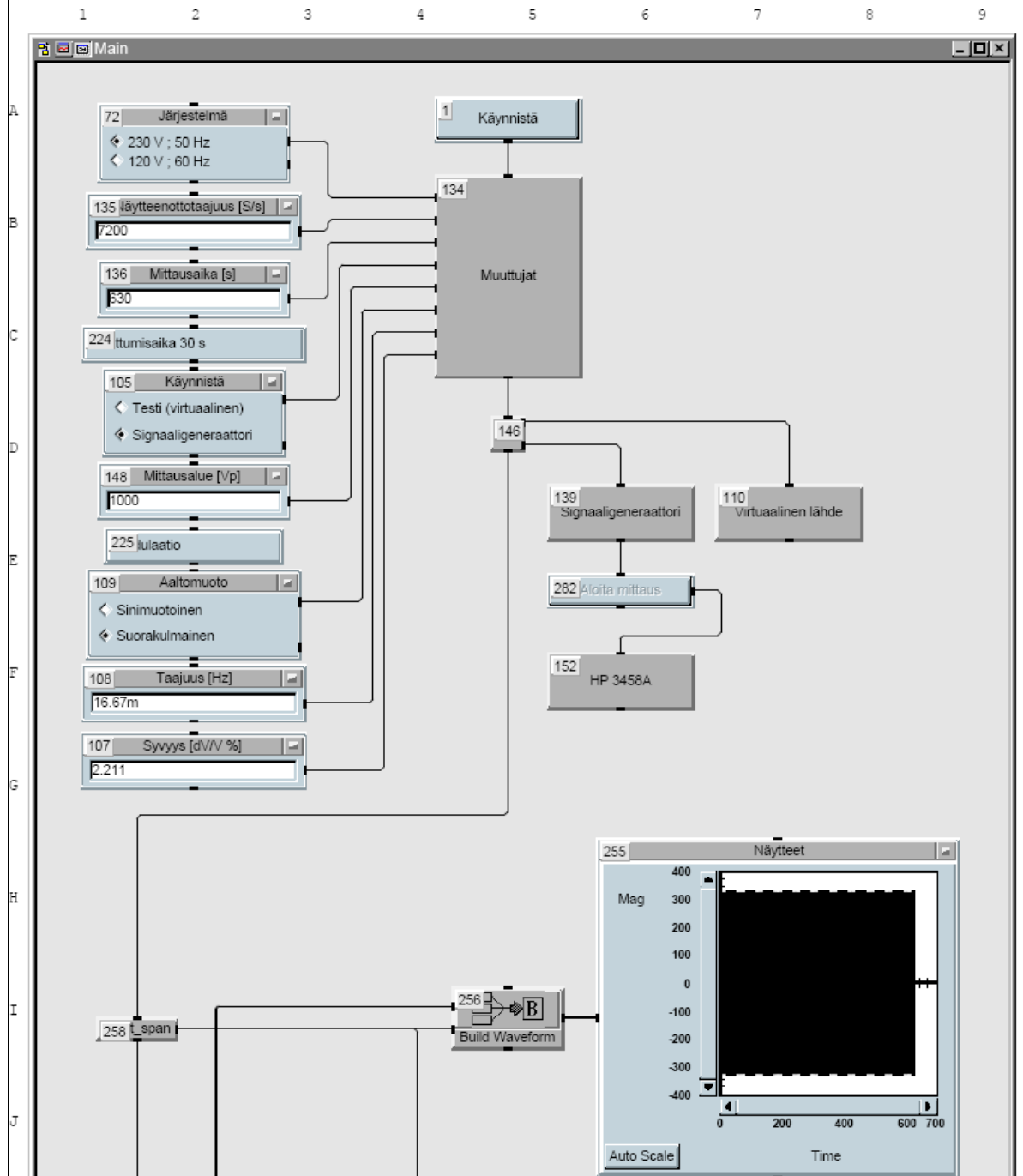
Program Explorer Overview

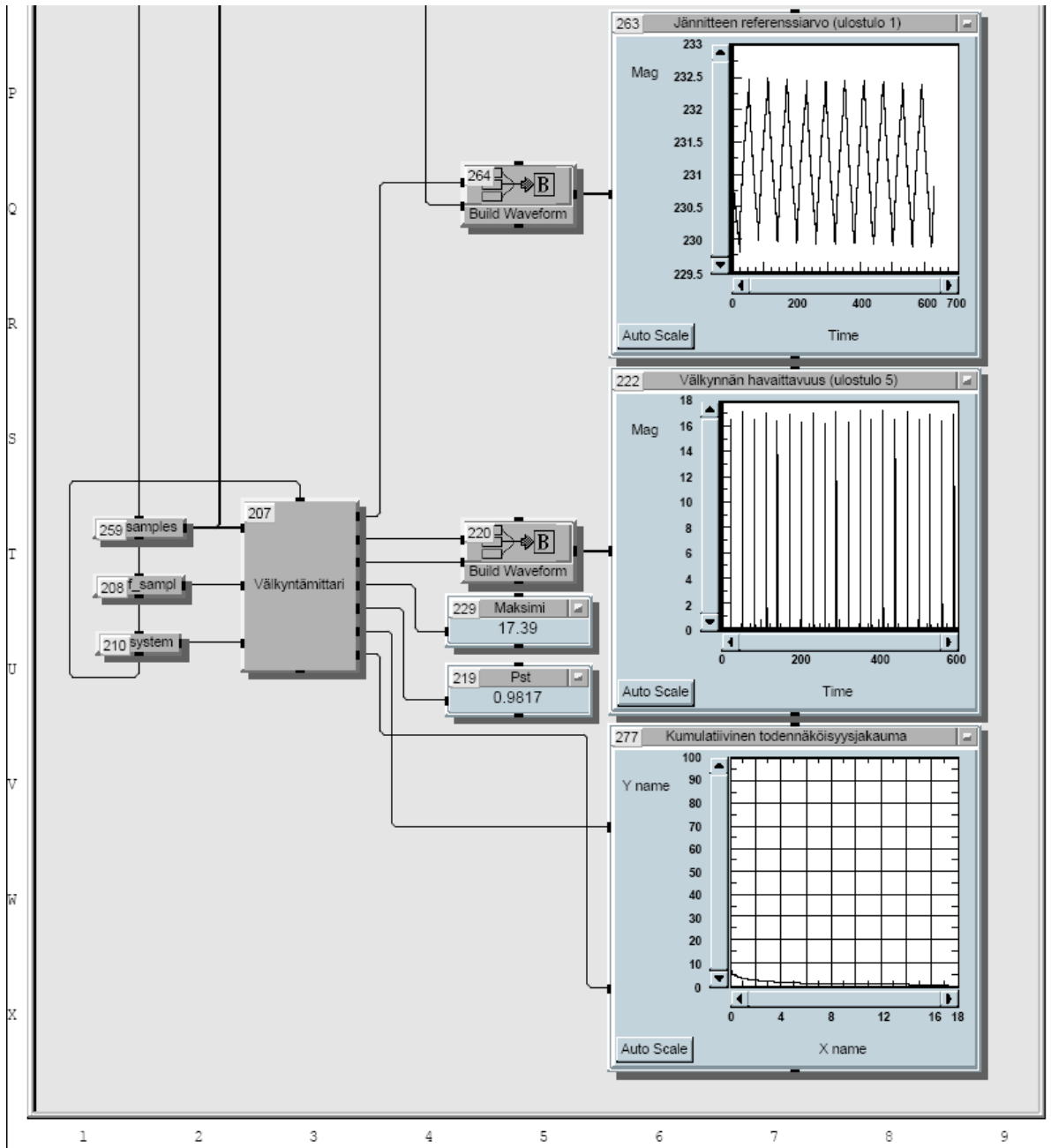


I/O Configuration

Embedded Configuration (Flickemeter.vee)

- [-] GPIB14
 - DL1520(@1408)
 - dmm(hp34401a@(NOT LIVE))
 - dvm(hp3478a@(NOT LIVE))
 - DVM007(@1422)
 - fgen(hp3325b@(NOT LIVE))
 - funcgen(hp33120a@1410)
 - hp3320a(ag33220a@1412)
 - HP34401A(ag33220a@1411)
 - HP34401A2(@1428)
 - HP3458A(unknown@1425)
 - HP3458a2(@1425)
 - isoHP007(iso22@1422)
 - isoHP067(iso25@1425)
 - isoHP144(iso26@1426)
 - K2410(@1429)
 - LeCroy(—¼@1404)
 - LeCroyLite(lep142@1403)
 - Lite_Runner(lep142@1403)
 - Nicolet(@1414)
 - oscope(hp54600@(NOT LIVE))
 - pikkuHP001(—¼@1426)
 - pikkuHP051(@1423)
 - pikkuHP130(pikku28@1428)
 - pikkuHP147(—¼@1411)
 - scope(hp54504a@(NOT LIVE))
 - uusiAg33220A(ag33220A@1411)
 - Wavetek(wt80@1418)
 - Yokogawa(@1408)
- [-] GPIB7
 - newInstrument(hp33120a@710)
 - newInstrument2(ag33220a@712)
 - newInstrument3(wt80@718)
 - newInstrument4(@725)
 - newInstrument5(@711)
- [-] Serial1
 - megger1(@1)
 - megger2(@1)
 - tettex(@1)





```

Main "Main"
- 1 at: A5 Start "Käynnistä" is added to panel
- 72 at: A2 Selection Control "Järjestelmä" is added to panel
- 105 at: D2 Selection Control "Käynnistä" is added to panel
- 107 at: G2 Constant "Syvyys [dV/V %]" is added to panel
- 108 at: F2 Constant "Taajuus [Hz]" is added to panel
- 109 at: E2 Selection Control "Aaltomuoto" is added to panel
- 110 at: D7 UserObject "Virtuaalinen lähde"
- 134 at: B5 UserObject "Muuttujat"
- 135 at: B2 Constant "Näytteenottotaajuus [S/s]"
- 136 at: B2 Constant "Mittausaika [s]" is added to panel
- 139 at: D6 UserObject "Signaaligeneraattori"
- 146 at: D5 If/Then/Else "If"
  └─ If/Else cases: mode=="Tes"
- 148 at: D2 Constant "Mittausalue [Vp]" is added to panel
- 152 at: F6 UserObject "HP 3458A"
- 207 at: T3 MATLAB Script "Välkyntämittari"
  └─ MATLAB Script: 112 lines.
    └─ BLOCK=1;
      └─ RMS2=X.^2;
      └─ tau=60/log(9);
      └─ b=1/tau;
      └─ a=[1 1/tau];

    └─ zi=norm(X)^2/length(X);
    └─ [b,a]=bilinear(b,a,f_sampl);
    └─ RMS2=filter(b,a,RMS2,zi);
    └─ RMS=sqrt(RMS2);
    └─ X=X./(sqrt(2)*RMS);

    └─ BLOCK=2;
      └─ X=X.^2;

    └─ BLOCK=3;
      └─ fc=0.05;
      └─ b=[1 0];
      └─ a=[1 2*pi*fc];
      └─ [b,a]=bilinear(b,a,f_sampl);
      └─ X=filter(b,a,X);

    └─ if strcmp(system,'230')
      └─ fc=35;
    └─ end;
    └─ if strcmp(system,'120')
      └─ fc=42;
    └─ end;

```



```

- k=6;
- R=tan(pi*fc/f_sampl);
- for i=1:k/2
-     theta=pi*(2*i+k-1)/(2*k);
-     A=R^2/(1+R^2-2*R*cos(theta));
-     B=2*(R^2-1)/(1+R^2-2*R*cos(theta));
-     C=(1+R^2+2*R*cos(theta))/(1+R^2-2*R*cos(theta));
-     b=[A 2*A A];
-     a=[1 B C];
-     X=filter(b,a,X);
- end;

- if strcmp(system,'230')
-     k=1.74802;
-     lamb=2*pi*4.05981;
-     w1=2*pi*9.15494;
-     w2=2*pi*2.27979;
-     w3=2*pi*1.22535;
-     w4=2*pi*21.9;
- end;
- if strcmp(system,'120')
-     k=1.6357;
-     lamb=2*pi*4.167375;
-     w1=2*pi*9.077169;
-     w2=2*pi*2.939902;
-     w3=2*pi*1.394468;
-     w4=2*pi*17.31512;
- end;
- b=[k*w1 0];
- a=[1 2*lamb w1^2];
- [b,a]=bilinear(b,a,f_sampl);
- X=filter(b,a,X);
- b=[w3*w4/w2 w3*w4];
- a=[1 w3+w4 w3*w4];
- [b,a]=bilinear(b,a,f_sampl);
- X=filter(b,a,X);

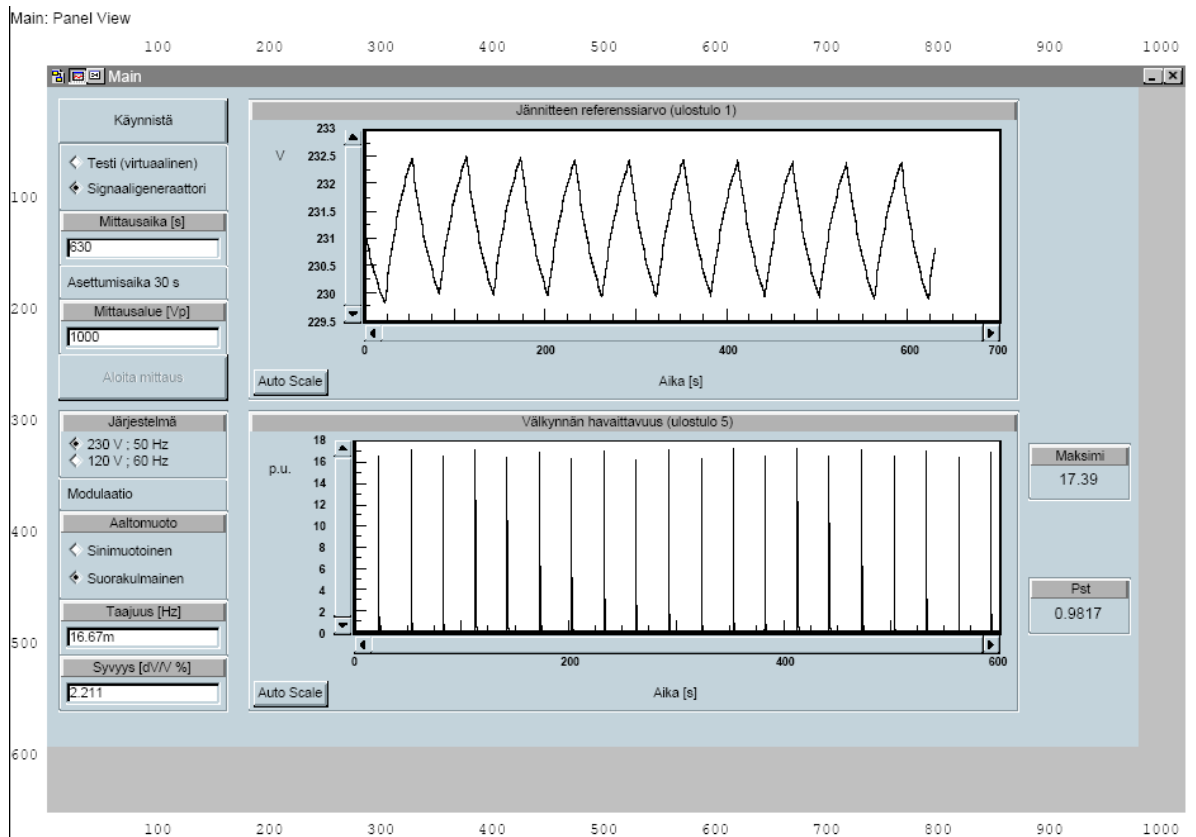
- BLOCK=4;
-
- X=X.^2;
- tau=0.3;
- b=1/tau;
- a=[1 1/tau];
- [b,a]=bilinear(b,a,f_sampl);
- X=filter(b,a,X);
-
- X=X*1238353.904;
-
- CUT=30;
-
- X=X(CUT*f_sampl+1:length(X));
- t_span_cut=length(X)/f_sampl;
-
- output5=X;
- max5=max(output5);

```

```

BLOCK=5;
nbins=200000;
edg=logspace(log10(min(X)),log10(max(X)),nbins+1);
edg(1)=min(X);
edg(end)=max(X);
n=histc(X,edg);
n(nbins)=n(nbins)+n(nbins+1);
n=n(1:nbins);
cc=[flipud(cumsum(flipud(n)));0];
cpercent=100*cc/length(X);
k=0.01*[0.1 0.7 1 1.5 2.2 3 4 6 8 10 13 17 30 50 80];
ck=k*length(X);
P=zeros(1,15);
for i=1:15
    b=find(cc<ck(i));
    b=b(1);
    P(i)=(edg(b)-edg(b-1))/(cc(b)-cc(b-1))*(ck(i)-cc(b-1))+edg(b-1);
end;
P01=P(1);
P1s=1/3*(P(2)+P(3)+P(4));
P3s=1/3*(P(5)+P(6)+P(7));
P10s=1/5*(P(8)+P(9)+P(10)+P(11)+P(12));
P50s=1/3*(P(13)+P(14)+P(15));
Pst=0.1*sqrt(3.14*P01+5.25*P1s+6.57*P3s+28*P10s+8*P50s);
208 at: T1 Get Variable "Get f_sampl"
└ Global Name: "f_sampl"
210 at: U1 Get Variable "Get system"
└ Global Name: "system"
219 at: U5 AlphaNumeric "Pst" is added to panel
220 at: T5 Build Waveform "Build Waveform"
222 at: T7 Y Plot "Välkynnän havaittavuus (ulostulo 5)" is added to panel
224 at: C2 Label "Asettumisaika 30 s" is added to panel
└ Label: "Asettumisaika 30 s"
225 at: E2 Label "Modulaatio" is added to panel
└ Label: "Modulaatio"
229 at: T5 AlphaNumeric "Maksimi" is added to panel
255 at: I7 Y Plot "Näytteet"
256 at: I5 Build Waveform "Build Waveform"
258 at: I1 Get Variable "Get t_span"
└ Global Name: "t_span"
259 at: T1 Get Variable "Get samples"
└ Global Name: "samples"
263 at: Q7 Y Plot "Jännitteen referenssiarvo (ulostulo 1)" is added to panel
264 at: Q5 Build Waveform "Build Waveform"
277 at: W7 X vs Y Plot "Kumulatiivinen todennäköisyysjakauma"
282 at: E6 OK "Aloita mittaus" is added to panel

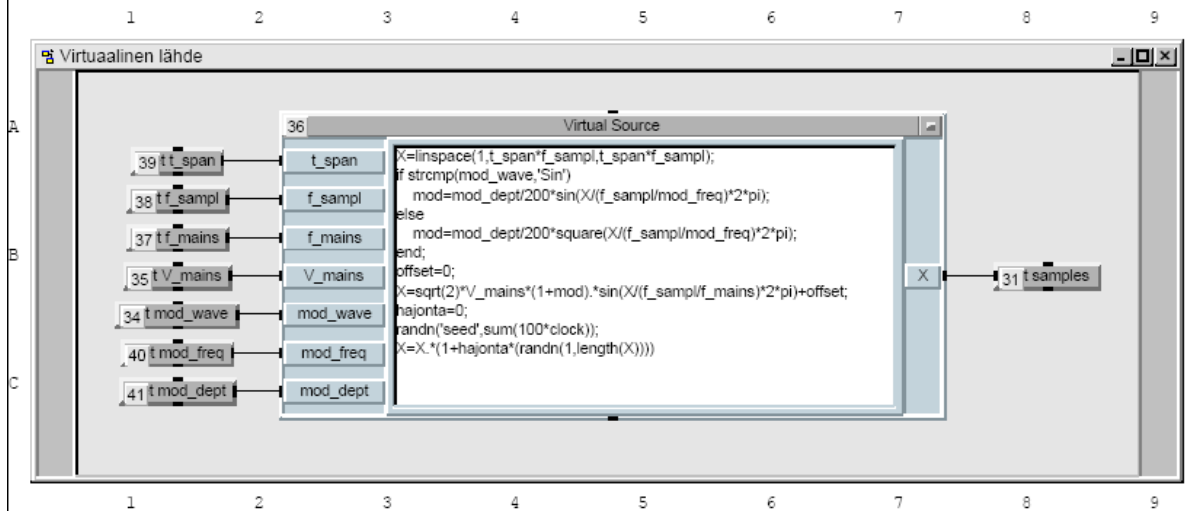
```



```

PanelView "Main" (w=978, h=592)
- 1: Start "Käynnistä" (x=10, y=10) (w=151, h=41)
- 105: Selection Control "Käynnistä" (x=10, y=50) (w=151, h=61)
- 136: Constant "Mittausaika [s]" (x=10, y=110) (w=151, h=51)
- 224: Label "Asettumisaika 30 s" (x=10, y=160) (w=151, h=31)
- 148: Constant "Mittausalue [Vp]" (x=10, y=190) (w=151, h=51)
- 282: OK "Aloita mittaus" (x=10, y=240) (w=151, h=41)
- 225: Label "Modulaatio" (x=10, y=350) (w=151, h=31)
- 109: Selection Control "Aaltomuoto" (x=10, y=380) (w=151, h=81)
- 108: Constant "Taaajuus [Hz]" (x=10, y=460) (w=151, h=51)
- 107: Constant "Syvyys [dV/V %]" (x=10, y=510) (w=151, h=51)
- 222: Y Plot "Välkynnän havaittavuus (ulostulo 5)" (x=180, y=290) (w=691, h=271)
- 263: Y Plot "Jännitteen referenssiarvo (ulostulo 1)" (x=180, y=10) (w=691, h=271)
- 229: AlphaNumeric "Maksimi" (x=880, y=320) (w=91, h=51)
- 219: AlphaNumeric "Pst" (x=880, y=440) (w=91, h=51)
- 72: Selection Control "Järjestelmä" (x=10, y=290) (w=151, h=61)

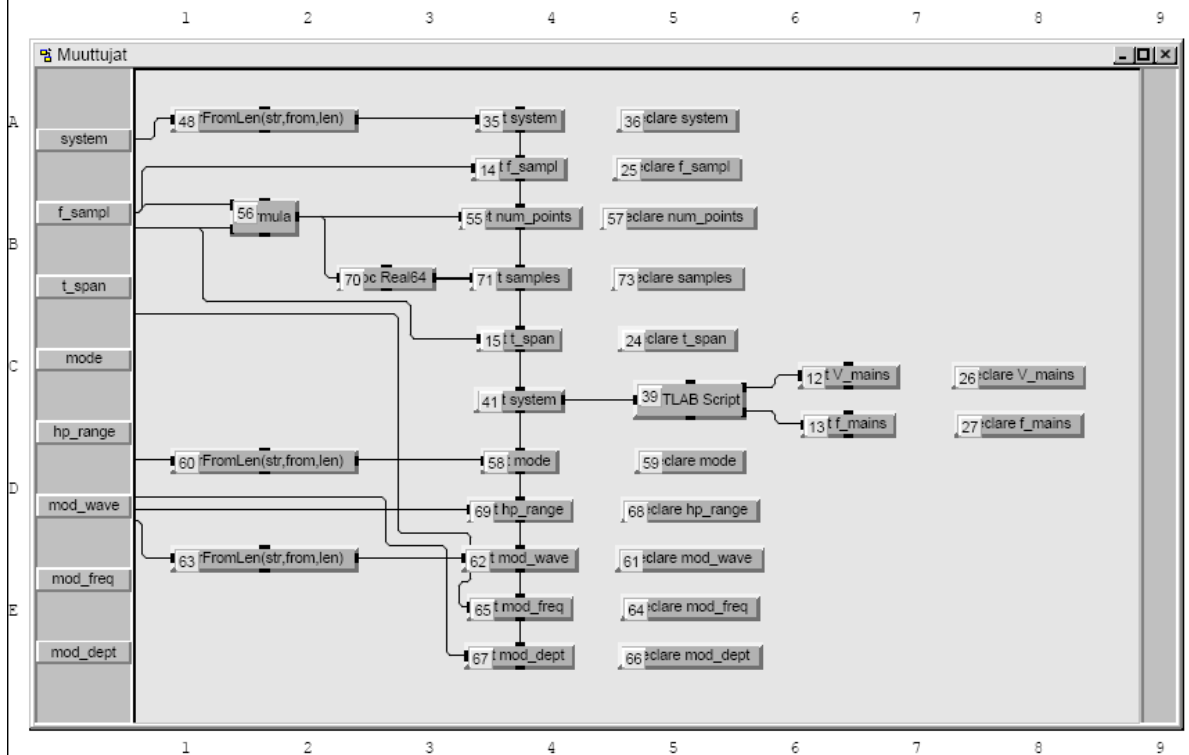
```



```

UserObject "Virtuaalinen lähde"
├── 31 at: B8 Set Variable "Set samples"
│   └── Global Name: "samples"
├── 34 at: B1 Get Variable "Get mod_wave"
│   └── Global Name: "mod_wave"
├── 35 at: B1 Get Variable "Get V_mains"
│   └── Global Name: "V_mains"
├── 36 at: B5 MATLAB Script "Virtual Source"
│   └── MATLAB Script: 13 lines.
│       ├── X=linspace(1,t_span*f_sampl,t_span*f_sampl);
│       ├── if strcmp(mod_wave,'Sin')
│       │   ├── mod=mod_dept/200*sin(X/(f_sampl/mod_freq)*2*pi);
│       │   └── else
│       │       ├── mod=mod_dept/200*square(X/(f_sampl/mod_freq)*2*pi);
│       │       └── end;
│       ├── offset=0;
│       ├── X=sqrt(2)*V_mains*(1+mod).*sin(X/(f_sampl/f_mains)*2*pi)+offset;
│       ├── hajonta=0;
│       ├── randn('seed',sum(100*clock));
│       └── X=X.*(1+hajonta*(randn(1,length(X))))
├── 37 at: B1 Get Variable "Get f_mains"
│   └── Global Name: "f_mains"
├── 38 at: A1 Get Variable "Get f_sampl"
│   └── Global Name: "f_sampl"
├── 39 at: A1 Get Variable "Get t_span"
│   └── Global Name: "t_span"
├── 40 at: C1 Get Variable "Get mod_freq"
│   └── Global Name: "mod_freq"
└── 41 at: C1 Get Variable "Get mod_dept"
    └── Global Name: "mod_dept"

```



```

UserObject "Muuttujat"
├─ 12 at: C6 Set Variable "Set V_mains"
│   └─ Global Name: "V_mains"
├─ 13 at: C6 Set Variable "Set f_mains"
│   └─ Global Name: "f_mains"
├─ 14 at: A4 Set Variable "Set f_sampl"
│   └─ Global Name: "f_sampl"
├─ 15 at: C4 Set Variable "Set t_span"
│   └─ Global Name: "t_span"
├─ 24 at: C5 Declare Variable "Declare t_span"
│   └─ Variable Scope: Global
│     └─ Global Name: "t_span"
├─ 25 at: A5 Declare Variable "Declare f_sampl"
│   └─ Variable Scope: Global
│     └─ Global Name: "f_sampl"
├─ 26 at: C8 Declare Variable "Declare V_mains"
│   └─ Variable Scope: Global
│     └─ Global Name: "V_mains"
├─ 27 at: C8 Declare Variable "Declare f_mains"
│   └─ Variable Scope: Global
│     └─ Global Name: "f_mains"
├─ 35 at: A4 Set Variable "Set system"
│   └─ Global Name: "system"
├─ 36 at: A5 Declare Variable "Declare system"
│   └─ Variable Scope: Global
│     └─ Global Name: "system"

```

```

39 at: C5 MATLAB Script "MATLAB Script"
└─ MATLAB Script: 8 lines.
   └─ if strcmp(sys,'230')
      └─ V_mains=230;
         └─ f_mains=50;
            └─ end;
               └─ if strcmp(sys,'120')
                  └─ V_mains=120;
                     └─ f_mains=60;
                        └─ end;

41 at: C4 Get Variable "Get system"
└─ Global Name: "system"

48 at: A2 Formula "strFromLen(str,from,len)"
└─ Formula: strFromLen(str,0,3)

55 at: B4 Set Variable "Set num_points"
└─ Global Name: "num_points"

56 at: B2 Formula "Formula"
└─ Formula: A*B

57 at: B5 Declare Variable "Declare num_points"
└─ Variable Scope: Global
   └─ Global Name: "num_points"

58 at: D4 Set Variable "Set mode"
└─ Global Name: "mode"

59 at: D5 Declare Variable "Declare mode"
└─ Variable Scope: Global
   └─ Global Name: "mode"

60 at: D2 Formula "strFromLen(str,from,len)"
└─ Formula: strFromLen(str,0,3)

61 at: D5 Declare Variable "Declare mod_wave"
└─ Variable Scope: Global
   └─ Global Name: "mod_wave"

62 at: D4 Set Variable "Set mod_wave"
└─ Global Name: "mod_wave"

63 at: D2 Formula "strFromLen(str,from,len)"
└─ Formula: strFromLen(str,0,3)

64 at: E5 Declare Variable "Declare mod_freq"
└─ Variable Scope: Global
   └─ Global Name: "mod_freq"

65 at: E4 Set Variable "Set mod_freq"
└─ Global Name: "mod_freq"

66 at: E5 Declare Variable "Declare mod_dept"
└─ Variable Scope: Global
   └─ Global Name: "mod_dept"

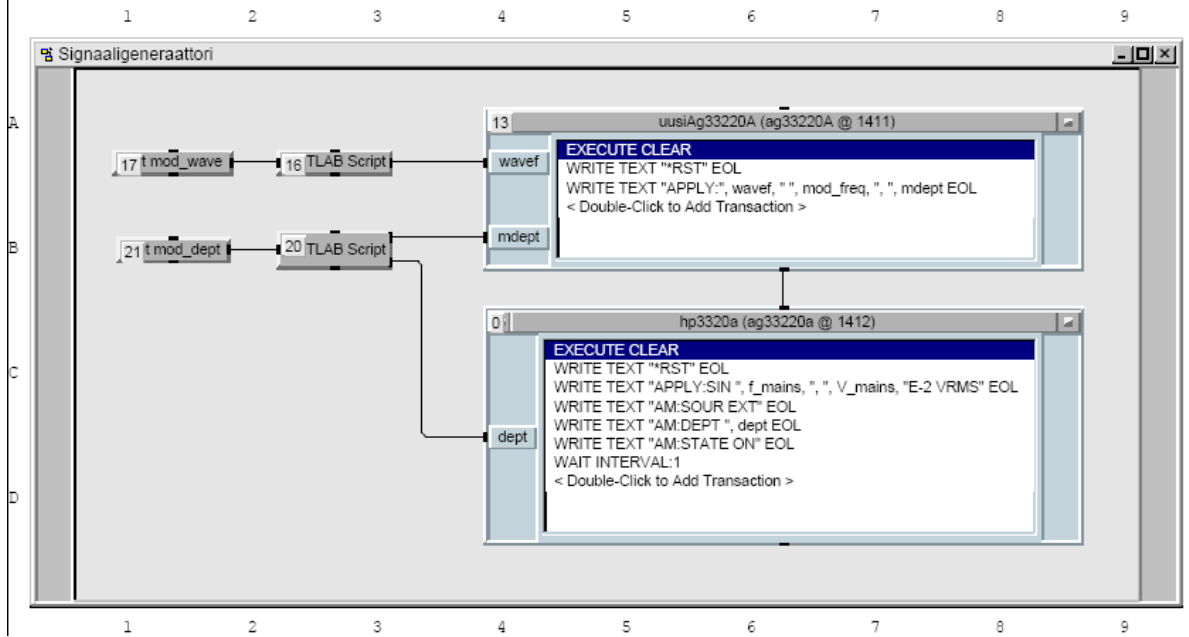
67 at: E4 Set Variable "Set mod_dept"
└─ Global Name: "mod_dept"

68 at: D5 Declare Variable "Declare hp_range"
└─ Variable Scope: Global
   └─ Global Name: "hp_range"

```

```
| 69 at: D4 Set Variable "Set hp_range"  
|   |  Global Name: "hp_range"  
| 70 at: B3 Allocate Array "Alloc Real64"  
| 71 at: B4 Set Variable "Set samples"  
|   |  Global Name: "samples"  
| 73 at: B5 Declare Variable "Declare samples"  
|   |  Variable Scope: Global  
|   |  Global Name: "samples"
```

Main: Signaaligeneraattori (M.139): Detail View, Total Objects: 6



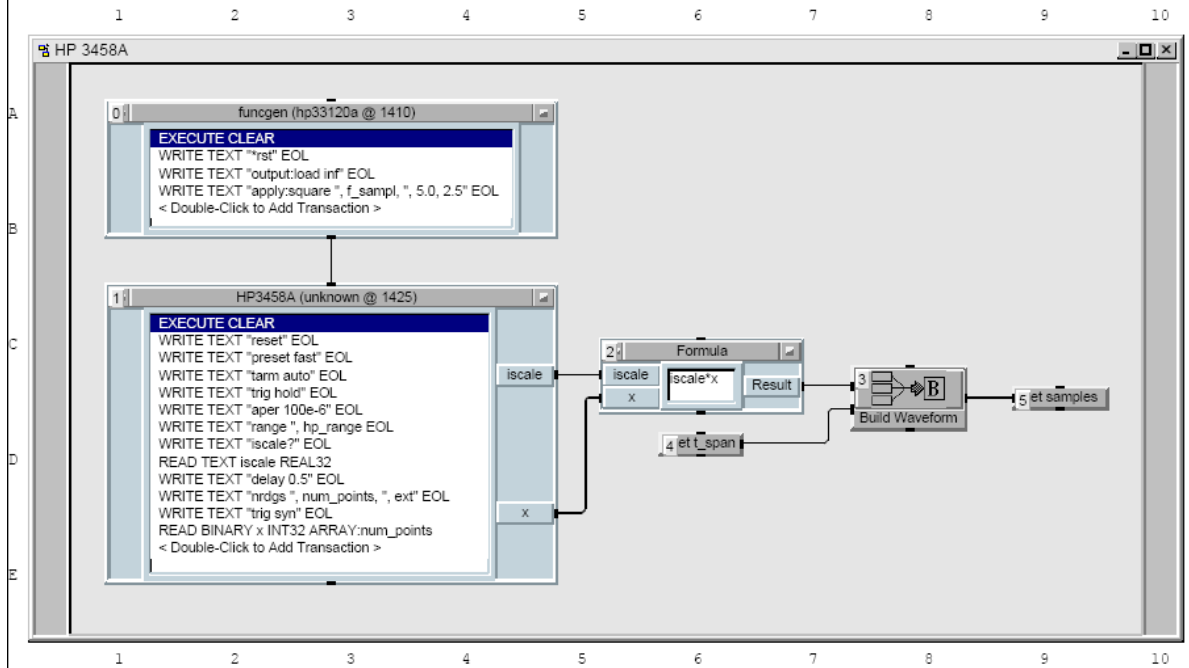
```

UserObject "Signaaligeneraattori"
├── 0 at: C6 Direct I/O "hp3320a (ag33220a @ 1412)"
│   └── Transactions: 7 lines.
│       ├── EXECUTE CLEAR
│       ├── WRITE TEXT "*RST" EOL
│       ├── WRITE TEXT "APPLY:SIN ", f_mains, ", ", V_mains, "E-2 VRMS" EOL
│       ├── WRITE TEXT "AM:SOUR EXT" EOL
│       ├── WRITE TEXT "AM:DEPT ", dept EOL
│       ├── WRITE TEXT "AM:STATE ON" EOL
│       └── WAIT INTERVAL:1
├── 13 at: A6 Direct I/O "uusiAg33220A (ag33220A @ 1411)"
│   └── Transactions: 3 lines.
│       ├── EXECUTE CLEAR
│       ├── WRITE TEXT "*RST" EOL
│       └── WRITE TEXT "APPLY:", wavef, " ", mod_freq, " ", mdept EOL
├── 16 at: A3 MATLAB Script "MATLAB Script"
│   └── MATLAB Script: 5 lines.
│       ├── if strcmp(A, 'Sin')
│       │   ├── X='SIN';
│       │   └── else
│       │       ├── X='SQU';
│       │       └── end;
├── 17 at: A1 Get Variable "Get mod_wave"
│   └── Global Name: "mod_wave"

```



```
- 20 at: B3 MATLAB Script "MATLAB Script"  
  └─ MATLAB Script: 24 lines.  
    └─ if A<5  
      └─ mdept=A;  
        └─ dept=2.5;  
      └─ end;  
    └─ if ((A>=5) & (A<10))  
      └─ mdept=A/2;  
        └─ dept=5;  
      └─ end;  
    └─ if ((A>=10) & (A<20))  
      └─ mdept=A/4;  
        └─ dept=10;  
      └─ end;  
    └─ if ((A>=20) & (A<40))  
      └─ mdept=A/8;  
        └─ dept=20;  
      └─ end;  
    └─ if ((A>=40) & (A<80))  
      └─ mdept=A/16;  
        └─ dept=40;  
      └─ end;  
    └─ if ((A>=80) & (A<160))  
      └─ mdept=A/32;  
        └─ dept=80;  
      └─ end;  
- 21 at: B1 Get variable "Get mod_dept"  
  └─ Global Name: "mod_dept"
```



```

UserObject  "HP 3458A"
├─ 0 at: A3 Direct I/O "funcgen (hp33120a @ 1410)"
│   └─ Transactions: 4 lines.
│       ├── EXECUTE CLEAR
│       ├── WRITE TEXT "*rst" EOL
│       ├── WRITE TEXT "output:load inf" EOL
│       └── WRITE TEXT "apply:square ", f_sampl, ", 5.0, 2.5" EOL
├─ 1 at: D3 Direct I/O "HP3458A (unknown @ 1425)"
│   └─ Transactions: 13 lines.
│       ├── EXECUTE CLEAR
│       ├── WRITE TEXT "reset" EOL
│       ├── WRITE TEXT "preset fast" EOL
│       ├── WRITE TEXT "tarm auto" EOL
│       ├── WRITE TEXT "trig hold" EOL
│       ├── WRITE TEXT "aper 100e-6" EOL
│       ├── WRITE TEXT "range ", hp_range EOL
│       ├── WRITE TEXT "iscale?" EOL
│       ├── READ TEXT iscale REAL32
│       ├── WRITE TEXT "delay 0.5" EOL
│       ├── WRITE TEXT "nrdgs ", num_points, ", ext" EOL
│       ├── WRITE TEXT "trig syn" EOL
│       └── READ BINARY x INT32 ARRAY:num_points
├─ 2 at: C6 Formula "Formula"
│   └─ Formula: iscale*x
├─ 3 at: C8 Build Waveform "Build Waveform"
├─ 4 at: D6 Get Variable "Get t_span"
│   └─ Global Name: "t_span"
├─ 5 at: C9 Set Variable "Set samples"
│   └─ Global Name: "samples"

```