

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Sähkötekniikan osasto

Esa-Pekka Suomalainen

SÄHKÖVOIMATEKNISEN TESTAUSLABORATORION MITTAUSEPÄVARMUUS

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 3.12.1992

Työn valvoja



Matti Karttunen

Työn ohjaaja



Esa Notkonen

~~TKK SÄHKÖTEKNIIKAN
OSASTON KIRJASTO
OTAKAARI 5 A
02150 ESPOO~~

19017

Tekijä: Esa-Pekka Suomalainen

Työn nimi: Sähkövoimateknisen testauslaboratorion
mittausepävarmuus

Päivämäärä: 24.11.1992

Sivumäärä: 66

Osasto: Sähkötekniikan osasto

Professuuri: Sähkölaitos- ja valaistustekniikka

Työn valvoja: Matti Karttunen

Työn ohjaaja: Esa Notkonen

Sähkölaitteita testataan erilaisilla virta- ja jännitemuodoilla. Suureiden mittaamisen ohella on tärkeää määritellä mittauksen kokonaisepävarmuus. Työn tarkoituksena on ollut tutkia kahden mittauksen, salamasyökyjännitemittauksen ja oikosulkuvirtamittauksen, erilaisia epävarmuustekijöitä. Salamasyökyjännitemittauksessa on mittausjärjestelmää tutkittu kokeellisesti suurjännitemittauksia koskevan standardiehdotuksen mukaan. Oikosulkuvirtamittausta on tutkittu pääasiassa teoreettisesti. Molempien mittauksien kokonaisepävarmuudesta on laskettu arvo, joka perustuu osin kokeellisiin tuloksiin ja osin teoreettiseen tutkimukseen.

Avainsanat: mittausepävarmuus, resistiivinen jännitteenjakaja, salamasyökyjännite, oikosulkuvirta, virtashuntti

Author: Esa-Pekka Suomalainen

Name of the thesis: Uncertainty of measurements in power
and high voltage testing laboratory

Date: 24.11.1992

Number of pages: 66

Faculty: Electrical Engineering

Professorship: Power systems and illumination engineering

Supervisor: Matti Karttunen

Instructor: Esa Notkonen

Electrical apparatus are tested with different kind of voltage and current forms. Along with the measured value it is important to determine the overall uncertainty of the measurement. The aim of the work has been to study different sources of uncertainty concerning lighting impulse voltage and short-circuit current measurement. The experimental part of the study of lighting impulse voltage measuring system is based on the draft standard concerning high voltage measurements. Short-circuit current measurement is studied mainly theoretically. In both cases overall uncertainty is calculated.

Keywords: uncertainty of a measurement, resistive voltage divider, lighting impulse voltage, short-circuit current, current shunt

ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty ABB Strömberg Oy:n Tutkimuskeskuksessa Vaasassa.

Työn aiheen olen saanut diplomityön valvojalta, Tutkimuskeskuksen johtajalta prof. Matti Karttuselta, jota haluan erityisesti kiittää mahdollisuudesta tehdä diplomityö ABB:llä.

Työni ohjaajaa DI Esa Notkosta haluan kiittää saamistani neuvoista. Lisäksi esitän suuret kiitokset koestushenkilökunnalle sekä muille henkilöille, jotka ovat auttaneet minua työn eri vaiheissa.

Vaasassa 24.11.1992

Esa-Pekka Suomalainen

Esa-Pekka Suomalainen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	I
ABSTRACT	II
ALKULAUSE	III
SISÄLLYSLUETTELO	IV
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	VI
LIITELUETTELO	VIII
1 JOHDANTO	1
2 TESTAUSTEN SUORITTAMINEN	2
2.1 Testausten merkitys	2
2.2 Erilaiset virhetyypit	3
2.3 Mittausepävarmuus	4
2.3.1 Kokonaisepävarmuuden määrittäminen	5
2.3.2 Keskihajonnan laskeminen	6
3 SALAMASYÖKSYJÄNNITEMITTAUS	10
3.1 Mittauksen epävarmuustekijät	10
3.1.1 Salamasyöksyjännitepiiri	10
3.1.2 Mittauspiirin suurjänniteliityntä	11
3.1.3 Resistiivinen jännitteenjakaja	11
3.1.4 Dynaamiset ominaisuudet	15
3.1.5 Mittauskaapeli	20
3.1.6 Mittalaitteet	22
3.1.6.1 Huippujännitemittarit	22
3.1.6.2 Digitaaliset mittalaitteet	23
3.1.7 Sähkömagneettiset häiriöt ja maadoitus	25
3.2 Mittauspiirin kokeellinen tutkiminen	27
3.2.1 Jakosuhte	28
3.2.2 Askelvaste	30
3.2.3 Taajuusvaste	31
3.2.4 Lineaarisuuskoe	34
3.2.5 Lyhyen ajan stabiilius	36
3.2.6 Häiriökoe	37
3.2.7 Vertailumittaus	37

3.3 Mittausepävarmuuden arviointi	39
3.3.1 Teoreettinen laskenta	39
3.3.1.1 Huippuarvo	39
3.3.1.2 Aikaparametrit	47
3.3.2 Vertailumittaus	48
3.4 Johtopäätökset	50
4 VIRTAMITTAUS	51
4.1 Oikosulkuvirran mittauspiiri	51
4.1.1 Suurvirtashuntti	52
4.1.2 Silmukkaoskillolografi	54
4.2 Häiriöt	55
4.3 Mittausepävarmuuden arviointi	56
4.4 Johtopäätökset	59
5 YHTEENVETO	60
LÄHDELUETTELO	62
LIITTEET	

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

A/D	analogia/digitaali
c	ominaislämpökapasiteetti
C	kapasitanssi
C _e	kokonaismaakapasitanssi
C _E	keskitetty maakapasitanssi
d	mittaustulosten vaihteluväli
d _s	virran tunkeutumissyvyys
D	diodi
F	mittauspiirin jakosuhte
f	taajuus
f ₂	yläraajataajuus
G	konduktanssi
I	virta
k	kerroin
L	induktanssi
M	massa, keskinäisinduktanssi
N	bittien lukumäärä
r	korrelaatiokerroin
R	resistanssi
S	jännitteen jyrkkyys, keskihajonta
T	vastausaika
T _n	kokeellinen vastausaika
T _α	osavastausaika
T _C	aika jännitteen katkaisuun
T _n	kokeellinen vastausaika
T _O	alkuvääristymä
T _R	jäännösvastausaika

VII

T_s	asettumisaika
T_1	rinnannousuaika
T'	integraalin arvo
U	jännite
U_{ch}	syöksyjännitegeneraattorin varausjännite
V	jännitteen huippuarvo
W	energia
\bar{X}	mittaussarjan keskiarvo
Z	aaltoimpedanssi
α	vaimennuskerroin
α_r	resistanssin lämpötilakerroin
β	askelvasteen ylitys, vaihesiirtokerroin
δ	virhe, heijastuskerroin
ϵ	kokonaisepävarmuus
ϵ_0	tyhjiön dielektrisyysvakio
θ	resistanssin lämpenemä
μ_0	tyhjiön permeabiliteetti
μ	suhteellinen permeabiliteetti
σ	keskihajonta, johtavuus
τ	RC-piirin aikavakio, läpäisykerroin, lämpöaikavakio
Φ	magneettivuo
TMJ	tutkittava mittausjärjestelmä
VMJ	vertailumittausjärjestelmä

LIITELUETTELO

LIITE 1

Gaussin normaalijakauma.

LIITE 2

Salamasyöksyjännite ja sen koejännitteet.

LIITE 3

Konvoluutio.

1 JOHDANTO

Sähkönjakeluverkon laitteiden on kestettävä lyhytaikaisia suuria jännitteitä ja virtoja. Testauslaboratorion tehtävänä on tutkia näiden laitteiden sähköisiä ominaisuuksia ja avustaa niiden suunnittelu- ja tuotekehitystyötä. Viimeistään ennen markkinoille päästämistä on kokeellisesti todettava, että laite kestää sähköverkon normaalissa käyttötilanteessa ja erilaisissa vikatilanteissa. Tällä tavalla toteutetaan sähkönjakelun keskeisimmät vaatimukset, jotka ovat turvallisuus ja toimitusvarmuus.

Laitteen sähköinen kestävyys mitoitetaan tietyille jännite- tai virta-arvolle. Kun laite testataan tällä mitoitusarvolla, on suureen mittaaminen keskeinen osa testausta. Hyvällä mittaustarkkuudella saavutetaan suunnittelun lopputuloksena teknisesti kestävä ja taloudellinen tuote. Siten mittaustuloksen lisäksi on myös tärkeää arvioida mittauksen kokonaisepävarmuus.

Tässä työssä on selvitetty erilaisia epävarmuustekijöitä kahdessa mittauksessa, jotka ovat suurjännitelaboratorion salamasyökyjännitemittaus ja teholaratorion oikosulkuvirtamittaus. Molempien mittauksien yksittäisiä epävarmuustekijöitä on tutkittu sekä teoreettisesti että kokeellisesti. Salamasyökyjännitemittauksessa on mittausjärjestelmää tutkittu kokeellisesti suurjännitemittauksia käsittelevän standardiehdotuksen [17] mukaisilla menetelmillä. Lisäksi on arvioitu, miten tutkittava mittausjärjestelmä toteuttaa standardiehdotuksessa esitetyt vaatimukset. Oikosulkuvirtamittauksen tutkiminen on tehty pääasiassa teoreettisesti. Molemmille mittauksille on laskettu arvio kokonaisepävarmuudesta.

2 TESTAUSTEN SUORITTAMINEN

2.1 Testausten merkitys

Suurjännite- ja suurvirtatestien tarkoituksena on kokeellisesti varmistaa, että laite kestää sekä normaalissa käyttötilanteessa että sähköverkon häiriötilanteissa. Testausten olennaisena osana on erilaisten mittausten suorittaminen.

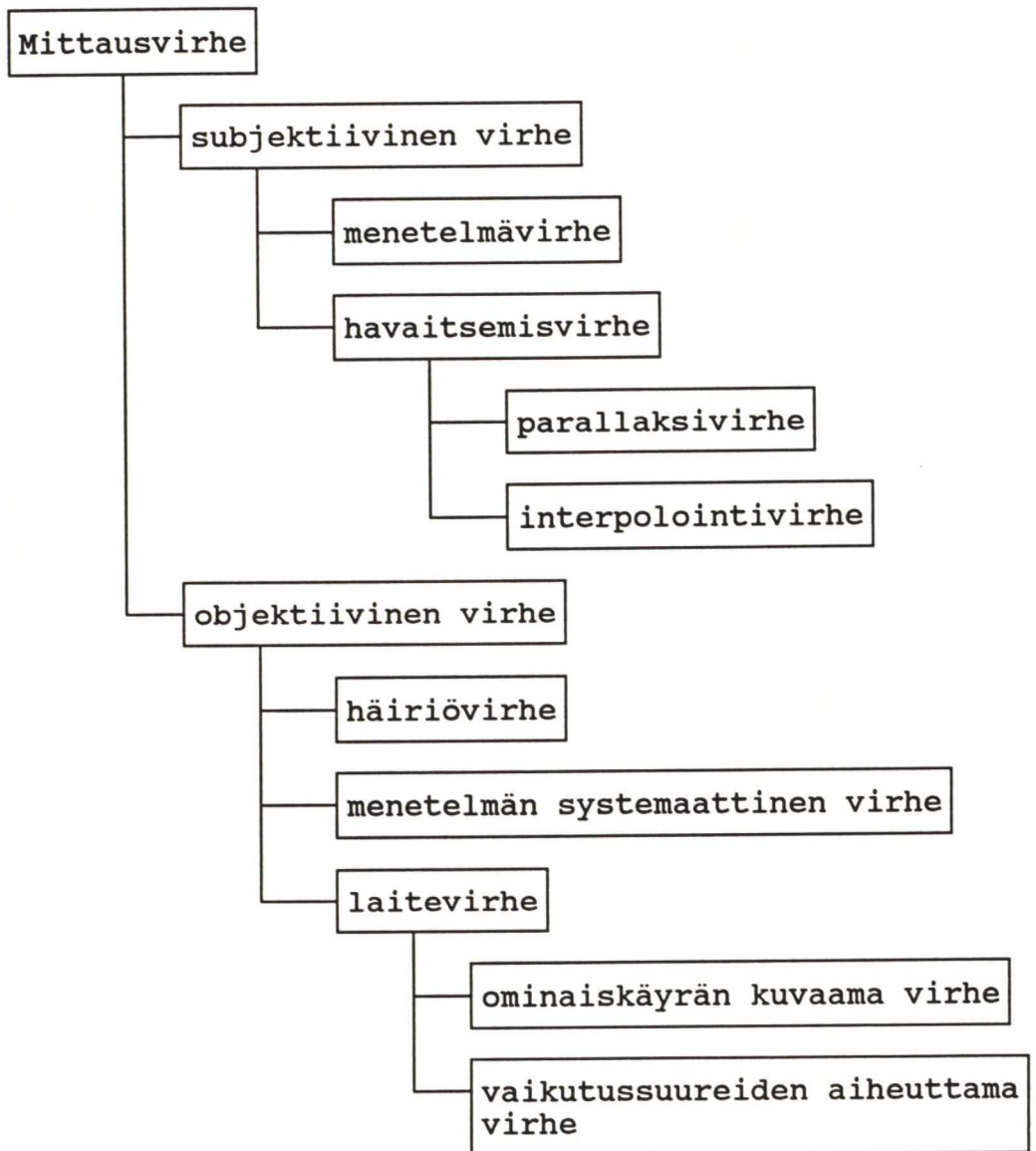
Mittausten tavallisimmat vaatimukset ovat tarkkuus, luotettavuus ja taloudellisuus. Mittaustarkkuudella on hyvin suuri merkitys testauksissa. Laitteiden ylimitoitusta on vältettävä, koska se tavallisesti kasvattaa materiaalikustannuksia. Liian alhaisten testausjännitteiden tai virtojen seurauksena laite ei välttämättä toteuta teknisiä vaatimuksia ja se voi rikkoutua sellaisissa tilanteissa, joita sen pitäisi kestää. Tästä voi taas seurata vaaratilanteita tai turhia sähkönjakelun keskeytyksiä.

Mittausten onnistumisen kannalta on tärkeää, että menetelmä soveltuu suureen mittaamiseen ja että ympäristön aiheuttamat häiriöt pysyvät kohtuullisina. Lisäksi mittausten valmistelu on tehtävä riittävän hyvin. Mittausten yleistä kulkua voi kuvata alla olevan vaihelistan avulla.

1. tehtävän määrittely
2. suoritusvaihtoehtojen etsiminen ja vertailu
3. tarkoituksenmukaisuuden tarkistus
4. virheen ennakoarviointi
5. mittalaitteiden tarkistukset ja kalibrointi
6. mittauksen suoritus
7. tulosten edustavuuden arviointi
8. tulosten käsittely, virheen jälkiarviointi
9. tulosten kelvollisuuden arvostelu
10. dokumentointi ja informointi [3].

2.2 Erilaiset virhetyypit

Kaikkien mittausvirheiden poistaminen on mahdotonta, mutta oikeilla toimenpiteillä voi erilaisten virhetyyppien määrää ja virheiden suuruutta pienentää. Kun virheen alkuperä tiedetään, voi olla mahdollista eliminoida se ainakin osittain. Tavallisimmat virheet aiheutuvat mittalaitteesta, mittausmenetelmästä, ympäristöolosuhteista ja mittaajasta. Virheiden mahdollisia aiheuttajia on havainnollistettu alla olevalla kuvalla, jossa eri tyyppiset virheet on jaoteltu aiheuttajansa mukaan.

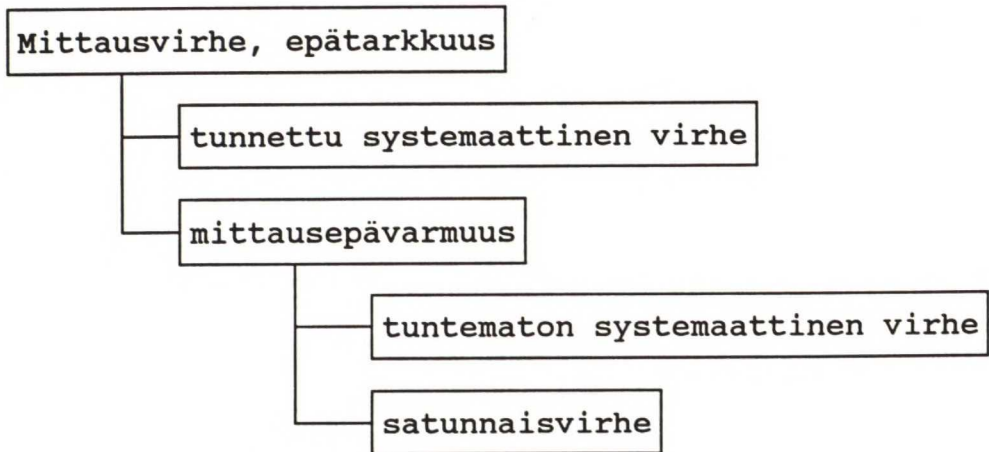


Kuva 1. Mittausvirhe aiheuttajansa mukaan [3].

Mittausvirheet voidaan edelleen jakaa esiintymistavan perusteella satunnaisiin ja systemaattisiin virheisiin. Satunnaisille virheille on tyypillistä, että poikkeama vaihtelee oikean arvon läheisyydessä summittaisesti, kun mittausta toistetaan samalla menetelmällä. Satunnaisvirheen vaikutusta mittaustulokseen ei voida poistaa. Tunnetut systemaattiset virheet voidaan sen sijaan korjata mittaustuloksesta, koska virhe poikkeaa oikeasta arvosta säännöllisesti samansuuntaisena ja -suuruisena, kun mittausta toistetaan menetelmää muuttamatta.

2.3 Mittausepävarmuus

Mittauksen epätarkkuudella tarkoitetaan sitä, että mittaustulos sisältää sekä systemaattiset virheet että satunnaiset virheet. Koska tunnetut systemaattiset virheet on pyrittävä korjaamaan, kutsutaan jäljelle jäävien virheiden muodostama kokonaisuutta mittausepävarmuudeksi.



Kuva 2. Mittausvirhe mittaustarkkuuden ilmaisemistavan mukaan [3].

Mittausepävarmuus tarkoittaa siis sitä, että virheiden suuruutta ei voida ennakoida. Koska virheet ilmenevät satunnaisesti, käytetään niiden arvioimiseen tavallisesti tilastollisia menetelmiä ja usein voidaan soveltaa ns. Gaussin normaalijakaumaa.

Gaussin jakauman esiintyminen monien ilmiöiden yhteydessä perustuu ns. todennäköisyyslaskun raja-arvolauseeseen: Jos satunnaissuureen x saama arvo koostuu hyvin monen toisistaan riippumattoman satunnaistekijän vaikutuksesta, on x :n jakauma likimain normaalin [3].

2.3.1 Kokonaisepävarmuuden määrittäminen

Oletetaan, että Y on funktio riippumattomista muuttujista X_i . Muuttujien X_i arvot ovat satunnaissuureita, joiden satunnaisuuden aiheuttaa esimerkiksi mittaustarkkuus ja joiden keskihajonnat ovat σ_i . [19]

$$Y = G(X_1, X_2, \dots, X_i) \quad (1)$$

Satunnaissuureen Y kokonaisdifferentiaali on dY .

$$dY = \sum \frac{\delta G}{\delta x_i} dx_i \quad (2)$$

Tästä edelleen voidaan laskea Y :n keskihajonnan neliö eli varianssi kaavalla (3).

$$\sigma_Y^2 = \sum \left(\frac{\delta G}{\delta x_i} \right)^2 \sigma_i^2 \quad (3)$$

Mittauksen kokonaisepävarmuus ϵ saadaan yhtälöstä (4).

$$\epsilon = k \cdot \sigma_Y \quad (4)$$

Kokonaisepävarmuuden luottamustaso riippuu kertoimen k arvosta. Tavallisesti käytetään arvoa $k=2$, mikä tarkoittaa Gaussin jakaumassa noin 95 %:n luottamustasoa.

2.3.2 Keskihajonnan laskeminen

Koska mittausten kokonaisepävarmuuden määrittämisessä tarvitaan eri epävarmuustekijöiden keskihajontoja, käsitellään seuraavaksi eräitä tavallisimpia menetelmiä laskea keskihajonnan σ kokeellinen vastine S .

Toistettavasti mitattava suure

Mittaussuure saattaa olla tyypiltään sellainen, että se on määritettävä kokeellisesti toisistaan riippumattomista mittauksista. Mittaustulosten keskiarvoa voidaan käyttää suureen "oikeana" arvona. Keskiarvon keskihajonnan neliö eli varianssi voidaan laskea kaavasta (6).

$$\bar{X}_i = \frac{\sum x_i}{n} \quad (5)$$

$$S_{xi}^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{X}_i)^2}{n(n-1)} \quad (6)$$

x_i on mittaustulos
 n on mittausten lukumäärä

Jotta laskettu mittaussarjan keskihajonta olisi luotettava, on riippumattomia mittauksia tehtävä useita. Mikäli mittausten lukumäärä on pieni, voi mittaustuloksista kaavalla (6) laskettu keskihajonta antaa liian pienen arvon. Siksi saatua keskihajontaa on korjattava taulukon 1 mukaisilla kertoimilla, jotka vastaavat 95 %:n luottamustason kertoimia.

Taulukko 1. Keskihajonnan kertoimet mittausten lukumäärän mukaan [42].

mittausten lukumäärä	kerroin k,
2	7,0
3	2,3
4	1,7
5	1,4
6	1,3
7	1,3
8	1,2
9	1,2
10 - ∞	1,0

Virherajat ilmoitettu muodossa $\pm d$

On melko tavallista, että mittalaitteen tarkkuus ilmaistaan prosenttilukuna. Virheen suuruutta ei silloin tunneta yksittäisessä mittauspisteessä, mutta virheen suuruuden maksimiarvo on tiedossa. Virheen tiheysfunktion voidaan olettaa silloin olevan tasaisesti jakautunut.

$$f(x) = \frac{1}{(b-a)} \quad a \leq x \leq b \quad (7)$$

Varianssi voidaan laskea tiheysfunktioista $f(x)$ yhtälön (8) mukaan.

$$s^2 = \int_a^b [x - (b+a)/2]^2 * f(x) dx = (b-a)^2/12 \quad (8)$$

Jos tiedetään, että virheen maksimiarvo on $\pm d$, voidaan keskihajonta S laskea kaavalla (9).

$$S = \frac{d}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

Toisistaan riippuvat muuttujat

Kahden suureen keskinäinen riippuvuus on otettava huomioon epävarmuuden laskemisessa. Niiden välinen korrelaatiokerroin r ilmaisee riippuvuussuhteen.

$$r = S_{ik} / S_{xi} * S_{xk} \quad (10)$$

S_{xi} ja S_{xk} ovat mittausarjojen keskiarvon keskihajonnat ja S_{ik} kovarianssi, joka lasketaan kaavalla (11).

$$S_{ik} = \Sigma (x_i - \bar{X}_i)(x_k - \bar{X}_k) / n(n-1) \quad (11)$$

Korrelaatiokerroin ilmaisee suureiden riippuvuuden. Tämän kertoimen itseisarvo on pienempi kuin yksi. Jos

- $r = 1$, suureet ovat täysin riippuvaisia
- $r = 0$, suureet ovat täysin riippumattomia
- $r = -1$, suureet ovat negatiivisesti täysin riippuvaisia.

Kertoimen r merkitsevyyttä voidaan testata laskemalla testisuure [19].

$$\frac{r\sqrt{(n-2)}}{\sqrt{(1-r^2)}}, \quad (12)$$

Testisuure on $t(n-2)$ -jakautunut satunnaissuure. Studentin-

jakauman taulukosta voidaan päätellä, poikkeako korrelaatiokerroin merkitsevästi nolasta.

Korrelaatiokertoimen arvo ei kuitenkaan ilmaise suureiden todellista riippuvuutta. Suuret voivat tilastollisesti näyttää riippuvan toisistaan, vaikka niiden esiintymisellä ei olisi välttämättä minkäänlaisia yhteyksiä. Esimerkiksi jäätelön kulutukselle ja hukkumistapauksille voitaisiin saada esille selvää korrelaatiota.

Edellä esiintyneessä kokonaisepävarmuuden lausekkeessa oletettiin muuttujien olevan toisistaan riippumattomia. Jos joillakin muuttujilla esiintyy keskinäistä riippuvuutta, tulee kaavaan (3) lisätermi. Muussa tapauksessa kokonaisepävarmuuden lausekkeeseen ei tule muutoksia.

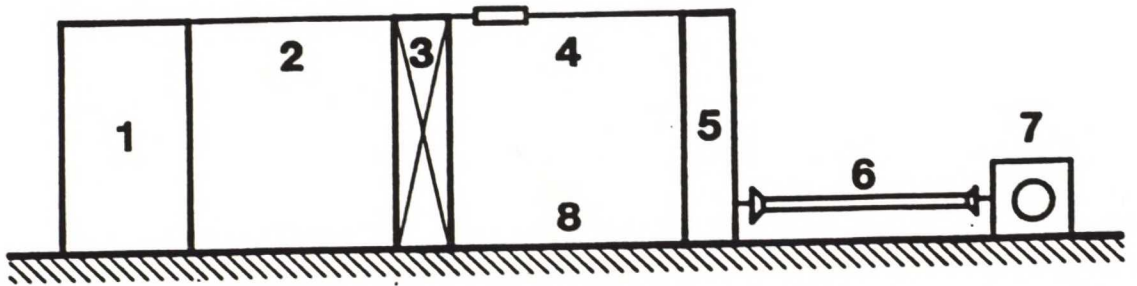
$$S_y^2 = \sum \left(\frac{\delta G}{\delta x_i} \right)^2 S_i^2 + \sum_{i \neq k} (\delta G / \delta x_i) * (\delta G / \delta x_k) * S_{ik}, \quad (13)$$

3 SALAMASYÖKSYJÄNNITEMITTAUS

3.1 Mittauksen epävarmuustekijät

3.1.1 Salamasyöksyjännitepiiri

Tässä työssä tutkitaan salamasyöksyjännitepiiriä, joka muodostuu kolmesta pääkomponentista. Ne ovat syöksyjännitelähde, koekappale ja mittauspiiri. Piirin pääosat on esitetty kuvassa 3.



1 syöksyjännitegeneraattori, 2 koekappaleen liitântä syöksyjännitegeneraattoriin, 3 koekappale, 4 mittauspiirin suurjänniteliityntäjohto, 5 jännitteenjakaja, 6 mittauskaapeli, 7 oskilloskooppi ja huippujännitemittari, 8 maadoitus

Kuva 3. Syöksyjännitepiirin pääosat.

Suurjännitelaboratoriossa syöksyjännite muodostetaan tavallisimmin Marxin generaattorilla. Suuri jännite saadaan aikaan siten, että varataan rinnakkain olevia suurjännitekondensaattoreita tasajännitteellä ja puretaan ne sitten sarjassa. Syöksyjännitteen suuruus riippuu lähes lineaarisesti varausjännitteestä. Syöksyjännitteen muotoa voidaan säätää muuttamalla generaattoriin sarja- ja rinnakkaisvastuksia.

Koekappaleen rinnalle liitetty mittauspiiri kuormittaa jonkin verran impulssigeneraattoria ja vaikuttaa siten mitattavaan jännitemuotoon. Käytännössä jännitteenjakaja on osa syöksyjännitegeneraattoria [24].

Vaikka syöksyjännitepiiri voidaan jakaa kolmeen osaan, ei osia voi käsitellä toisistaan riippumattomina. Syöksyjännitelähde ja koekappale vaikuttavat jännitteenjakajan ominaisuuksiin. Koska koejännitteiden arvot ovat useita satoja kilovoltteja, kasvavat eristysvälit ja siten koko syöksyjännitepiirin dimensiot suurenevat. Kun mittausjärjestelmä hajaantuu laajalle alalle, muodostuu eri osien välille haja- ja keskinäisimpedansseja. Tästä aiheutuvat dynaamiset virheet ovat sitä suuremmat, mitä nopeampi ilmiö on.

3.1.2 Mittauspiirin suurjänniteliityntä

Mittauspiiri liitetään koekappaleen rinnalle suurjänniteliityntäjohdolla. Jännitteenjakajan sijoittamista lähelle koekappaletta tai muita jännitteisiä rakenteita tulisi välttää. Jakajan läheisyydessä olevat kappaleet, joissa esiintyy transienttipotentiaaleja, aiheuttavat jakajan kentän vääristymistä ja vaikuttavat siten myös jakajan dynaamisiin ominaisuuksiin.

Toisaalta pitkien liityntäjohtimien käyttö on hankalaa, koska suurjännitelaboratorion koko asettaa johtimen pituudelle rajoituksia. Jakajan ja koekappaleen välillä esiintyvät heijastukset ja piirin hajaimpedanssien suurentuminen rajoittavat myös liityntäjohtoon pituutta.

Etäisyys koekappaleen ja jakajan välillä valitaan tavallisesti samaksi kuin jakajan korkeus. Jos syöksyjännite katkaistaan rinnalta, saattaa olla tarpeellista käyttää erityistä vaimennusvastusta värähtelyiden pienentämiseksi. Liityntäjohdolla esiintyvä korona saattaa myös muuttaa mittausjärjestelmän dynaamisia ominaisuuksia.

3.1.3 Resisttiivinen jännitteenjakaja

Koekappaleet testataan suurilla jännitteillä. Jännitteen suuruuden ja sen muodon mittaaminen on vaikea tehdä suoralla mittauksella. Siksi jännite muutetaan jännitteenjakajalla mittalaitteille sopivaksi.

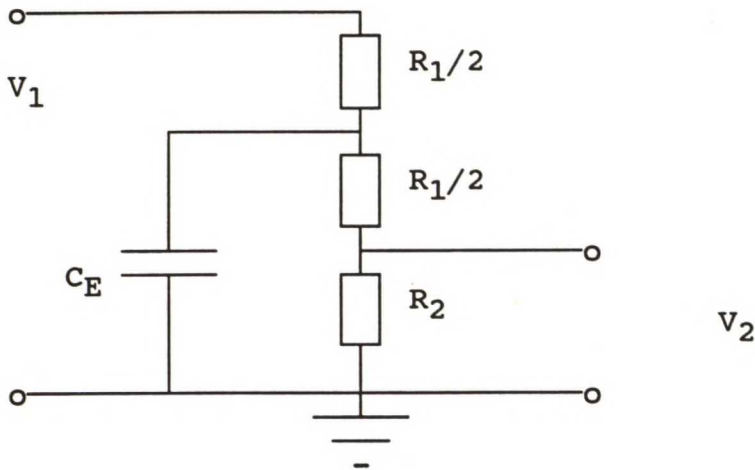
Jännitteenjakajat voidaan ryhmitellä kapasitiivisiin ja resisttiivisiin jakajiin sekä näiden kombinaatioihin.

Tutkittavassa mittauspiirissä käytetään resistiivistä jännitteenjakajaa, jonka ominaisuuksia tässä käsitellään.

Resistiivisen jakajan jakosuhte riippuu jakajan resistansseista. Sitä käytetään tavallisesti kokonaisten ja katkaistujen salamasyökyjännitteiden mittaamiseen. Kytkentäsyökyjännitteet kuormittavat jakajaa tavallisesti liian paljon. Koska resistiivistä jakajaa käytetään lyhytaikaisten jännitteiden mittaamiseen, on jakajan toistettava hyvin jännitteen nopeat muutokset.

Resistiivisen jakajan korkeus riippuu jakajan nimellisjännitteen suuruudesta. Salamasyökyjännitteellä se on likimain 2..2,5 m/MV [24]. Kun jakajan korkeus kasvaa, suurenee myös kokonaismaakapasitanssi (C_E), jonka arvo on noin 15-20 pF/m [9].

Yksinkertaisimmillaan resistiivistä jännitteenjakajaa voi kuvata RC-piirinä, joka muodostuu jakajan yläjänniteosan resistanssista R_1 ja jakajan kokonaismaakapasitanssista C_E . Jos maakapasitanssi oletetaan olevan keskitetty yläjänniteosan puoleen väliin, voidaan likimääräisesti laskea RC-piirin aikavakio τ kaavasta (14). [24]



Kuva 4. Resisttiivisen jakajan maakapasitanssi keskitettynä.

$$\tau \approx R_1 C_E / 4 \quad (14)$$

R_1 on jakajan yläjänniteosan resistanssi.
 C_E on keskitetty maakapasitanssin arvo, jolle voidaan käyttää arvoa $2/3 * C_e$ tai laskea kaavalla (15). Etäisyys maadoitettuun seinään on sama kuin jakajan korkeus. [36]

$$C_E \approx \frac{1,33 * \pi * \epsilon_0 * h}{\ln(1,54 * h/d)} \quad (15)$$

h on jakajan korkeus
 d on jakajan halkaisija
 ϵ_0 on tyhjiön dielektrisyysvakio

Aikavakiota τ voi siten lyhentää pienentämällä maakapasitanssia C_e tai jakajan yläjänniteosan resistanssia R_1 .

Kokonaismaakapasitanssia voidaan pienentää asettamalla jakajaan kentänohjauselektrodit. Koska jakajan korkeus kasvaa jännitteiden mukana, tulevat kentänohjauselektrodit suurilla jännitteillä epäkäytännöllisiksi [24].

Resistanssin pienentäminen kuormittaa syöksyjännitegeneraattoria. Lyhytaikaisilla jännitteillä resistiivinen kuormitus on siedettävää, jos generaattorin purkausvastuksilla pystytään sovittamaan kuormitus. Jännitteenjakajan resistanssin pienentäminen voi kuitenkin aiheuttaa ongelmia lämpenemän kanssa. Resistanssin lämpötilan nousu riippuu sekä resistanssin arvosta että jännitteen suuruuden neliöstä ja jännitteen aaltomuodosta. Koska jännitteen kesto-aika on lyhyt, ei lämpöä ehdi johtua juuri lainkaan ympärillä olevaan eristysmateriaaliin. Siksi energia varastoituu pelkästään resistanssiin, josta on seurauksena resistanssin lämpeneminen. Jakajan resistiiviselle materiaalille aiheutuu tästä rasitusta, jota erityisesti pieni-induktiivisten resistanssiyksiköiden on vaikea kestää. Siksi 1,5-2 MV suurempia resistiivisiä jännitteenjakajia, joiden resistanssin arvot ovat 10-20 k Ω , on vaikea valmistaa. [24]

Resistiivisen jakajan dynaamisia ominaisuuksia voivat muuttaa jakajan lähiympäristössä olevat jännitteiset tai maadoitetut rakenteet. Maadoitetun seinän läheisyyden on todettu suurentavan jakajan vastausaikaa, koska hajakapasitanssien vaikutus alkaa näkyä. Kun jakajan etäisyys maadoitetusta seinästä on yhtä suuri kuin jakajan korkeus, ei seinällä ole enää suurta vaikutusta.[36]

Syöksyjännite lämmittää resistiivistä jakajaa ja lämpenemä vaikuttaa resistanssin arvoon. Syöksyjännitteiden aiheuttaman absorboituneen energian voi laskea kaavan (16) mukaan.

$$W = \int_0^{t_2} \frac{U^2}{R} dt = \frac{V^2 T'}{R} \quad (16)$$

$$U = k \cdot V \cdot (e^{-t/a} - e^{-t/b})$$

V on jännitteen huippuarvo

T' on termin $[k \cdot (e^{-t/a} - e^{-t/b})]^2$ integraali välillä $[0, t]$

R on resistanssin arvo

Taulukko 2. Syöksyjännitteen kestoajan ja muodon vaikutus T':n.

aaltomuoto T ₁ /T ₂ (μs)	k	a	b	T' (μs) (t=5 μs)	T' (μs) (t=∞)
1,2/5	2,01	3,48	0,80	3,0	3,4
1,2/50	1,04	68,2	0,405	4,3	36,0
1,2/200	1,01	284	0,381	4,4	144,3
250/2500	1,17	2877	104	-	1764

Taulukon 2 perusteella nähdään, että kytkentäsyöksyjännitteen ja salamasyöksyjännitteen sisältämissä energioissa on suuri ero. Kun mitataan pelkästään rinnalta katkaistuja salamasyöksyjännitteitä, voidaan jakajan resistanssia pienentää, koska katkaistu syöksyjännite sisältää huomattavasti vähemmän energiaa kuin kokonainen. Syöksyjännitegeneraattorin latausenergia on silloin oltava suuri ja

aaltomuotoon vaikuttavien generaattorin etuvastuksien pieniä. [24]

Lämpötilan nousu resistanssissa voidaan laskea kaavasta (17).

$$\theta = \frac{W}{M\sigma} \quad (17)$$

W on resistanssiin varastoitunut energia

M on resistanssin massa

σ on resistanssin ominaislämpökapasiteetti

Lämpötilan nousun aiheuttama resistanssin arvon suhteellinen muutos lasketaan kaavasta (18).

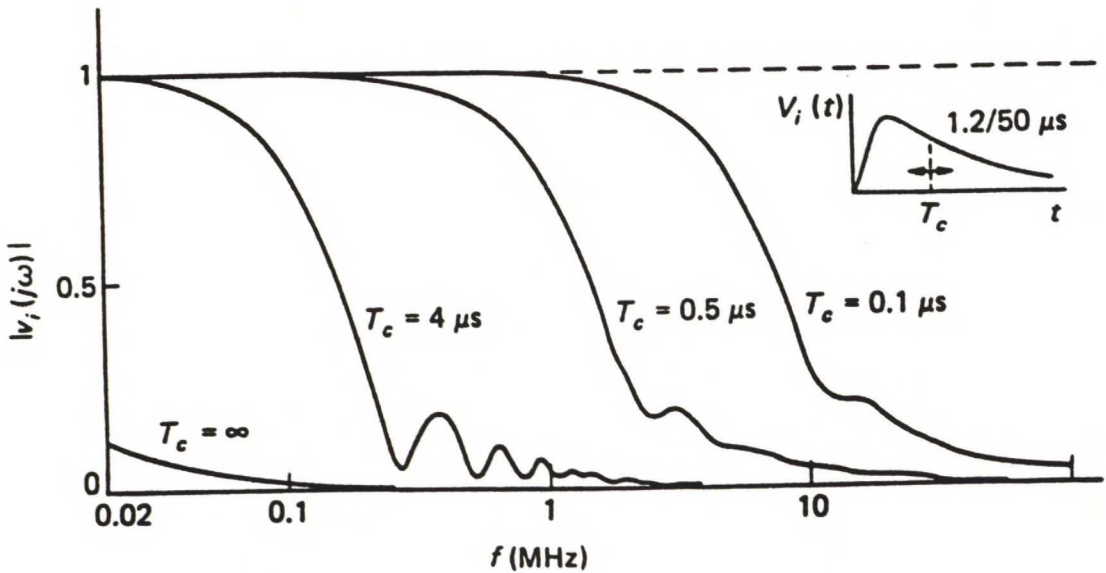
$$\frac{dR}{R} = \alpha_R \theta = \frac{\alpha_R W}{M\sigma} \quad (18)$$

α_R on resistanssin lämpötilakerroin

3.1.4 Dynaamiset ominaisuudet

Mittausjärjestelmän dynaamisia ominaisuuksia voidaan tutkia taajuusvastemittauksella. Taajuusvaste esitetään usein amplitudivasteen ja vaihevasteen avulla. Koska mittausjärjestelmän tehtävänä on toistaa mittaussuureen amplitudi ja sen aikariippuvuus oikein, on molemmilla mittauksilla merkitystä.

Amplitudivasteessa mitataan sinimuotoisen sisäänmeno- ja ulostulojännitteen amplitudien suhdetta. Mittausjärjestelmän dynaamista käyttäytymistä arvostellaan 3 dB:n raja-
taajuuksien avulla. Koska aikariippuvuuden muoto on myös tärkeä, on mittausjärjestelmän ylärajataajuuden oltava ainakin 10-kertainen mittaussuureen nopeimman komponentin taajuuteen nähden. Tämä perustuu siihen, että vaiheeseen aiheutuu merkittäviä muutoksia jo dekadia pienemmällä taajuudella kuin amplitudiin. [3]

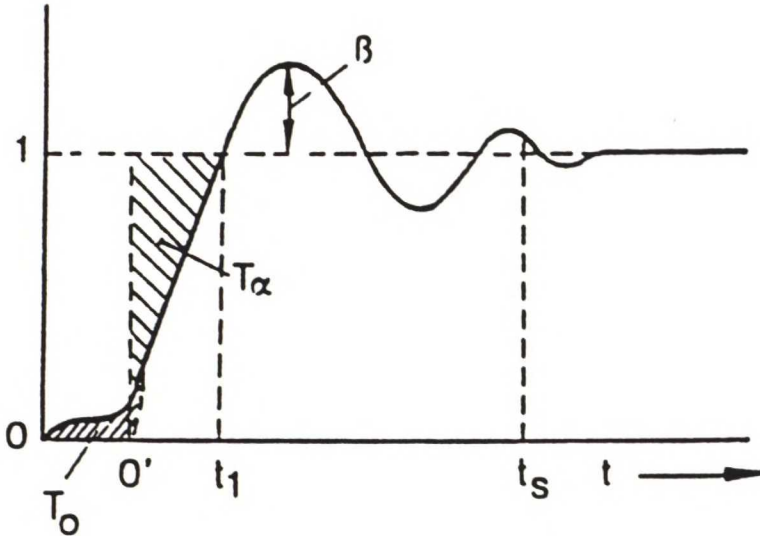


Kuva 5. Amplitudispektri (Fourier-muunnos) salamasyökyjännitteelle, joka on katkaistu hetkellä T_c [24].

Kuvasta 5 voidaan todeta, että kokonaisen salamasyökyjännitteen taajuusspektrissä amplitudit alkavat olla 0,5-1 MHz:n taajuuksilla merkityksettömän pieniä. Koska aikariippuvuuden muoto on myös tärkeä, olisi mittauspiirin ylärajataajuuden oltava 5-10 MHz. Kun jännite katkaistaan hetkellä $0,5 \mu s$, ulottuvat amplitudit spektrissä suurille taajuuksilla ja ylärajataajuuden olisi oltava jo lähes 100 MHz. Suurjännitemittauspiirin ylärajataajuuden saaminen tälle tasolle ei ole kuitenkaan mahdollista. [24]

Mittauspiirin kykyä toistaa nopeita jännitevaihteluita sekä näiden muutosilmiöiden tasaantumista voidaan tutkia askelvastemittausten avulla. Periaatteena on syöttää mittauspiiriin askeljännite ja mitata mittauspiirin vääristämä ulostulo. Askelvastemittauksissa on pyrittävä käyttä-

mään samanlaista mittausjärjestelyä kuin normaalissa testaustilanteessa. Käytännössä mittauspiiri ei ole täysin samanlainen. Koska mittaus tehdään vain noin sadan voltin jännitteellä, ei sellaisia ilmiöitä saada esille, jotka esiintyvät erityisesti suurilla jännitteillä.



Kuva 6. Värähtelevä askelvaste.

Jos askelvaste pystyttäisiin mittaamaan tarkasti, olisi mittauspiirin aiheuttamat virheet mahdollista korjata käännteiskonvoluutiomenetelmällä. Menetelmän hyödyntämisessä on käytännössä ollut ongelmia. Konvoluutiosimuloinneilla on tutkittu askevesteparametrien ja mittausvirheiden välisiä riippuvuuksia. Tuloksia on käsitelty liitteessä 3.

Tavallisesti tyydytään määrittelemään mittauspiirin askelvasteesta parametreja, jotka kuvaavat mittauspiirin ominaisuuksia ja joille saatetaan asettaa raja-arvoja. Tässä yhteydessä esitetyt askelvesteparametrit perustuvat standardiehdotukseen [17].

Vastausaika (response time) T

$$T = \int_0^t [1 - g(t)] dt \quad (19)$$

Kokeellinen vastausaika (experimental response time) T_n

$$T_n = T(t_{\max}) \quad (20)$$

Alkuvääristymäaika (initial distortion time) T_0 on pinta-ala, jota rajoittavat askelvasteen rinnan jyrkimmän kohdan tangentti, askelvaste ja nolllataso.

Osavastausaika (partial response time) T_α

$$T_\alpha = T(t) \quad (21)$$

Tavallisesti lasketaan $T_\alpha = T(t_1)$. Muuttuja t_1 on se aika, jolloin askelvaste ensimmäisen kerran ylittää tason yksi.

$$T_\alpha = \int_{0_1}^{t_1} [1 - g(t)] dt \quad (22)$$

Jäännösvastausaika (residual response time) $T_R(t_i)$

$$T_R(t_i) = T_n - T(t_i) \quad (23)$$

Jos jäännösvastausaika lasketaan arvolla $t_i = t_1$, saadaan

$$T_R(t_1) = T_n - T_\alpha \quad (24)$$

Asettumisaika (settling time) T_s

$$0,02 * T_s \geq \left| \int_{T_s}^{t_{\max}} [1 - g(t)] dt \right| \quad (25)$$

Askelvasteen ylitys (overshoot) β

$$\beta = \hat{g} - 1 \quad (26)$$

Standardiehdotuksen [17] mukaan mittauspiirin dynaamista käyttäytymistä voidaan tutkia askelvastemittauksilla. Askelvaste on mitattava pisimmän puoliarvonajan pituiselta jaksolta ja askelvasteen tulisi pysyä aivan vasteen alkua lukuunottamatta lähes vakiona. Lisäksi kokonaisen syöksyjännitteen mittaamisessa askelvasteen ylityksen β , osavastausajan T_α ja rinnannousuajan T_1 määrittämisen pisteen on oltava liitteessä 3 esitetyn kuvan L3.2 viivoitetulla alueella.

Mittausjärjestelmän tulee toistaa riittävän hyvin syöksyjännitteen rinnalla tai huipulla esiintyvä värähtely. Standardiehdotuksen [17] mukaan ylärajataajuuden (f_2) tai askelvasteen osavastausajan (T_α) on täytettävä seuraavat ehdot:

- $f_2 \geq 5$ MHz tai $T_\alpha \leq 30$ ns, värähtelyt aallon huipulla
- $f_2 \geq 10$ MHz tai $T_\alpha \leq 15$ ns, värähtelyt aallon rinnalla

Rinnalta katkaistun syöksyjännitteen mittauksessa on hyväksytyn mittausjärjestelmän askelvasteparametrien T_n , T_α ja T_o toteutettava seuraavat ehdot :

- $T_s \leq T_c$
- $T_\alpha - 0,03 \cdot T_c \leq T_n \leq 0,03 \cdot T_c$
- $T_o \leq 0,005 \cdot T_c$

Vertailumittausjärjestelmälle on edellä esiintyneille parametreille lisävaatimuksia. Sulkeissa esiintyvät arvot vaaditaan, kun mitataan rinnalta katkaistua syöksyjännitettä.

- $T_n \leq 15$ ns (10 ns)
- $T_s \leq 200$ ns (150 ns)
- $T_\alpha \leq 30$ ns (20 ns)
- (- $T_o \leq 2,5$ ns)

3.1.5 Mittauskaapeli

Oskilloskooppi tai huippujännitemittari liitetään jännitteenjakajan alajännitepuolelle tavallisesti koaksiaalisella mittauskaapelilla. Turvallisuuden ja häiriösuojauksen vuoksi mittalaitteita ei voi sijoittaa kovin lähelle testausaluetta. Mittauskaapelin pituus voikin olla jopa kymmeniä metrejä.

Kun mittauskaapeli on pitkä, voi mitattavan signaalin sisältämien korkeimpien taajuuksien aallonpituudet olla lähellä kaapelin pituutta. Tästä on seurauksena se, että mittauskaapelia ei voida pitää enää keskitettynä komponenttina, vaan sitä on käsiteltävä siirtojohtona. Signaalin käyttäytyminen kaapelin liitoskohdissa riippuu silloin kaapelin aaltoimpedanssista ja kaapeliin liitetystä resistanssista.

Kaapelin aaltoimpedanssi Z määritellään kaavan (27) mukaan.

$$Z = \frac{\sqrt{(R+j2\pi fL)}}{\sqrt{(G+j2\pi fC)}} \quad (27)$$

Jos vaimennus on pieni ($R \ll 2\pi fL$, $G \ll 2\pi fC$) ja aaltoimpedanssi on reaalinen, on likimääräisesti voimassa $R/L = G/C$ ja yhtälö (27) voidaan sieventää.

$$Z = \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{C}} \quad (28)$$

Kun syöksyjänniteaalto kohtaa rajapinnan, osa aallosta jatkaa matkaa ja osa heijastuu takaisin.

$$\text{Läpäisykerroin } \tau = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (29)$$

$$\text{heijastuskerroin } \delta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (30)$$

Mittauskaapeli olisikin sovitettava toisesta tai molemmista päistä, jotta vältettäisiin kaapelin päissä syntyvät heijastumiset. Sovitus voidaan tehdä puhtaalla resistanssilla, jonka suuruus on sama kuin mittauskaapelin aaltoimpedanssi.

Sovitus voi olla vaikea saada onnistumaan täydellisesti, koska mittauskaapelin aaltoimpedanssi riippuu myös taajuudesta. Syynä on kaapelin induktanssin muuttuminen suuremmilla taajuuksilla. Ilmiötä kutsutaan virran ahtautumiseksi (skin effect). Sama ilmiö kasvattaa myös kaapelin resistiivisiä häviöitä.

Koska mittauskaapelin sovitukset on vaikea tehdä täydellisesti, heijastuu syöksyjänniteaalto kaapelin molemmista päistä, mistä aiheutuu jännitemuodon vääristymistä. Jos kaapeli on häviötön ja aallon kulku-aika on kaapelissa paljon lyhyempi kuin aallon nousuaika, mittalaitteelle tulevan jännitteen huippuarvo voidaan laskea kaavan (31) mukaan. (Alaindeksi 1 viittaa kaapelin loppupäähän, jossa ensimmäiset heijastukset tapahtuvat, ja alaindeksi 2 kaapelin alkupäähän.)

$$U_1 = U * (\tau_1 + \delta_1 \delta_2 \tau_1 + (\delta_1 \delta_2 \tau_1)^2 + \dots) \quad (31)$$

Mittauskaapeli ei ole koskaan täysin häviötön. Pienihäviöissä kaapelissa syöksyjänniteaalto etenee kaapelissa kaavan (32) mukaan. Syöksyjänniteaalto vaimenee eksponentiaalisesti riippuen kertoimesta α .

$$U * e^{-(\alpha + \beta j)} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \alpha + \beta j &= \sqrt{[(R + j2\pi fL) * (G + j2\pi fC)]} \\ &= j2\pi f / (LC) * \sqrt{[1 - RG / (2\pi f)^2 LC] + G / j2\pi fC + R / j2\pi fL} \\ &\approx GZ/2 + R/2Z + j2\pi f / (LC) \end{aligned} \quad (33)$$

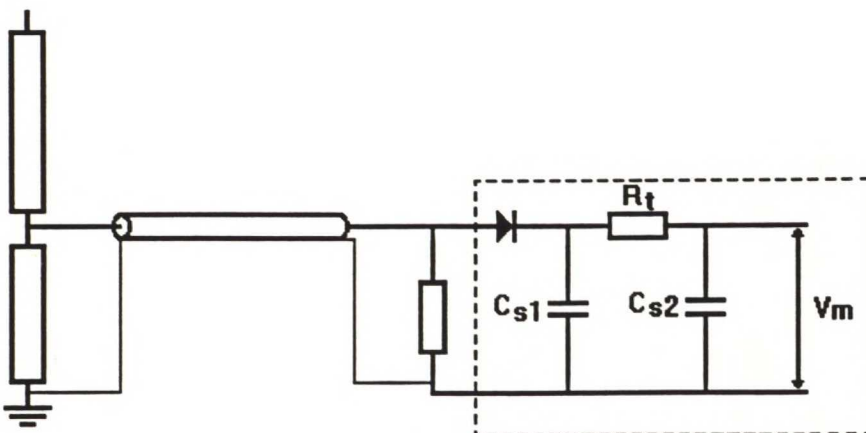
Jännitteen vaimentuminen ei ole kuitenkaan vakio kaikilla taajuuksilla. Koaksiaalikaapelissa etenevän jänniteaallon vaimeneminen eri taajuuksilla voidaan laskea yhtälöstä (34) (Tekniikan käsikirja 3, s.323).

$$2,4*/f(\text{MHz}) \text{ dB/km}, f \geq 200 \text{ kHz} \quad (34)$$

3.1.6 Mittalaitteet

3.1.6.1 Huippujännitemittarit

Huippujännitemittarin yksinkertaistettu rakenne on esitetty kuvassa 7. Laitteen toiminta perustuu siihen, että jännitteen huippuarvo varautuu diodin D kautta ensin kapasitanssiin C_{S1} . Varauksesta suurin osa siirtyy edelleen paljon suurempaan kapasitanssiin C_{S2} . Kapasitanssien välissä olevan vastuksen R_t on oltava pienempi kuin diodin takaisinkytkentäresistanssin. Kapasitanssi C_{S1} ei menetä paljoakaan varaustaan purkauksena diodin kautta, koska suurin osa varauksesta siirtyy kapasitanssiin C_{S2} lyhyessä ajassa. Lisäksi varauksen siirtymisen jälkeen kapasitanssit kytkeytyvät rinnan, jonka seurauksena diodin kautta tapahtuvan purkauksen aikavakio kasvaa. Koska C_{S2} on paljon suurempi kuin C_{S1} , on piirin ulostulojännite (V_m) pienentynyt huomattavasti. Ulostuloa joudutaan tavallisesti vahvistamaan joko digitaalielektronikalla tai operaatiovahvistimilla. [24]



Kuva 7. Diodihuippuvolttimittarin yksinkertainen piiri.

Koska huippujännitemittarin mittausalue saattaa ulottua sadoista volteista kilovoltteihin, olisi myös mittarin kalibrointi tehtävä useilla jännitetasoilla. Mittarin sisäinen kalibrointijännite voi osoittautua täysin riittämättömäksi [2]. Standardin [18] mukaan huippujännitemittarin kokonaisvirhe ei saa ylittää kahta prosenttia.

3.1.6.2 Digitaaliset mittalaitteet

Digitaalisilla mittalaitteilla on monia etuja verrattuna analogisiin. Lukemisvirhettä ei synny, eikä mittarin asento vaikuta tulokseen. Lisäksi mittaustulosten digitaalinen muoto mahdollistaa tulosten käsittelyn tietokoneella.

Digitaalisen mittalaitteen resoluutio riippuu A/D-muunnoksessa käytettyjen bittien lukumäärästä. Resoluutiosta aiheutuvan suhteellisen virheen suurin arvo täydellä näyttämällä saadaan kaavasta (35).

$$\pm 0,5 * \text{LSB} = \pm 2^{-(N+1)} \quad (35)$$

LSB on vähiten merkitsevä bitti (least significant bit)

N on A/D-muunnoksessa käytettyjen bittien lukumäärä

Digitaalisen mittalaitteen resoluutio riippuu signaalin muodosta ja sen muutosnopeudesta. Digitaalisten mittalaitteiden resoluutio olisikin selvempää ilmaista tehollisten bittien EB (effective bits) arvona, joka riippuu mitattavan signaalin taajuudesta [39].

Todellisessa A/D-muunnoksessa esiintyy offset-, vahvistus- ja lineaarisuusvirheitä, joiden vaikutuksesta todellinen tarkkuus saattaa olla huomattavasti huonompi kuin mitä resoluution perusteella voisi päätellä. Offset-virheen vaikutus näkyy siten, että muunnosfunktion kuvaaja ei kulje nollan kautta. Vahvistusvirhe ilmenee kulmakertoimen erona ideaalisen ja muunnosfunktion välillä. Epälineaarisuuden takia muunnosfunktion portaat eivät ole täysin saman levyisiä. Jos mitattavan signaalin muutosnopeus (dV/dt) on suuri, saattaa A/D-muunnoksessa esiintyä suurempia epäide-

aalisuuksia. A/D-muunnoksen virheet esiintyvät samanaikaisesti ja vaihtelevat sekä ajan että lämpötilan funktioina.

Koska A/D-muunnoksessa poimitaan analogisesta jatkuvasta signaalista tietyin välein pisteitä kuvaamaan mitattavaa signaalia, riippuu signaalin oikeamuotoisuus myös näytteenottotaajuudesta. Näytteenottotaajuutta voidaan pitää tavallisimmin riittävänä, jos mittauspisteitä saadaan yli kolmekymmentä sellaiselta aikaväliltä, joka määrittelee jonkin aikaparametrin [32]. Tämä on mainittu myös IEC 1083-1 standardissa, joka käsittelee digitaalisten mittalaitteiden käyttöä suurjänniteteesteissä.

Salamasyöksyjännitteen rinnannousuajan (T_1) määrittämisessä käytetään apuna ajanhetkiä, jolloin jännite on 30 % ja 90 % huippuarvosta. Rinnannousuaika saadaan yhtälöstä (36).

$$T_1 = 1,67 * (T_{90} - T_{30}) \quad (36)$$

Mitattaessa $1,2/50 \mu\text{s}$ salamasyöksyjännitteen aikaparametreja on näytteenottotaajuuden siten oltava suurempi kuin 42 MHz. Suurempaa näytteenottotaajuutta vaaditaan standardin (IEC 1083-1) mukaan silloin, kun mitataan värähtelyä syöksyjännitteen rinnalta. Näytteenottotaajuus on oltava kahdeksan kertaa suurempi kuin piirissä esiintyvä maksimitaajuus. Standardiehdotuksessa [17] on mittausjärjestelmän ylärajataajuudelle esitetty 10 MHz:n vaatimus. Tätä arvoa käyttäen on näytteenottotaajuuden oltava siten vähintään 80 MHz.

3.1.7 Sähkömagneettiset häiriöt ja maadoitus

Syöksyjännitemittaukset asettavat suuria vaatimuksia mittalaitteiden häiriönsietokykyyn. Kun syöksyjännite sytytetään impulssigeneraattorissa tai kipinäväli katkaisee jännitteen, syntyy suuria ja nopeasti vaihtelevia sähkömagneettisia kenttiä. Testausalueilla on mitattu 5..50 kV/m sähkökenttiä ja 1..2 A/m magneettikenttiä. Suuret sähkömagneettiset kentät saattavat aiheuttaa häiriöitä, jotka tunkeutuvat mittausjärjestelmään tai kerrostuvat mitattavan signaalin päälle. Häiriöiden pääasialliset siirtymistavat ovat [44]:

- Kaapelin vaipassa kulkeva häiriövirta syntyy pääasiallisesti sähkömagneettisten kenttien aiheuttamasta induktiosta. Myös osa jakajan kautta kulkevasta virrasta voi päästä kaapelin vaippaan, jos jakaja on maadoitettu suurella impedanssilla. Lisäksi kapasitiivinen kytkentä suurjännitepiirin ja mittauskaapelin vaipan välillä voi indusoida virtoja vaippaan. Vaipassa kulkevan virran aiheuttama jännitteenalenema ja keskusjohtimeen indusoitunut jännite kerrostuvat mittaussignaaliin aiheuttaen häiriöitä.
- Jakelumuuntajan käämiin voi kapasitiivisesti siirtyä häiriöitä, jotka edelleen kulkeutuvat tallentavaan mittalaitteeseen verkkojohdon kautta.
- Sähkömagneettiset häiriökentät tunkeutuvat suoraan mittalaitteen kotelon tai kaapelin vaipan läpi indusoiden kohinaa.
- Hyvin suuritaajuiset sähkömagneettiset kentät kulkevat ilman kautta syöksyjännitegeneraattorilta jakajalle ennen syöksyjännitettä aiheuttaen häiriöitä.

Häiriöiden tyypillisiä ominaisuuksia ovat [1]:

- jännitteen suuruus noin 100 V...3 kV
- taajuusspektri 20 kHz...100 MHz
- yksittäisiä tai toistuvia transientteja hyvin erilaisilla päätaajuuksilla
- transienttien kesto aika joitakin mikrosekunteja
- nousuaika 10...100 ns.

Mittalaitteiden sisältäessä entistä enemmän elektroniikkaa korostuu häiriösuojauksen merkitys. Yksinkertaisin tapa suojata mittalaite häiriöiltä on viedä laite riittävän kauaksi häiriölähteestä tai varustaa laite erityisellä suojakuorella, joka vaimentaa sekä sähkö- että magneettikenttiä. Sähköverkosta tulevia häiriöitä voidaan pienentää käyttämällä erotusmuuntajaa ja erityistä suodatinta. Mittauskaapelina olisi hyvä käyttää sellaista kaapelia, jossa on kaksi tai useampia vaippajohtimia.

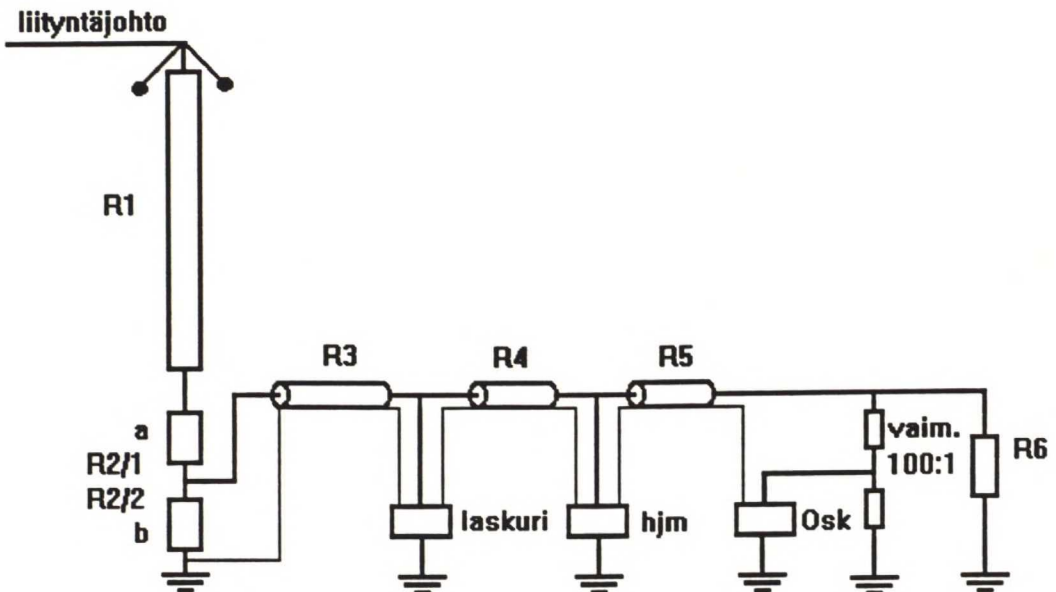
Häiriöt voivat olla peräisin myös laboratorion ulkopuolelta. Mittauskaapeli tai muu metallinen rakenne toimii kuten antenni. Laboratorion metalliset seinät saattavat käyttäytyä antennimaisesti ja poimia radioaaltoja ulkopuolelta ja lähettää ne edelleen laboratorion sisäpuolelle.[11]

Sähkömagneettisten kenttien lisäksi häiriötä aiheuttaa puutteellinen maadoitus, jolloin häiriöjännite kerrostuu mitattavaan jännitteeseen. Maadoittamalla mittauspiiri vain yhdestä pisteestä voidaan pienentää häiriövirtoja, mutta tämä ei ole välttämättä aina paras ratkaisu. Mittauskaapelin maadoittaminen molemmista päistä saattaa joissakin tapauksissa jopa pienentää häiriöitä. Kahden pisteen maadoittaminen on lisäksi turvallisempaa. Yleensä pitkiä maadoitussilmukoita tulisi välttää. Jännitteenjakajan maadoittaminen tulisi tehdä mahdollisimman lyhyellä ja paksulla kaapelilla, jotta maadoitusimpedanssi saataisiin pieneksi. Syöksyjännitegeneraattorin sekä mittalaitteiden sähkönsyöttöön tulisi käyttää erotusmuuntajia. [21,44]

3.2 Mittauspiirin kokeellinen tutkiminen

Koska mittauspiirin teoreettinen tarkastelu on vaikeaa, tutkittiin mittauspiirin käyttäytymistä myös kokeellisesti. Mittauspiiriä tutkittiin kokeellisesti standardiehdotuksen [17] mukaan. Mittauksia täydennettiin vertailumittauksella erään toisen samankaltaisen mittauspiirin kanssa, jolle suoritettiin joitakin samoja mittauksia kuin tutkittavalle mittauspiirille. Vertailumittausjärjestelmä koostui resistiivisestä jännitteenjakajasta (Haefely 1 MV), mittauskaapelista ja päätevastuksesta.

Tutkittava mittauspiiri koostuu komponenteista, jotka on esitetty kuvassa 8.



- R1 jännitteenjakajan yläjänniteosan resistanssi
- R2 jännitteenjakajan alajänniteosan resistanssi
- R3 mittauskaapeli, pituus 30 m.
- R4 mittauskaapelin jatko, pituus 2 m
- hjm huippujännitemittari
- R5 mittauskaapelin jatko, pituus 2 m
- vaim. vaimennin 100:1
- osk oskilloskooppi (tai transienttitallennin)
- R6 mittauskaapelin päätevastus

Kuva 8. Mittauspiirin periaatteellinen kytkentäkaavio.

Mittauspiiriä käytetään kokonaisten ja katkaistujen maksimissaan 600 kV:n suuruisien salamasyöksyjännitteiden mittaamiseen. Jännitteenjakaja on tyypiltään resistiivinen. Jakajan yläjänniteosan materiaali on konstantaanilanka, joka on käämitty pifilaarisesti. Jännitteenjakajalla käytetään kahta erilaista alajänniteosaa. Jännitemittausalueet ovat 30..340 kV alajänniteosalla 1 ja 100..600 kV alajänniteosalla 2 .

Kokonaisilla syöksyjännitteillä jännitteen huippuarvo luetaan huippujännitemittarilta ja aaltomuoto oskilloskoopilta. Rinnalta katkaistuilla syöksyjännitteillä huippujännitemittarin nopeus ei ole riittävä ja siksi on käytettävä digitaalista transienttitalenninta. Oskilloskoopille (tai tallentimelle) tuleva jännite täytyy vaimentaa, koska mittalaitteella mitattava jännite saa olla korkeintaan kymmeniä voltteja.

Heijastuksien välttämiseksi mittauskaapeli on sovitettu oskilloskoopin puoleisesta päästä puhtaalla resistanssilla, jonka arvo vastaa mittauskaapelin aaltoimpedanssia.

3.2.1 Jakosuhte

Mittauspiirin jakosuhteen määrittämiseksi mitattiin kaikkien mittauspiiriin kuuluvien osien resistanssit. Mittaukset tehtiin Tettex 2205 vastussillalla. Yläjänniteosan resistanssin mittaamisessa käytettiin Wheatstonen siltamittausperiaatetta ja muilla resistansseilla Thomsonin siltamittausperiaatetta. Mittaussilta tasapainotettiin herkän galvanometrin avulla.

Vastussillalla mitataan vuosittain kalibroituja tarkkuusvastuksia, joiden arvojen epävarmuus on pienempi kuin 0,01 %. Tarkistuspöytäkirjan mukaan mitatut arvot ovat poikenneet vähemmän kuin 0,03 % tarkkuusvastusten arvoista. Galvanometrin lukemavirheestä, mittalaitteen resoluutiosta ja itse mittauksetapahtumasta arvioidaan aiheutuvan 0,06 %:n virhe. Kun virheet lasketaan yhteen, saadaan virheen suurin mahdollinen arvo. Resistanssien mittausten suurimman virheen arvioidaan siten olevan 0,1 %. Mittauskaapelin ja sen jatko-osien resistanssien tarkkuudet on määritetty viimeisen merkitsevän numeron mukaan.

Taulukko 3. Mittausjärjestelmien osien resistanssit ja niiden arvioidut tarkkuudet.

Resistanssi	TMJ (Ω)	VMJ (Ω)
R1	10335 \pm 10	7844 \pm 8
R2/1 a	0	-
R2/2 a	60,54 \pm 0,06	-
R2/1 b	71,08 \pm 0,07	12,50 \pm 0,01
R2/2 b	11,98 \pm 0,01	-
R3	0,294 \pm 0,001	1,335 \pm 0,001
R4	0,052 \pm 0,001	-
R5	0,138 \pm 0,001	-
R6	73,35 \pm 0,07	75,54 \pm 0,07

TMJ on tutkittava mittausjärjestelmä
VMJ on vertailumittausjärjestelmä

Jakosuhte huippujännitemittarilla voidaan laskea kuvan 8 mukaisesta kytkentäkaaviosta. Koska mittalaitteiden resistanssit ovat hyvin suuria ($\geq 0,5 \text{ M}\Omega$), ei niillä ole vaikutusta jakosuhteen arvoon. Sijoittamalla resistanssien arvot yhtälöön (38) saadaan jakosuhteeksi 287,7 alajänniteosalla 1 ja 1014 alajänniteosalla 2.

$$F = \left(\frac{Ry + \frac{Ra1 \cdot Ra2}{Ra1 + Ra2}}{\frac{Ra1 \cdot Ra2}{Ra1 + Ra2}} \right) * \left(\frac{R3 + R4 + R5 + R6}{R5 + R6} \right) \quad (37)$$

$$= \left(1 + \frac{Ry}{Ra1} + \frac{Ry}{Ra2} \right) * \left(1 + \frac{R3 + R4}{R5 + R6} \right) \quad (38)$$

$$\begin{aligned} Ry &= R1 + R2/1 \text{ a} = 10335 \pm 10 \Omega && \text{alajänniteosa 1} \\ &R1 + R2/2 \text{ a} = 10396 \pm 11 \Omega, && \text{alajänniteosa 2} \\ Ra1 &= R2/1 \text{ b} = 71,08 \pm 0,07 \Omega && \text{alajänniteosa 1} \\ &R2/2 \text{ b} = 11,98 \pm 0,01 \Omega, && \text{alajänniteosa 2} \\ &6 \\ Ra2 &= \sum_{n=3} Rn = 73,834 \pm 0,08 \Omega \end{aligned}$$

Salamasyöksyjännitteen aikaparametrit ja rinnalta katkaiset jännitteet mitataan oskilloskooppilla tai transienttitalentimella, joka on mittauskaapelin päässä. Jakosuhteen arvo voidaan laskea yhtälöstä (39). Tuloksiksi saadaan 288,3 ja 1016. Vertailumittausjärjestelmän jakosuhte voidaan laskea samalla kaavalla, jolloin tulokseksi saadaan 743.

$$F = \left(1 + \frac{R_y}{R_{a1}} + \frac{R_y}{R_{a2}}\right) * \left(1 + \frac{R_3 + R_4 + R_5}{R_6}\right) \quad (39)$$

3.2.2 Askelvaste

Askelvastemittaus tehtiin tutkittavalle mittauspiirille jännitteenjakajan molemmilla alajänniteosilla. Askeljännitelähteenä käytettiin Tektronix pulssigeneraattoria. Se asetettiin maadoitetulle seinälle jakajan yläpään korkeudelle ja liitettiin halkaisijaltaan 34 mm olevalla messinkiputkella jännitteenjakajaan. Pulssigeneraattorin etäisyys jakajasta oli sama kuin jakajan korkeus. Askeljännitteen suuruus oli noin 40 V ja nousuaika alle 2 ns. Askelvaste mitattiin digitaalisella transienttitalentimella, jonka näytteenottotaajuus on 200 MHz ja resoluutio 10 bittiä. Mittauspiiri oli samanlainen kuin normaalissa testaustilanteessa, mutta tallentimella ei voitu käyttää vaimenninta, koska mitattava jännite olisi laskenut liikaa.

Vertailumittauspiirin mittausjärjestelyt pyrittiin pitämään samanlaisina kuin tutkittavan mittauspiirin. Koska vertailujakaja oli kuitenkin korkeampi kuin tutkittavan mittauspiirin jakaja, oli pulssigeneraattorin ja jakajan välinen etäisyys suurempi.

Askelvasteparametrit määritettiin kahden mittauksen perusteella. Parametrit laskettiin basic-ohjelmalla luvussa 3.1.4 esitettyjen kaavojen mukaan. Parametrit T_α ja T_R on laskettu sen hetken mukaan, kun askelvaste ensimmäisen kerran ylittää tason yksi.

Askelvasteparametrien arvoihin vaikuttaa eniten asettumistason valinta. Koska askeljännitteen kesto aika oli vain noin 500 ns, ei asettumistaso ole valittu välttämättä oikein. Vasteen värähtely vaimentui kuitenkin nopeasti,

mikä näkyy lyhyenä asettumisaikana T_S . Tästä pääteltynä ei pulssin lyhyestä kestoajasta aiheudu suurta virhettä. Lisäksi vertailumittauspiirin kokeellinen vastausaika ja osavastausaika vastasivat valmistajan antamia arvoja.

Mittaustuloksista voidaan tehdä ainakin yksi varma johtopäätös. Tutkittava mittauspiiri toistaa huomattavasti paremmin nopeita jännitteenmuutoksia kuin vertailumittauspiiri.

Taulukko 4. Askelvasteesta lasketut parametrit.

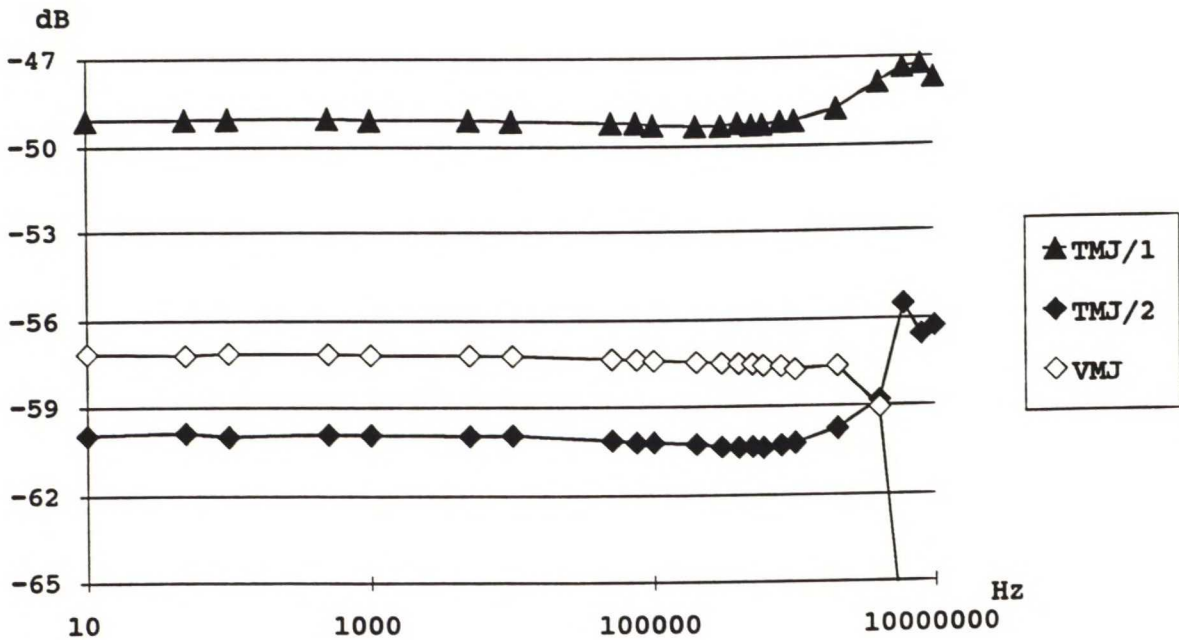
askelvaste- parametrit	TMJ /1	TMJ /2	VMJ
T_N (ns)	1	-9	44
T_O (ns)	< 1	< 1	< 2
T_α (ns)	7	4	51
T_R (ns)	-6	-13	-7
T_S (ns)	140	140	190
β (%)	21	53	11
nousuaika (ns)	13	8	84

TMJ /1 on tutkittava mittauspiiri alajänniteosalla 1.
 TMJ /2 on tutkittava mittauspiiri alajänniteosalla 2.
 VMJ on vertailumittausjärjestelmä.

3.2.3 Taajuusvaste

Mittauspiirin kolmen desibelin rajataajuus pyrittiin määrittämään mittamalla sen amplitudivaste. Tutkittavaa mittauspiiriä ja vertailumittauspiiriä muutettiin siten, että molempien piirien mittauskaapeli vaihdettiin lyhyempään 3,2 metrin pituiseen kaapeliin. Jännitteenjakajan liityntäjohtona käytettiin 2 metrin pituista messinkiputkea. Koska jännitteenjakajan ylä- ja alajänniteliityntäjohdot olivat lyhyitä, mittauspiirin käyttäytymiseen vaikutti lähes yksinomaan jännitteenjakaja.

Mittauspiiriin syötettiin noin 10 voltin suuruista sinimuotoista jännitettä signaaligeneraattorilla, josta saatiin suurimmillaan 10 MHz taajuus. Mittauspiirin sisäänmeno- ja ulostulojännite mitattiin 8-bittisellä digitaali-oskilloskoopilla samanaikaisesti jokaisessa mittauspisteessä. Koska sisäänmenojännite oli pieni, ei oskilloskoopilla tarvittu vaimenninta. Vaimentimen amplitudivaste mitattiin erikseen. Tarkkuuden parantamiseksi sisäänmenojännitettä säädettiin siten, että ulostulojännite saatiin oskilloskoopille mahdollisimman suurelle näyttämälle. Koska oskilloskoopin kanavien erilaisuus saattoi vaikuttaa tuloksiin, toistettiin mittaus samanlaisena vaihtamalla oskilloskoopin mittauskanavia. Sähköverkosta siirtyvien häiriöiden välttämiseksi oskilloskooppi ja signaaligeneraattori oli liitetty erotusmuuntajan kautta sähköverkkoon.



TMJ /1 on tutkittava mittauspiiri alajänniteosalla 1.
 TMJ /2 on tutkittava mittauspiiri alajänniteosalla 2.
 VMJ on vertailumittausjärjestelmä.

Kuva 9. Mittauspiirien amplitudivasteet.

Kuvassa 9 on esitetty tutkittavan mittauspiirin ja vertailumittauspiirin amplitudivasteet. Mittaustulokset on tarkoituksella esitetty epätarkalla desibeliasteikolla, koska mittaustarkkuus oli huono. Sisäänmenojännite oli noin kymmenen voltia ja ulostulojännite oli siten vain kymmeniä

millivolttteja. Erityisesti vertailumittauspiirillä ja tutkittavan mittauspiirin alajänniteosalla 2 esiintyi ulostulojännitteissä huomattavaa vaihtelua, vaikka sisäänmenojännite oli lähes muuttumaton. Ilmiötä selittää osittain se, että oskilloskoopin pienimmillä jännitemittausalueilla vaikuttaa mittalaitteen sisäinen kohina ja että häiriöt korostuvat pienillä jännitteillä.

Mittaustuloksista voidaan huomata, että kaikilla mittauspiireillä vaimennus eli jakosuhte suureni hieman taajuuden kasvaessa. Mittauksen arvioitu tarkkuus oli vain noin viiden prosentin luokkaa. Jakosuhteen suurentuminen saattaa olla todellisuudessa peräisin oskilloskoopin sisäisestä signaalinkäsittelystä ja kohinasta.

Vertailumittauspiiri näyttää vaimentavan voimakkaasti suuria taajuuksia ja sen 3 dB:n ylärajataajuus on noin 3 MHz. Tutkittava mittausjärjestelmä taas vahvistaa suuria taajuuksia ja ylärajataajuus on ainakin 8 MHz. Askelvaste-mittausten perusteella olisi voitu tehdä myös samankaltaiset päätelmät.

Vaimentimen (100:1) amplitudivastemittaus tehtiin samalla periaatteella kuin mittauspiireille. Tulosten perusteella vaimennin ei heikennä mittauspiirin dynaamisia ominaisuuksia.

Mittauspiirejä muuttamatta mitattiin lisäksi vertailumittauspiirin ja tutkittavan mittauspiirin alajänniteosalla 2 vaihevastetta. Oskilloskoopilla käytettiin xy-poikkeutusta, jossa sisäänmenojännite oli x ja ulostulojännite y. Oskilloskoopille saatiin ns. Lissajousin kuvio, josta vaihesiirto laskettiin. Vertailumittauspiirillä alkoi esiintyä vaihesiirtoa 50 kHz:n kohdalla ja 2,8 MHz:llä vaihesiirto oli jo 90 astetta. Tutkittavalla mittauspiirillä vaihesiirto alkoi vasta 200 kHz:n kohdalla ja 8 MHz:llä vaihesiirto oli noin 90 astetta. Vaihevasteessa tyydyttiin mittaamaan vain vaihesiirron alkukohta, koska mittauskaapeleiden pituudet alkoivat vaikuttaa merkittävästi tuloksiin.

3.2.4 Lineaarisuuskoe

Lineaarisuuskoe on suositeltavinta tehdä siten, että jännitteenjakaja on kytkettynä mittausjärjestelmäänsä. Lisäksi koe on pyrittävä tekemään vertailumittauksena sellaisen mittausjärjestelmän kanssa, jonka tarkkuus on riittävä. Muita mahdollisuuksia ovat pallokipinävälän käyttö tai vertailu syöksyjännitegeneraattorin varausjännitteeseen (U_{Ch}).

Sopivaa vertailumittausjärjestelmää ei ollut käytettävissä ja pallokipinävälillä mitattaessa hajonta on suuri. Siksi lineaarisuuskoe suoritettiin vertaamalla mittauspiirin huippujännitemittarin lukemaa syöksyjännitegeneraattorin varausjännitteeseen. Varausjännitemittauspiirin lineaarisuutta oli tutkittu aikaisemmin, jolloin se oli todettu hyväksi.

Syöksyjännitegeneraattorista oli käytössä yksi porrassalajänniteosalla 1 ja neljä porrasta alajänniteosalla 2. Varausjännitteen arvo määritettiin generaattorin alimmasta portaasta virtamittauksena suuren $610,3 \text{ M}\Omega$:n resistanssin kautta. Jännitemuotona käytettiin $1,2/50 \mu\text{s}$ salamasyöksyjännitettä ja mittaus tehtiin molemmilla polariteeteilla. Jokaisella varausjännitetasolla mitattiin kolme syöksyjännitettä. Näistä mittauksista määritettiin huippujännitemittarin ja varausjännitteen lukemien suhteet, joista edelleen laskettiin suhteiden keskiarvo. Mittaustulokset on esitetty taulukoissa 5 ja 6.

Mittausjärjestelmän lineaarisuutta voidaan pitää riittävänä välillä 30..550 kV, koska yksittäinen mittaustulos ei poikennut keskiarvosta $\pm 1 \%$ enempää [17]. Huippujännitemittarin ja varausjännitemittarin lukemien suhteiden keskihajonta oli molemmilla alajänniteosilla 0,3 %.

Taulukko 5. Lineaarisuuskokeen mittaustulokset alajänniteosalla 1.

1,2/50 μ s syöksyjännite 30..140 kV				
$\approx U_{ch}$ (kV)	suhde posit.	ero. (%)	suhde negat.	ero. (%)
35	0,898	0,7	0,894	0,3
40	0,896	0,5	0,893	0,2
50	0,892	0,1	0,892	0,1
60	0,893	0,2	0,892	0,1
70	0,891	-0,1	0,893	0,2
80	0,892	0,1	0,892	0,1
90	0,891	-0,1	0,891	-0,1
100	0,890	-0,2	0,890	-0,2
110	0,890	-0,2	0,890	-0,2
120	0,889	-0,3	0,889	-0,3
130	0,888	-0,4	0,888	-0,4
140	0,892	0,1	0,892	0,1
150	0,891	-0,1	0,892	0,1
160	0,890	-0,2	0,891	-0,1
keskiarvo = 0,892 keskihajonta = 0,3 %				

Taulukko 6. Lineaarisuuskokeen mittaustulokset alajänniteosalla 2.

1,2/50 μ s syöksyjännite 105..550 kV				
$\approx U_{ch}$ (kV)	suhde posit.	ero (%)	suhde negat.	ero (%)
30	3,545	0,4	3,546	0,4
40	3,545	0,4	3,535	0,1
50	3,528	-0,1	3,534	0,1
60	3,536	0,1	3,539	0,2
70	3,524	-0,2	3,533	0,1
80	3,525	-0,2	3,534	0,1
90	3,518	-0,4	3,526	-0,1
100	3,515	-0,4	3,522	-0,2
110	3,517	-0,4	3,523	-0,2
120	3,538	0,2	3,540	0,3
130	3,531	0,0	3,536	0,1
140	3,528	-0,1	3,533	0,1
150	3,520	-0,3	3,534	0,1
155	3,527	-0,1	3,531	0,0
keskiarvo = 3,531 keskihajonta = 0,3 %				

Lineaarisuutta tutkittiin jakajan alajänniteosalla 2 myös siten, että mittalaitteena käytettiin digitaalista transienttitalenninta. Tallentimelta mittaustiedot siirrettiin edelleen tietokoneelle, jolla huippuarvo laskettiin. Jännitemuoto oli sama kuin edellä ja mittauksia tehtiin yhdeksän kappaletta 130..550 kV:n jännitealueella. Vaikka huippuarvon ja varausjännitteen suhteiden keskihajonta oli 0,46 %, oli yksittäisen suhteen poikkeama keskiarvosta pienempi kuin 1 %. Keskihajonnan suurempaan arvoon vaikuttaa tallentimella käytettävän vaimentimen epälineaarisuus. Lisäksi hajontaa voi suurentaa se, että digitaalisesti tallennettua mittaustietoa oli suodatettava tietokoneella, ettei yksittäistä piikkiä jännitteen huipulla tulkittaisi huippuarvoksi.

3.2.5 Lyhyen ajan stabiilius

Lyhyen ajan stabiiliutta tutkittiin mittaamalla mittaussjärjestelmällä tunnin ajan $1,2/50 \mu\text{s}$ syöksyjännitettä. Vaikka mittaussjärjestelmän nimellisjännite on 600 kV, ei koetta tehty tällä arvolla. Koska käytännössä tunnin pituisia koesarjoja nimellisellä jännitteellä ei tehdä, haluttiin välttää jakajan ylimääräistä rasittamista ja jännitteen huippuarvona pidettiin 550 kV.

Jakajan yläjänniteosan resistanssi mitattiin ennen koetta, jolloin tulokseksi saatiin $10334,7 \Omega$. Välittömästi kokeen jälkeen mitattu arvo oli $10337,6 \Omega$. Huippujännitemittarin lukemat olivat kokeen alussa 550 kV ja lopussa arvo pysyi muutamaa poikkeusta lukuunottamatta kilovolttia pienempänä. Näistä seikoista päätellen voidaan todeta, ettei normaalissa testaustilanteessa jakajan lämpeneminen aiheuta suurta muutosta jakosuhteeseen. Resistanssin jäähtymistä eli palautumista nimelliseen arvoon seurattiin mittaamalla arvoa 10 minuuttia kokeen jälkeen. Mittauspisteiden välinä pidettiin 1 minuuttia. Koska resistanssin muutos oli pieni, voidaan mittaustuloksista lineaarisesti ekstrapoloimalla laskea, että jakajan resistanssi palautuu nimelliseen arvoon noin 30 minuutin kuluttua.

3.2.6 Häiriökoe

Mittausyhteydelle tehtiin häiriökoe oikosulkemalla mittauskaapeli (R3) jakajan puoleisesta päästä maahan. Muuten mittauspiirin kytkentä vastasi normaalia testauskytkentää. Kokeet suoritettiin 400 kV:n ja 550 kV:n 1,2/50 μ s salamsyöksyjännitteillä.

Huippujännitemittarille ei saatu mitään lukemaa, mutta oskilloskoopilla esiintyi hyvin lyhytaikaisia jännitepiikkejä. Näiden häiriöpiikkien amplitudit olivat muutamien volttien suuruisia. Jännitteenjakajalla käytettiin alajänniteosaa 2 ja mittalaitteena oli oskilloskooppi, jolloin jakosuhteen arvo oli 1016. Jos mittauskaapelia ei olisi oikosuljettu, olisivat mitattavat jännitteet olleet 394 V ja 541 V. Häiriöiden suuruudet olivat siten alle prosentin normaalitilanteessa esiintyvistä jännitteistä, mitä voidaan pitää hyväksyttävänä [17].

3.2.7 Vertailumittaus

Tutkittavalle mittausjärjestelmälle tehtiin vertailumittaus kolmella eri aaltomuodolla. Mittausjärjestelyt pyrittiin pitämään molemmille mittausjärjestelmille samanlaisina. Jännitteen huippuarvo mitattiin digitaalisilla mittalaitteilla, transienttitallementimella ja oskilloskoopilla. Molemmissa mittalaitteissa jouduttiin käyttämään lisäksi vaimenninta (100:1). Digitaaliselta oskilloskoopilta luettiin jännite oskilloskoopin osoittimien avulla keskiarvona huipun läheisyydestä. Tallentimelta mittaustiedot siirrettiin tietokoneelle, jolla huippuarvo laskettiin. Ennen laskentaa jännitemuoto suodatettiin, ettei yksittäinen jännitepiikki aiheutaisi virhettä laskentatuloksiin.

Kokonaisilla syöksyjännitteillä tehtiin seitsemän mittausta, ensin siten, että toisen järjestelmän mittalaitte oli tallennin ja toisen oskilloskooppi. Tämän jälkeen mittaus toistettiin vaihtamalla mittalaitteiden paikkaa. Mittalaitteella käytettiin molemmissa tapauksissa samaa kanavaa ja samaa vaimenninta. Verrattavat tulokset on siis mitattu samalla mittalaitteella mutta ei samasta syöksyjännitteestä ja mittausta ei kohdistettu täydelliseen mittausjärjestelmään, vaan siihen osaan, johon kuuluivat jännitteenjakaja, mittauskaapeli ja päätevastus.

Lineaarisesti nousevaa katkaistua jännitettä mitattiin samalla tavalla kuin kokonaista syöksyjännitettä, mutta mittalaitteena käytettiin pelkästään oskilloskooppia ja sen molempia kanavia. Kuten edellisissä mittauksissa mittaussiirien mittalaitteita vaihdettiin. Tässä mittauksessa vaihdettiin kuitenkin vain mittauskanavaa, mutta vaimennin pidettiin edelleen samalla kanavalla. Mittaustulosten hajonta oli huomattavasti suurempi kuin edellisissä mittauksissa, koska vaimentimien vaimennussuhteiden erilaisuudet vaikuttavat ja lisäksi jännite ei katkea aina samalla kohdalla.

Kokonaisilla syöksyjännitteillä eivät mittaustulosten erot olleet suuria. Katkaistulla jännitteellä ero on kuitenkin huomattava, mikä johtuu melko varmasti siitä, ettei vertailujärjestelmän jännitteenjakaja ole riittävän nopea.

Taulukko 7. Vertailumittauksen tulokset.

Aaltomuoto	Vertailujärjestelmä	Tutkittava järjestelmä	Ero (%)
1,2/55 μ s			
$U_{h, tr}$ hajonta (%)	442,5 kV 0,1 %	444,1 kV 0,1 %	0,4 -
T_1 hajonta (%)	1,22 μ s 0,7 %	1,22 μ s 0,9 %	0,5 -
$U_{h, osk}$ hajonta (%)	443,0 kV 0,2 %	443,6 kV 0,1 %	0,1 -
0,8/55 μ s			
$U_{h, tr}$ hajonta (%)	428,0 kV 0,1 %	429,4 kV 0,3 %	0,3 -
T_1 hajonta (%)	0,78 μ s 1,2 %	0,77 μ s 1,5 %	-0,6 -
$U_{h, osk}$ hajonta (%)	432,2 kV 0,1 %	434,2 kV 0,2 %	0,5 -
lin. aalto $T_C \approx 0,5 \mu$ s			
$U_{h, osk}$ hajonta (%)	324,0 kV 1,8 %	350,7 kV 1,0 %	8,2 -

3.3 Mittausepävarmuuden arviointi

3.3.1 Teoreettinen laskenta

3.3.1.1 Huippuarvo

Hyväksytyyn mittausjärjestelmän kokonaisepävarmuus salamasyöksyjännitteen huippuarvon mittauksessa ei saa olla suurempi kuin $\pm 3 \%$ [17]. Katkaistun syöksyjännitteen mittauksen kokonaisepävarmuus riippuu ajasta jännitteen katkaisuun (T_C) seuraavasti [17]:

$$0,5 \mu s < T_C < 2 \mu s, \text{ kokonaisepävarmuus } \leq \pm 5 \%. \\ T_C \geq 2 \mu s, \text{ kokonaisepävarmuus } \leq \pm 3 \%.$$

Tutkittavaa mittauspiiriä käytetään sekä kokonaisten että katkaistujen salamasyöksyjännitteiden mittaamiseen. Mittalaitteena käytetään näissä mittauksissa joko huippujännitemittaria tai transienttitallenninta. Koska jännitteenjakajalla käytetään kahta erilaista alajänniteosaa, on erilaisia mittauspiirejä neljä kappaletta. Kahden erilaisen jännitemuodon huomioiminen aiheuttaisi sen, että epävarmuuslaskenta olisi tehtävä kahdeksassa tapauksessa. Tässä rajoitutaan käsittelemään tavallisimpia tapauksia:

- 1,2/50 μs tai selältä katkaistu jännite ($T_C \geq 2 \mu s$),
molemmat alajänniteosat,
mittalaitteena huippujännitemittari
- rinnalta katkaistu jännite ($0,5 \mu s \leq T_C \leq 2 \mu s$),
mittauspiirissä alajänniteosa 2,
mittalaitteena transienttitallennin.

Kokonaisepävarmuuden laskentaperiaatteena on pyritty noudattamaan WECC:n julkaiseman epävarmuuslaskentaohjeen suomenkielistä käännöstä [42]. Mittaustuloksen riippuvuus useimmista tekijöistä on kuitenkin vaikea ilmaista tietyn yhtälön avulla ja siksi ohjetta ei ole pystytty noudattamaan tarkasti. Kokonaisepävarmuuden laskennassa tarvittavien yksittäisten epävarmuustekijöiden keskihajonnan laskennassa on käytetty periaatetta, jossa tekijän aiheut-

tama suurin virhe on pyritty määrittelemään ja keskihajonta on laskettu olettamalla virhe tasaisesti jakautuneeksi.

1,2/50 μ s syöksyjännite

Mittauspiirin jakosuhte lasketaan mittauspiirin resistansseista kaavalla (38) ja siten jakosuhteen keskihajontaan vaikuttavat resistanssien keskihajonnat. Taulukossa 8 on esitetty resistanssien mittaustarkkuudesta lasketut resistanssien keskihajonnat. Resistansseille on käytetty samoja merkintöjä kuin kaavassa (38).

Taulukko 8. Resistanssien mittaustarkkuudesta lasketut resistanssien keskihajonnat.

	alajänniteosa 1	alajänniteosa 2
S_{ym}	5,8 Ω	6,4 Ω
S_{a1m}	40 m Ω	5,8 m Ω
S_{a2m}	46 m Ω	46 m Ω
$S_{3,4,5m}$	0,6 m Ω	0,6 m Ω
S_{6m}	40 m Ω	40 m Ω

Mittausjärjestelmälle on tehty tarkistusmittauksia vuosina -88, -91, -92. Yläjänniteosan resistanssin arvo on niissä $10335 \pm 2 \Omega$ ja alajänniteosan 1 $71,08 \pm 0,1 \Omega$.

$$S_{yp} = \frac{2 \Omega}{\sqrt{3}} = 1,2 \Omega$$

$$S_{a1p} = \frac{0,1 \Omega}{\sqrt{3}} = 58 \text{ m}\Omega$$

Alajänniteosan 2 arvojen muuttumisesta ei ole tietoa. Keskihajonta oletetaan tässä olevan sama kuin resistanssin mittaustarkkuudesta laskettu keskihajonta S_{a2m} .

Mittauskaapelin päätevastuksen arvon on todettu vaihtelevan. Oletetaan, että resistanssin arvon vaihtelu on pienempi kuin $0,5 \Omega$.

$$S_{6p} = \frac{0,5 \Omega}{\sqrt{3}} = 0,29 \Omega$$

Jakosuhteen keskihajonnan neliö eli varianssi saadaan derivoimalla jakosuhteen yhtälö (38) jokaisen muuttujan suhteen kaavan (3) mukaan. Kaavan (38) derivointi tarkasti jokaisen muuttujan suhteen johtaisi kuitenkin hyvin monimutkaiseen lausekkeeseen. Siksi jakosuhteen kaavaa approksimoidaan ensimmäisen sulkeen sisältämällä osalla. Approksimaatiota voidaan pitää hyvänä, koska kaavan alkuosa vaikuttaa 99,5 % jakosuhteen arvoon.

$$S_f^2 = \left(\frac{1}{R_{a1}} + \frac{1}{R_{a2}} \right)^2 S_y^2 + \left(\frac{R_y}{R_{a1}^2} \right)^2 S_{a1}^2 + \left(\frac{R_y}{R_{a2}^2} \right)^2 S_{a2}^2 \quad (40)$$

Kunkin resistanssiarvon keskihajonta lasketaan eri tekijöiden keskihajonnoista seuraavasti.

$$S_y = \sqrt{(S_{ym}^2 + S_{yp}^2)} = 6,2 \Omega, \text{ alajänniteosa 1} \\ = 6,7 \Omega, \text{ alajänniteosa 2}$$

$$S_{a1} = \sqrt{(S_{a1m}^2 + S_{a1p}^2)} = 108 \text{ m}\Omega, \text{ alajänniteosa 1} \\ = 8,2 \text{ m}\Omega, \text{ alajänniteosa 2}$$

$$S_{a2} = \sqrt{(S_{a2m}^2 + S_{6p}^2)} = 0,29 \Omega$$

Sijoittamalla resistanssien keskihajonnat yhtälöön (40) saadaan jakosuhteen keskihajonta S_f , joka on 0,62 alajänniteosalla 1 ja 1,04 alajänniteosalla 2. Prosentteina ilmaistuna ovat vastaavat arvot 0,22 % ja 0,10 %. Mittauspiirin komponenttien liitoksista aiheutuvaa epävarmuutta ei ole huomioitu.

Yhden tunnin lyhyen ajan stabiiliuskokeessa huippujännitemittarin lukemat olivat alussa 550 kV ja lopussa 549 kV. Koska arvojen vaihtelu oli pientä, ei mittauspiirin jakosuhteen arvo ole tämän mittauksen mukaan muuttunut juuri lainkaan. Koska lukemat saadaan vain viimeisen numeron tarkkuudella, saattaa arvojen ero olla kaksi kilovolttia. Jos tämä vaihtelu johtuu jakosuhteen muutoksesta, voidaan siitä laskea keskihajonta S_{stab} .

$$S_{stab} = \frac{2/550}{\sqrt{3}} * 100 \% = 0,21 \%$$

Jakosuhdetta laskettaessa on jännitteen oletettu vaimenevan mittauskaapelissa 0,4 % ($=R_3/R_{a2}$). Jos mittauskaapeli ($Z=75\Omega$, $l=30m$) käsitellään siirtojohtona, vaimenee syöksyjänniteaalto kaavan (32) mukaan. Mittauskaapelin vaimennus riippuu myös kaavan (34) mukaan taajuudesta. Hetkellä 2 μs katkaistun syöksyjännitteen amplitudispektristä kuvasta 5 (s.16) voidaan arvioida 3 dB:n rajataajuus, joka on noin 200 kHz. Jos vaimenema lasketaan kaavoilla (32) ja (34), saadaan tuloksiksi 0,20 % ja 0,37 %. Mittauskaapelissa tapahtuva jännitteen vaimeneman riippuvuus taajuudesta otetaan epävarmuuslaskennassa huomioon lisätermillä S_k . Keskihajonta S_k lasketaan olettamalla virhe tasaisesti jakutuneeksi ja virheen suuruus lasketaan kaavan (34) mukaisen vaimennuksen ja 0,4 %:n erona.

$$S_k = \frac{|0,37 - 0,4|}{\sqrt{3}} \% = 0,02 \%$$

Mittauskaapeli, jonka aaltoimpedanssi on 75 Ω , on sovitettu 73,35 Ω :n suuruisella päätevastuksella. Sovitus ei ole täysin tarkka, vaan kaapelilla saattaa esiintyä syöksyjän-

niteaallon heijastumista. Kaavan (31) mukaan lasketaan heijastumisen vaikutukset molemmilla alajänniteosilla (71,08 ja 11,98 Ω).

$$S_{\text{heij},288} = \frac{1,1}{\sqrt{3}} \% = 0,64 \%$$

$$S_{\text{heij},1014} = \frac{0,3}{\sqrt{3}} \% = 0,17 \%$$

Jännitelineaarisuuden mittauksessa saatiin molemmilla alajänniteosilla kokeelliseksi keskihajonnaksi 0,3 %.

$$S_{\text{lin}} = 0,3 \%$$

Huippujännitemittarin tarkastusmittauksessa oli virheen suuruus systemaattisesti 0 ja +1 %:n välillä. Systemaattinen virhe olisi voitu korjata mittaria säätämällä, mutta korjaus olisi vastaavasti aiheuttanut systemaattista virhettä muilla jännitemuodoilla. Virheen suuruuden maksimiarvo esiintyy tarkastusmittausten mukaan juuri salamsyöksyjännitteellä.

$$S_{\text{hjm}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \% = 0,58 \%$$

Häiriömittaus suoritettiin 550 kV:n huippujännitteellä ja oskilloskoopin näytölle tallentuneiden häiriöpiikkien suuruudet olivat 0,5 μs:n jälkeen noin 4 volttia. Jos mittauskaapelia ei olisi oikosuljettu jakajan puoleisesta päästä, olisi mittalaitteelle tuleva jännite ollut 542 V. Häiriöistä voidaan laskea keskihajonta $S_{\text{häir}}$.

$$S_{\text{häir}} = \frac{4/542}{\sqrt{3}} * 100 \% = 0,43 \%$$

Lämpötilan muutokset ovat niin vähäisiä, ettei lämpötilanvaihteluista aiheudu merkittävää epävarmuutta mittauksiin.

Rinnalta katkaistu syöksyjännite

Rinnalta katkaistu syöksyjännite mitataan digitaalisella transienttitalentimella, koska huippujännitemittari on liian hidaskäyttöinen mittaamaan niin nopeaa ilmiötä. Transienttitalentimelta mittaustieto siirretään tietokoneelle, jolla lasketaan jännitteen huippuarvo ja aika jännitteen katkaisuun. Epävarmuuslaskelmassa käytetään syöksyjännitteen jyrkkyyden oletusarvona $1000 \text{ kV}/\mu\text{s}$ ja katkaisukohdaksi $0,5 \mu\text{s}$. Jännitteen suuruus on silloin 500 kV , jolloin jännitteenjakajalla käytetään alajänniteosaa 2.

Jakosuhteen keskihajontana voidaan käyttää edellä esitettyä arvoa $S_{f,1014} = 0,10 \%$.

Syöksyjänniteaallon vaimeneminen mittauskaapelissa voidaan laskea kaavalla (34) taajuudella 1 MHz . Arvoksi saadaan $0,83 \%$. Keskihajonta S_k lasketaan kuten edellä.

$$S_k = \frac{(0,83 - 0,4)}{\sqrt{3}} \% = 0,25 \%$$

Mittauskaapelissa tapahtuvista heijastumisista aiheutuva keskihajonta on sama kuin edellä $S_{\text{heij},1016} = 0,17 \%$.

Linearisuusmittauksessa transienttitalentimella tehtyjen mittausten kokeellinen keskihajonta oli $0,46 \%$.

$$S_{\text{lin}} = 0,46 \%$$

Vaimentimen vaimennussuhteen tarkkuuden arvioidaan olevan 1 %.

$$S_{\text{vaim}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \% = 0,58 \%$$

Transienttitalentimen resoluutio on 10 bittiä, mutta valmistajan esitteessä on tehollisten bittien lukumääräksi ilmoitettu 1 MHz:n taajuudella 8,1. Tallentimen vahvistimen tarkkuus on 0,4 %.

$$S_{\text{tall}} = \frac{\sqrt{(0,4^2 + (100 \cdot 2^{-8})^2)}}{\sqrt{3}} \% = 0,32 \%$$

Transienttitalentimen näytteenottotaajuus on 200 MHz, joka vastaa 5 ns näytteenottoväliä. Virheen suurin arvo esiintyy silloin, kun lineaarisesti nousevalta osalta saadaan viimeinen näyte 5 ns ennen huippua ja seuraava näyte saadaan huipun jälkeen. Virheen maksimi-arvo riippuu siten lineaarisesti nousevalla jännitteellä näytteenottovälin ja katkaisuaajan suhteesta.

$$S_{\text{tal2}} = \frac{5 \text{ ns}/500 \text{ ns}}{\sqrt{3}} * 100 \% = 0,58 \%$$

Häiriöiden oletetaan olevan sama kuin edellä.

Liitteessä kolme on esitetty askelvasteparametrien ja virheiden välisiä riippuvuuksia. Rinnalta katkaistun syöksyjännitteen huippuarvon mittauksessa virhe riippuu mittauspiirin kokellisesta vastausajasta T_n ja katkaisuhetkestä T_c . Askelvastemittauksissa saatiin vastausajaksi -9 ns ja jännitteen katkaisukohta on 0,5 μ s. Virheen maksimi-arvosta voidaan laskea keskihajonta S_T .

$$S_T = \frac{9/500}{\sqrt{3}} * 100 \% = 1,04 \%$$

Lämpötilan vaihtelut eivät aiheuta merkittävää epävarmuutta mittauksiin.

Standardiehdotuksen [17] mukaan kokonaisepävarmuus lasketaan yksittäisten epävarmuustekijöiden varianssien summan neliöjuurena. Kokonaisepävarmuuden luottamustaso on tällöin 67 %. WECC:n ohjeen [42] mukaan kokonaisepävarmuuden luottamustasona käytetään 95 %:n arvoa, mikä tarkoittaa standardiehdotuksen [17] mukaan lasketun arvon kertomista kahdella.

Taulukko 9. Syöksyjännitemittauksen epävarmuustekijöiden keskihajonnat ja kokonaisepävarmuus.

	A (%)	B (%)	C. (%)
Jakosuhteen mittaus (S_f)	0,22	0,10	0,10
Jakosuhteen stab. (S_{stab})	0,21	0,21	0,21
Kaapelin vaim. (S_k)	0,02	0,02	0,25
Heijastuminen (S_{heij})	0,64	0,17	0,17
Lineaarisuus (S_{lin})	0,3	0,3	0,46
Mittalaite (S_{hjm}/S_{tal1})	0,58	0,58	0,32
Vaimennin (S_{vaim})	-	-	0,58
Näytteenottoväli (S_{tal2})	-	-	0,58
Häiriöt (S_{hair})	0,43	0,43	0,43
Askelvasteparam. (S_T)	-	-	1,04
a) $\sqrt{(\Sigma S^2)}$	1,06	0,83	1,55
b) $2*\sqrt{(\Sigma S^2)}$	2,11	1,67	3,10

A on 1,2/50 μs syöksyjännite alajänniteosa 1.

B on 1,2/50 μs syöksyjännite alajänniteosa 2.

C on katkaistu syöksyjännite alajänniteosa 1.

a) kokonaisepävarmuus standardiehdotuksen [17] mukaan.

b) 95 %:n luottamustasoa vastaava kokonaisepävarmuus.

3.3.1.2 Aikaparametrit

Hyväksytyyn mittausjärjestelmän salamasyöksyjännitteen aikaparametrien mittausepävarmuus saa olla standardiehdotuksen [17] mukaan korkeintaan 10 %. Mittausepävarmuuteen vaikuttavat eniten seuraavat kolme tekijää:

- mittauspiirin aiheuttama vääristymä
- mittalaitteen epävarmuus
- aikaparametrien määrittäminen mittauksesta

Mittauspiirin ominaisuuksista saadaan tietoa askelvastemittauksilla. Askelvastemittauksissa saatiin näkyviin hyvin tyypillinen piirre: mitä pienempi nousuaika mittauspiirillä on, sitä suurempi on askelvasteen yliheilahdus. Askelvasteen nousuajat olivat molemmilla alajänniteosilla alle 15 ns. Tästä voidaan päätellä, että mittauspiiri toistaa hyvin nopeasti jännitteenvaihtelut ja että rinnannousuajan mittaukseen ei aiheudu suuria vääristymiä.

Askelvasteparametrien ja rinnannousuajan mittauksen virheeseen on yritetty löytää yhteyttä konvoluutiosimulointien avulla. Liitteen 3 kuvassa L3.2 on esitetty askelvasteparametrien T_{α} ja β ja virheen välistä riippuvuutta. Kuvan L3.2 oleva viivoitettu alue on esitetty myös lähes samanlaisena standardiehdotuksessa [17], jonka mukaan askelvasteparametrien määrittämisen pisteen on oltava viivoitetulla alueella. Mitatut askelvasteparametrit T_{α} ja β toteuttivat kyseiset ehdot.

Puoliarvonajan epävarmuus riippuu siitä, muuttuuko mittauspiirin jakosuhteen arvo pidemmällä aikavälillä. Standardiehdotuksen [17] mukaan askelpulssi tulisi mitata pisimmän puoliarvonajan pituiselta jaksolta. Askelvasteen pysyminen lähes vakiona tänä aikana varmistaisi osaltaan puoliarvonajan mittauksen tarkkuutta. Koska askelvastemittauksissa pulssin kesto-aika oli vain noin 500 ns, ei mittaus toteuttanut standardiehdotuksen vaatimuksia. Amplitudivastemittaus osoitti kuitenkin, että jakosuhte oli hyvin stabiili alhaisillakin taajuuksilla.

Salamasyöksyjännitteen aaltomuodon mittaamiseen käytetään joko oskilloskooppia tai transienttitalenninta, joiden tarkkuus on parempi kuin 2 %. Niiden aiheuttama epävarmuus on suhteellisen pieni.

Suurimmaksi epävarmuustekijäksi saattaa muodostua mittaus-
tulosten tulkinta. Tarkkojen digitaalisten mittalaitteiden
käyttö on yleistynyt myös suurjännitemittauksissa. Mittaus-
tulosten jatkokäsittely tietokoneella on helpompaa ja
nopeampaa. Tällä hetkellä ei ole kuitenkaan olemassa
sellaista ohjelmistoa tai algoritmia, joka olisi yleisesti
hyväksytty syöksyjännitepulssien käsittelyyn. Suurjännite-
laboratorioiden ohjelmistojen vertailu on osoittanut sen,
että ideaalisten syöksyjännitepulssien parametrien määri-
tyksessä ei ole suuria ongelmia. Sen sijaan syöksyjännite-
pulssin sisältäessä häiriöitä tai värähtelyä on parametrien
arvoissa suuriakin eroja. [28]

Aikaparametrien mittausepävarmuutta on vaikea arvioida.
Mittauspiiri aiheuttaa tuskin suuria virheitä ja siten
merkittävimmät virheet aiheutuvat mittaustulosten tulkin-
nasta. Mittaustulosten huolellisella käsittelyllä päästään
aikaparametrien mittauksessa alle 10 %:n kokonaisepävar-
muuteen.

3.3.2 Vertailumittaus

Standardiehdotuksen [17] mukaan mittausjärjestelmän
jakosuhte ja dynaaminen käyttäytyminen on pyrittävä määrit-
tämään vertailumittauksena tarkan mittausjärjestelmän
avulla.

Mittausjärjestelmien keskinäistä vuorovaikutusta vertailu-
mittauksessa on tutkittu. Artikkelit [45] käsittelee kahden
resistiivisen jännitteenjakajan vuorovaikutusta puhtaan
kapasitiivisen ja vaimennetun kapasitiivisen jakajan
kanssa. Askelvastemittausten samanaikainen suorittaminen
saattaa aiheuttaa suuria virheitä erityisesti sellaisessa
tilanteessa, jossa yksittäisen mittausjärjestelmän liitty-
misjohdon induktanssin ja maakapasitanssin aiheuttamaa
värähtelyä ei ole vaimennettu. Keskinäinen vuorovaikutus on
sen sijaan lähes merkityksetön kokonaisten syöksyjännit-
teiden mittauksessa. Katkaistuilla syöksyjännitteillä
vuorovaikutus on myös pientä ja dominoiva virhelähde on
peräisin siitä vaimentamattomasta järjestelmästä, jolla
yksittäin tehdyssä mittauksessa resonanssivärähtelyssä
esiintyy pienempi taajuus ja suurempi amplitudi. [45]

Tässä työssä tehdyssä vertailumittauksessa kokonaisten
syöksyjännitteiden huippuarvon ja rinnannousuajan mittauk-

sissa ei esiintynyt suuria eroja mittausjärjestelmien välillä. Tutkittavalla mittausjärjestelmällä mitatut kokonaisten jännitteiden huippuarvot olivat molemmilla jännitemuodoilla ja mittalaitteilla hieman suuremmat kuin vertailumittausjärjestelmällä. Koska erot olivat samansuuntaisia, voisi kyseessä olla systemaattinen virhe, jonka aiheuttajaa on kuitenkin vaikea päätellä. Katkaistulla syöksyjännitteellä oli mitatuissa huippuarvoissa huomattava ero. Tulos oli kuitenkin täysin odotettavissa. Liitteen 3 perusteella virheen maksimi-arvo katkaistulla syöksyjännitteellä riippuu katkaisuaajasta T_C ja mittauspiirin kokeellisesta vastausajasta T_n . Vertailumittausjärjestelmällä virheen suuruus olisi siten $-8,8 \%$ ja tutkittavalla mittausjärjestelmällä $1,8 \%$, kun aika katkaisuun on $0,5 \mu s$.

Vertailumittausjärjestelmän kaltaisen mittauspiirin jakosuhdetta erilaisilla jännitemuodoilla on käsitelty artikkelissa [34]. Artikkelissa tutkittiin mittauspiiriä, jossa jännitteenjakajana oli samanlainen resistiivinen jännitteenjakaja kuin tässä työssä käytetyssä vertailumittausjärjestelmässä. Mittauspiirin jakosuhte mitattiin tasajännitteisellä mittasillalla ja jakosuhteen arvoksi saatiin $723,8$. Pienellä jännitteellä pulssikalibraattorilla tehdyillä mittauksilla saatiin salama- ja kytkentäsyöksyjännitteellä suurempi jakosuhteen arvo ($744/735$). Askelvastemittauksesta määritetty jakosuhteen arvo oli myös erilainen (740). Artikkelin perusteella aaltomuoto vaikuttaa jakosuhteen arvoon. [34]

Amplitudivasteen on todettu kuvaavan hyvin jakosuhteen käyttäytymistä eri aaltomuodoilla [34], mutta periaatteessa yksinkertaisin ja varmin menetelmä määrittää mittausjärjestelmän jakosuhte on vertailumittaus oikealla jännitemuodolla. Tarkan vertailumittausjärjestelmän avulla on mahdollista korjata systemaattisia virheitä ja siten parantaa mittaustarkkuutta. Tällä hetkellä ei ole kuitenkaan saatavilla tarkkoja vertailumittausjärjestelmiä. Ongelmia saattavat lisäksi aiheuttaa vertailujärjestelmien vaikea liikuteltavuus, järjestelmien keskinäinen vaikutus, itse mittausjärjestelyt ja ympäristöolosuhteet.

3.4 Johtopäätökset

Mittauspiiriä tutkittiin kokeellisesti standardiehdotuksen [17] mukaan. Mittaukset toteuttivat suurimmalta osalta standardiehdotuksen vaatimukset. Poikkeuksena oli kuitenkin askelvastemittaus, jossa askelpulssin pituus oli noin $0,5 \mu\text{s}$, kun sen pitäisi olla pisimmän puoliarvonajan pituinen jakso eli kymmeniä mikrosekunteja. Askelvastemittaukset tulevat olemaan tärkeä osa mittausjärjestelmän dynaamisten ominaisuuksien seurannassa ja siksi askelpulssin kestoaikaa olisi pyrittävä pidentämään.

Vertailumittauksen yhteydessä mitattiin tutkittavan mittauspiirin komponenttien resistanssit. Edellisestä mittauksesta oli kulunut aikaa vain muutamia kuukausia. Tuloksista huomattiin, että mittauskaapelin päätevastuksen arvo oli muuttunut huomattavasti. Päätevastuksen stabiiliutta on siis seurattava. Tutkittavassa mittauspiirissä ei päätevastuksen arvon muuttuminen vaikuta merkittävästi jakosuhteen arvoon, mutta muissa mittauspiireissä muutos saattaa vaikuttaa huomattavasti enemmän.

Koska mittauspiirin jakosuhteen on todettu riippuvan jännitemuodosta [34], voi tasajännitemittauksien perusteella määritetty jakosuhteen arvo olla väärä syöksyjännitteellä. Luotettavin tapa määritellä jakosuhte olisi vertailumittauksen tekeminen tarkan mittausjärjestelmän kanssa oikealla jännitemuodolla.

Taajuusvastemittauksen perusteella on tutkitun mittauspiirin 3 dB:n ylärajataajuus hyvin suuri. Ongelmia saattaa aiheuttaa se, että mittauspiiri vahvistaa suuritaajuisia värähtelyjä. Koska suuritaajuiset häiriöt on poistettava jännitemuodosta, voi optimaalisen suodatuksen löytäminen olla vaikeaa.

Yleisesti ottaen mittauksen kokonaisepävarmuuden määrittäminen luotettavasti on vaikeaa. Varsinkin salamasyöksyjännitteen mittauksessa on sen määrittäminen ongelmallista, koska mitattava ilmiö sekä mittausjärjestelyt aiheuttavat monia epävarmuustekijöitä. Tässä työssä on mittauksen kokonaisepävarmuus määritelty monien olettamuksien pohjalta. Laskettuun epävarmuuteen tulee suhtautua kriittisesti.

4 VIRTAMITTAUS

Teholaboratoriossa tehdään hyvin monenlaisia virtatestejä. Koekappaleet ovat pääasiallisesti pien- ja keskijänniteverkon laitteita. Testeissä rasitetaan laitetta tyyppillisellä sähköjakeluverkossa esiintyvillä virtarasituksilla. Tavallisimmat testattavat ominaisuudet ovat katkaisu- ja kytkentäkyky, kuormitettavuus ja oikosulkukestoisuus.

Virta-alue on testeissä muutamista ampeereista useisiin satoihin kiloampeereihin. Muutamien kiloampeerien virtojen mittaamiseen voidaan käyttää vielä virtamuuntajia, kun taas suurempien oikosulkuvirtojen mittaamiseen käytetään pieniresistanssisia virtashuntteja. Virtamittauksen ohella on myös jännitteen mittaaminen tärkeä useissa testeissä, koska esimerkiksi virran katkaisussa avausvälillä esiintyvä käyttötaajuinen ja transienttinen palaava jännite vaikeuttavat katkaisutapahtumaa. Mittaus tehdään pienjännitteillä resistiivisellä ja suurjännitteillä kapasitiivisellä jännitteenjakajalla. Testeissä saattaa siten olla lähes kymmenen suuretta, joita mitataan samaan aikaan.

Tässä työssä tutkitaan yhden sekunnin oikosulkuvirran kestoisuuskoetta ja rajoitetaan vain oikosulkuvirran mittaamiseen.

4.1 Oikosulkuvirran mittaussiiri

Virran muodostamiseen käytetään oikosulkugeneraattoria, jota pyöritetään sähkömoottoreilla. Kun virtakoe suoritetaan, irroitetaan generaattori sähköverkosta ja tarvittava teho saadaan koneiston pyörimisenergiasta. Koestussiiriin muunnetaan jännite tarvittaessa oikean suuruisiksi välimuuntajien avulla. Oikosulkuvirran suurin huippuarvo on 300 kA ja suurin hetkellinen oikosulkuteho on 400 MVA.

Tutkittava mittaussiiri on yksinkertainen ja se koostuu suurvirtashuntista, koaksiaalikaapelista ja oskillografiasta. Periaatteena on muuttaa virtamittaus jännitemittaukseksi. Kun virtashuntin resistanssin arvo tiedetään tarkasti ja sen aiheuttama jännitteenalenema mitataan, voidaan virta laskea yksinkertaisesti kaavasta (41).

$$i(t) = \frac{u_{sh}(t)}{R_{sh}} \quad (41)$$

4.1.1 Suurvirtashuntti

Epäsymmetrisessä oikosulussa virran alussa esiintyvä tasakomponentti ja suuri virta aiheuttavat virtamuuntajan kyllästymistä. Siksi oikosulkuvirran mittaaminen tarkasti virtamuuntajalla ei tavallisesti onnistu. Sen sijaan virtashuntti pystyy hyvin toistamaan epäsymmetrisen virran.

Tyypillisimmät virtashuntit ovat muodoltaan koaksiaalisia putki- tai häkkishuntteja. Putkimaisilla shunteilla on johdinpintana ohut sylinterimäinen seinämä. Virran sisäänmeno ja ulostulo tapahtuu shuntin samasta päästä. Häkkishuntit ovat periaatteeltaan samankaltaisia, mutta johdin muodostuu useista rinnakkaisista tangoista, jotka ovat ympyräkaarella.

Virtashunttien on kestettävä suurien oikosulkuvirtojen aiheuttamaa lämpenemää ja mekaanisia rasituksia. Niiden vastausajan on oltava lyhyt ja virran aiheuttaman lämpenemän pieni. Lämpenemistä ja siitä aiheutuvaa resistanssin muuttumista voidaan eliminoida pienentämällä shuntin resistanssia ja kasvattamalla sen massaa. Resistanssia voidaan pienentää suurentamalla virtaa johtavaa poikkipintaa, mutta resistanssin pienentämisestä voi aiheutua virran ahtautumista jopa 50 Hz:n taajuuksilla. Virtaa alkaa ahtautua, jos johtavan poikkipinnan paksuus on suurempi kuin virran tunkeutumissyvyys d_s , joka riippuu virran taajuudesta ja vastusaineen johtavuudesta [21].

$$d_s = \frac{1}{\sqrt{(\sigma\mu_r\mu_0 f)}} \quad (42)$$

missä σ on johtavuus

μ_r on suhteellinen permeabiliteetti

μ_0 on permeabiliteetti

f on taajuus

Putkimaisilla shunteilla virran ahtautumisesta aiheutuva mittausrvirhe on suoraan yhteydessä vastausaikaan ja askelvasteeseen. On osoitettu, että jos shuntin vastausaika on 320 μs , esiintyy äkillisesti syötetyn 60 Hz:n virran alkuosan tallentamisessa merkittävää vääristymistä ja huippuarvolla yli prosentin virhe. Jos vastausaikaa pienennetään noin 30 μs :iin, ei suuria virheitä ole havaittavissa. [29]

Virtashuntin yksinkertaistettu sijaiskytkentä on resistanssin ja induktanssin sarjaankytkentä. Shuntin aikavakio riippuu induktanssin ja resistanssin suhteesta. Resistanssin pienentyessä alkaa induktanssin arvo saada merkitystä. Häkkityyppisellä shuntilla aikavakio L/R voidaan saada pieneksi, jos tankojen säde ja niiden määrä sekä niiden geometrinen keskietäisyys valitaan huolella. Nopeita virtapulsseja mitattaessa voidaan aikavakion arvoon vaikuttaa erityisellä kompensointikelalla. [41]

Shuntin askelvasteessa ei saisi olla suurta yliheilahdusta, koska silloin shuntti korostaa suuria taajuuksia, joita aiheutuu hajakapasitansseista ja hajainduktansseista [29]. Kolmella eri tavalla kompensoituja nopeiden virtapulssien mittaamiseen tarkoitettujen häkkishunttien askelvasteita on tutkittu. Kaikissa tapauksissa esiintyi askelvasteessa yliheilahdusta, jota artikkelin [41] mukaan ei ole vältettävissä minkäänlaisella kompensoinnilla.

Ohutseinäisen putkishuntin vastausaika voidaan laskea likimääräisesti yhtälöstä (43) [29]. Häkkishuntin nousuajan laskemiseen on lähteessä [41] käytetty samaa kaavaa kuin putkishuntin nousuajan laskemiseen korvaamalla seinämän paksuus tangon paksuudella. Tämän perusteella voidaan yhtälöllä (43) laskea likimääräisesti myös häkkishuntin vastausaika.

$$T_{\text{sh}} = \frac{\mu\sigma d^2}{6} \quad (43)$$

missä d on seinämän paksuus

Suuri virta aiheuttaa johtimen lämpenemistä. Kun virta kulkee johtimessa äärettömän kauan, nousee johtimen lämpötila eksponentiaalisesti, riippuen lämpöaikavakiosta τ , tiettyyn pisteeseen, missä virran aiheuttama lämpömäärä on yhtä suuri kuin pois virtaava lämpömäärä. Koska oikosulkuvirran kesto-aika on paljon lyhyempi kuin lämpöaikavakio, voidaan eksponentiaalisesti kasvava lämpeneminen korvata nollakohtaan piirretyllä tangentilla. Virran aiheuttama lämpötilan nousu resistanssissa voidaan laskea kaavalla (44).

$$\theta = \frac{I^2 R_{sh}}{Mc} t \quad (44)$$

I on virran tehollisarvo

M on shuntin massa

c on shuntin ominaislämpökapasiteetti

t on virran kesto-aika

Myös johtimen jäähtyminen on eksponentiaalinen ilmiö. Koska jäähtymisaika on tavallisesti lähellä lämpöaikavakiota τ , on jäähtyminen laskettava kaavan (45) mukaan.

$$\theta_2 = \theta_1 \exp(-t/\tau) \quad (45)$$

4.1.2 Silmukkaoskillografi

Oskillografin olennaisin osa on mittasilmukka, joka sijaitsee vakiona säilyvässä magneettikentässä. Silmukka on ripustettu kahden jousen varaan. Jouset toimivat sekä vääntöjousina että liitänä ulkoiseen virtapiiriin. Lisäksi silmukkaan on kiinnitetty pieni peili, johon kapea valonsäde ohjataan. Biot-Savartin lain mukaan silmukassa kulkevan virran ja ulkoisen magneettikentän välille syntyy voimavaikutus, joka pyrkii kääntämään silmukkaa jousien varassa. Silmukkaan kiinnitetyn peilin kautta ohjataan kapea valonsäde filmille. Koska peilin kääntymiskulma on pieni, on filmille valottunut piirto suoraan verranollinen silmukassa kulkevaan virtaan.

Virran mittaamisessa on käytettävä ulkoisia vaimentimia, koska silmukat kestävät melko pieniä virtoja. Yksinkertaisin tapa pienentää virtaa on liittää mittauspiiriin sarjavastus. Mittalaitteen herkkyyttä säädetään siis käytännössä etuvastusta muuttamalla.

Oskillografin herkkyys säädetään syöttämällä siihen tunnettu jännite ja mittaamalla poikkeama filmiltä. Mittauskaapeli ei ole mukana asettelussa. Vaikka mittauskaapelin resistanssi on vain yhden ohmin luokkaa, saattaa se vaikuttaa mittaustarkkuuteen, koska oskillografin liittimistä näkyvä impedanssi on 200..2000 ohmin välillä. Koska herkkyyden asettelussa ei ole mittauskaapeli mukana, voi tästä aiheutua mittaustilanteessa suurimmillaan 0,5 %:n virhe.

Merkittävin virhe aiheutuu kuitenkin filmille tallentuneiden signaalien tulkinnessa. Filmille valottuva viiva on paksu ja sen mittaaminen käsin epätarkkaa. Lukematarkkuudesta aiheutuva virhe voi olla siten prosentin luokkaa.

4.2 Häiriöt

Merkittävimpänä häiriölähteenä teholaboratoriossa on suurten magneettikenttien indusoimat häiriöt. Virrallinen johdin aiheuttaa ympärilleen magneettikentän. Jos mittauskaapeli on samansuuntaisesti virrallisen johtimen läheisyydessä, indusoituu virtajohtimen aiheuttaman magneettivuon välityksellä mittauskaapeliin pitkäaikainen sähkömotorinen voima.

Virtamittauksessa käytettävät shuntit ovat häkkityyppisiä, mutta eivät koaksiaalisia. Mittaus tehdään siten, että koaksiaalikaapelin keskusjohdin liitetään shuntin toiseen päähän ja vaippajohdin toiseen. Mittaustavasta johtuen mittauspiiriin syntyy silmukka, johon vierekkäisten vaiheiden virrat voivat indusoida häiriöitä. Induktiivisen eli magneettisen kytkennän vaikutuksesta syntyy silmukkaan jännite, joka riippuu magneettivuon muutosnopeudesta ja keskinäisinduktanssista.

$$U_h = - \frac{d\Phi}{dt} = M * \frac{di}{dt} \quad (46)$$

Φ on mittaussilmukan lävistämä magneettivuo
 M on keskinäisinduktanssi
 i on häiritsevä virta

Häiriöitä voi vähentää välttämällä sellaisia asennuksia, jossa mittauskaapeli ja häiritsevä virtajohdin ovat yhdensuuntaisia ja lähellä toisiaan. Lisäksi signaalitason nostaminen ja suurien virtasilmukoiden välttäminen pienentävät häiriöiden vaikutuksia.

4.3 Mittausepävarmuuden arviointi

Mittauksen kokonaisepävarmuuden määrittämisessä käytetään periaatteena WECC:n suomenkielistä käännoä [42]. Koska mittaustulos on kahden suureen osamäärä, voidaan kokonaisepävarmuus laskea suhteellisilla arvoilla. Yksittäisestä tekijästä aiheutuva suurin virhe on pyritty määrittelemään ja tekijän keskihajonta on laskettu olettamalla virhe tasaisesti jakautuneeksi.

Epävarmuus lasketaan tehollisarvoltaan 100 kA:n virtamittaukselle, jonka kesto aika on yksi sekunti. Virtashuntti on tehty krominikkeli seoksesta. Siitä käytetään laskuissa seuraavia arvoja:

$$\begin{aligned} R_{sh} &= 22 \mu\Omega \\ \alpha_{sh} &= 9 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C} \\ M &= 9,8 \text{ kg} \\ c &= 450 \text{ Ws/}^\circ\text{Ckg} \\ \sigma &= 91 \cdot 10^4 \text{ S/m} \end{aligned}$$

Sijoittamalla arvot kaavaan (44) saadaan lämpenemän arvoksi noin 50 °C. Shuntit on kalibroitu huonelämpötilassa ja koska kokeet tehdään ulkona, voi lämpötilan vaihtelu olla -20°C..30°C. Virtashunttien lämpötilan toleranssiksi voidaan antaa ±50°C. Lämpötilan toleranssirajat pätevät myös koesarjalle, jossa kokeiden välinen aika on sama kuin

resistanssin jäähtymisaikavakio. Kaavan (18) mukaan laskettuna voi resistanssiarvon muutos olla suurimmillaan 0,45 %.

Virtashuntit on kalibroitu tasavirtasillalla. Kalibroinnin tarkkuus mittausalueella arvioidaan olevan $0,1 \% \pm 0,03 \mu\Omega$. Shunttien kalibroinnin virhe voi olla siten suurimmillaan noin 0,24 %. Kalibrointivälien aikana shunttien resistanssien arvot ryömivät hieman. Ryömintää arvioidaan edellisten vuosien ryöminän keskiarvona, joka on 0,34 %. Kaavalla (42) laskettu tunkeutumissyvyys 50 Hz:n virran taajuudella on yli 70 mm. Koska häkkimäisen shuntin tankojen säde on vain 8 mm, ei virran ahtautumista esiinny.

Amplitudien lukematarckkuus oskillografin tulosteista arvioidaan olevan 1 % sekä herkkyyden asettelussa että varsinaisessa mittauksessa. Oskillografin herkkyys asetellaan ilman mittauskaapelia ja siitä voi aiheutua mittauksessa suurimmillaan 0,5 %:n virhe. Herkkyyden asettelussa käytetyn jännitelähteen tarkkuus on 0,3 %.

Oskillografin herkkyyden säätö pyritään tekemään samansuuruisella jännitteellä kuin mitä mitataan. Asettelujännitteellä ja mitattavalla jännitteellä on kuitenkin hieman eroa. Oletetaan, että oskillografin epälineaarisuudesta aiheutuu maksimissaan 0,2 %:n virhe.

Shuntit on asennettu seinään puolikiinteästi. Tarkemmalla mittalaitteella on havaittu induktiivista kytkeytymistä shunttien välillä. Yksivaiheisessa kokeessa, jossa samaa virtaa mitattiin kahdella shuntilla, huomattiin virtojen erotuksena 90 asteen vaihesiirrosta oleva sinimuotoinen komponentti. Amplitudi oli noin kahdeksan prosenttia mitattavasta virrasta. Tästä voidaan olettaa, että kolmivaiheisessa oikosulkuvirtakokeessa vieressä olevasta vaiheesta aiheutuu kaavan (46) mukaan häiriö, jonka amplitudi on neljä prosenttia mitattavasta suureesta. Erään toisen mittauksen perusteella aiheuttavat reunimmaisat vaiheet toisiinsa vastaavanlaisen yhden prosentin suuruisen häiriöjännitteen. Näistä kokeellisista tuloksista voidaan teoreettisesti laskea, että keskimmäisen vaiheen virran huippuarvolle aiheutuu noin 7 %:n virhe ja laitavaiheille noin 2,5 %:n virhe. Virheen esiintyminen on systemaattista ja se olisi mahdollista korjata. Virheen korjaaminen olisi kuitenkin vaatinut tarkempaa tutkimista, jota tässä työssä ei ollut mahdollista tehdä. Epävarmuuslaskennassa oletete-

taan, että tehollisarvo mitataan laitavaiheista ja että teoreettisesti laskettu virhe on satunnainen.

Mittauksen kokonaisepävarmuus lasketaan yksittäisten tekijöiden aiheuttamien virheiden keskihajonnoista. Keskihajonnat on laskettu olettamalla virhe tasaisesti jakautuneeksi ja ne on esitetty taulukossa 10. Kokonaisepävarmuus on ilmoitettu sekä 67 %:n että 95 %:n luottamustasolla.

Taulukko 10. Virtamittauksen virheet, niiden keskihajonnat ja kokonaisepävarmuus.

	virhe	keskihajonta (S)
Shuntin resistanssi	0,24 %	0,14 %
Shuntin lämpenemä	0,45 %	0,26 %
Shuntin ryömintä	0,34 %	0,20 %
Oskillografin herkkyyden asettelu (lukemavirhe)	1,0 %	0,58 %
Herkkyyden asettelussa käytetty jännitelähde	0,3 %	0,17 %
Oskillografin lineaarisuus	0,20 %	0,12 %
Oskillografin herkkyyden säätö ilman mittauskaapelia	0,50 %	0,29 %
Oskillografilla mittaus (lukemavirhe)	1,0 %	0,58 %
Häiriöt	2,5 %	1,44 %
67 %:n luottamustaso $\sqrt{(\Sigma S^2)}$		1,73 %
95 %:n luottamustaso $2\sqrt{(\Sigma S^2)}$		3,46 %

4.4 Johtopäätökset

Oikosulkuvirtamittauksen tutkiminen toi esille shunttien keskinäisen induktiivisen kytkennän, joka vaikuttaa virran huippuarvoon. Teoreettisen tarkastelun perusteella aiheutuu kolmivaiheisessa oikosulkukokeessa keskimmäisen vaiheen mittaukseen eniten virhettä. Virran huippuarvo olisi siksi mitattava laitavaiheista. Jos virran tehollisarvo määritellään virran huipuista, voi virheen suuruus olla useita prosentteja. Epävarmuuslaskennan perusteella on tutkittavan mittauksen tarkkuutta pidettävä tyydyttävänä.

Lähiaikoina teholaboratorioon saatava digitaalinen mitta-laite pienentää häiriöiden aiheuttamaa ongelmaa tehollisarvon mittauksessa, koska tehollisarvo määritetään integroimalla koko jakson ajalta. Induktiivisia häiriöitä on kuitenkin tutkittava. Sulaketesteissä on virran katkeamisen jälkeen muutosnopeus huomattavasti suurempi kuin tutkittavassa mittauksessa ja siten induktiiviset häiriöt voivat tulla merkittävimiksi. Häiriöiden vuoksi tulisi eräinä vaihtoehtoina harkita koaksiaalisten shunttien hankkimista tai vaihtoehtoisten mittausmenetelmien, kuten Rogowskin käämin käyttöä.

5 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutkia salamasyöksyjännitemittauksen ja oikosulkuvirtamittauksen epävarmuustekijöitä sekä määritellä mittausten kokonaisepävarmuus. Kokonaisepävarmuuden laskennassa pyrittiin noudattamaan WECC:n julkaiseman epävarmuuslaskentaohjeen suomenkielistä käännöstä [42].

Salamasyöksyjännitemittauspiiriä tutkittiin kokeellisesti standardiehdotuksen [17] mukaan. Mittaukset toteuttivat suurimmalta osalta standardiehdotuksen vaatimukset. Selväksi poikkeukseksi muodostui askelvastemittaus, jossa pulssin pituus ei ollut riittävä. Dynaamista käyttäytymistä tullaan melko varmasti seuraamaan askelvastemittauksilla ja sen vuoksi askelpulssia olisi pidennettävä rakentamalla uusi askelgeneraattori.

Mittauspiirin jakosuhteen määrittäminen luotettavasti on ongelmallista. Jakosuhteen arvon on todettu riippuvan jännitemuodosta. Luotettavin tapa määritellä mittauspiirin jakosuhte olisi suorittaa vertailumittaus tarkan mittausjärjestelmän kanssa oikealla aaltomuodolla ja jännitetasolla. Toistaiseksi ei vain ole saatavilla tarkkoja vertailumittausjärjestelmiä.

Amplitudivasteen perusteella mittausjärjestelmä vahvistaa suuria taajuuksia. Jännitemuodon optimaalisen suodattamisen löytäminen saattaa aiheuttaa ongelmia.

Mittauskaapelin päätevastuksen arvossa on havaittu epästabiiliutta. Vaikka resistanssiarvon vaihtelu ei aiheuta suurta virhettä jakosuhteen arvoon, on päätevastuksen arvoa seurattava.

Salamasyöksyjännitemittauksen laskettu kokonaisepävarmuus on standardiehdotuksen [17] sallimissa rajoissa. Yksittäisten epävarmuustekijöiden suuruuden esille saaminen kokeellisesti oli vaikeaa ja siksi kokonaisepävarmuuden määrittäminen on jouduttu tekemään monien olettamuksien pohjalta. Lisäksi yksittäisten epävarmuustekijöiden käsitteleminen ja huomioiminen ei ole täysin yksiselitteistä. Tässä työssä esitetty tapa on vain eräs mahdollisuus arvioida mittauksen kokonaisepävarmuutta ja siihen tulee suhtautua kriittisesti.

Oikosulkuvirtamittauksen tutkiminen toi esille shunttien keskinäisen induktiivisen kytkennän, joka vaikuttaa virran huippuarvoon. Jos virran tehollisarvo määritellään laitavaiheiden virtahuipuista, on virheen suuruus useita prosentteja. Lähiaikana saatava digitaalinen mittalaite poistaa suurimmat ongelmat, koska tehollisarvo määritetään integroimalla koko jakson ajalta. Induktiivisia häiriöitä on kuitenkin syytä tutkia, koska joissakin testeissä virran muutosnopeus on suurempi kuin tutkitussa mittauksessa ja koska induktiiviset häiriöt suurenevät muutosnopeuden kasvaessa. Työssä ehdotetaan eräinä vaihtoehtoina koaksiaalisten shunttien hankkimista tai vaihtoehtoisten mittausmenetelmien, kuten Rogowskin käämin käyttöä.

LÄHDELUETTELO

- [1] Amsinck, R. Comparison of EMC-testing practice, 5th ISH, Braunschweig 1987, paper 63.19, 4 s.
- [2] Aro, A. Accuracy of impulse voltage measurements, Nord-IS, Espoo 1986, paper 25, 4 s.
- [3] Aumala, O. Mittaustekniikan perusteet, Hämeenlinna 1989, Otakustantamo, 187 s.
- [4] Bonamy, A. & Descamps, F. High voltage comparative measurements: an alternative to the U.S.R method to characterize high voltage impulse dividers, 6th ISH 1989, New Orleans, paper 20.02, 4 s.
- [5] Carrara, G. & Cherbaucich, C. Scale factors and step response parameters of a voltage measuring system, 7th ISH 1991, Dresden, paper 61.01, 4 s.
- [6] van Deursen, A. et al. EMC aspects of lightning surge generator and its measuring system, 7th ISH 1991, Dresden, paper 83.04, 4 s.
- [7] Gobbo, R. & Pesavento, G. Standard measuring systems and possible sources of error, 7th ISH 1991, Dresden, paper 61.03, 4 s.
- [8] Gockenbach, E. Influence of digitizer performance and evaluation procedures on errors in high voltage impulse measurements, 7th ISH 1991, Dresden, paper 62.01, 4 s.
- [9] Gallagher, T.J. High voltage measurement, testing and design, Bath 1983, John Wiley & Sons Ltd. s. 94-141.
- [10] Hylten-Cavallius, N. et al. A New approach to minimize response errors in the measurement of high voltage impulses, IEEE trans. on PAS, Vol. 102, No.7, 1983, s. 2077-2091.

- [11] Hylten-Cavallius, N. High voltage laboratory planning, Basel 1986, Emile Haefely & Co. Ltd. s. 198-309.
- [12] Hylten-Cavallius, N. et al. Response parameters and response errors; other sources of errors, 5th ISH, Braunschweig 1987, paper 71.01, 4 s.
- [13] Häusler, H.P. et al. Transient recorder for hv impulse tests, 5th ISH, Braunschweig 1987, paper 72.02, 4 s.
- [14] IEC Publication 60-1, High voltage test techniques, Part 1: General definitions and test requirements, 1989, 124 s.
- [15] IEC Publication 60-3, High voltage test techniques, Part 3: Test procedures, 1976, 21 s.
- [16] IEC Publication 60-4, High voltage test techniques, Part 4: Application guide for measuring devices, 1977, 77 s.
- [17] IEC Technical Committee No. 42., Draft international standard: High voltage test techniques, Part 2: Measuring systems, 1992, 68 s.
- [18] IEC Publication 790, Oscilloscopes and peak voltmeters for impulse tests, 1984, 57 s.
- [19] Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus,
Tilastomatematiikan perusteet 44-69, Helsinki 1971, 107 s.
- [20] Jussila, J. High current coaxial shunts, Sähkö, Vol. 40, No.11, 1967, s. 307-312
- [21] Khalifa, M. High voltage engineering, New York 1990, Marcel Dekker Inc. s. 409-486.
- [22] Kiersztyn, S. Numerical correction of hv impulse deformed by the measuring system, IEEE trans. on PAS, Vol. 99, No. 5, 1980, s. 1984-1991.

- [23] Kind, D. et al. The calibration of standard impulse dividers, 6th ISH, New Orleans 1989, paper 41.10, 4 s.
- [24] Kuffel, E. & Zaengl, W.S. High voltage engineering, Exeter 1984, Pergamon Press s. 1-206.
- [25] Lago, B. & Eatock, R. Coaxial shunt, Proc. IEE, Vol. 114, No.9, 1967, s. 1317-1324
- [26] Li, Z. & Kuffel, E. The application of analog compensation in impulse resistor voltage dividers, IEEE trans. on PWD, Vol. 3, No.4, 1988, s. 1391-1395
- [27] Lucas, W. et al. Automated calibration of hv impulse measuring systems by comparison with a reference system, 7th ISH 1991, Dresden, paper 61.06, 4 s.
- [28] Lucas, W. & Schon, K. Preliminary results of the BCR intercomparison of software for evaluating hv impulses, CIGRE 33-92 (WG 33), 1992, 7 s.
- [29] Malewski, R. Micro-ohm shunts for precise recording of short-circuit currents, IEEE trans. on PAS, Vol. 96, No.2, 1977, s. 579-585.
- [30] Malewski, R. et al. Elimination of the skin effect error in heavy-current shunts, IEEE trans. on PAS, Vol. 100, No.3, 1981, s. 1333-1340.
- [31] Malewski, R. et al. Electromagnetic interference field induced by discharges of hv impulse generators, 4 th ISH 1983, Athens, paper 64.10, 3 s.
- [32] McComb, T. et al. Qualifying an impulse digitizer for measurements in hv impulse tests, IEEE trans. on PWD, Vol. 5, No.3, 1990, s. 1256-1265.
- [33] McComb, T. et al. Comparative measurements of hv impulses to evaluate different sets of response parameters, IEEE trans. on PWD, Vol. 6, No.1, 1991, s. 70-75.

[34] Munoz Rojas, P. & Teixeira JR., J.A. Measurements of the ratio of a divider and its scale factors for different waveforms, 7th ISH 1991, Dresden, paper 61.04, 4 s.

[35] Notkonen, E. Suurjännitemittausten pätevyyden osoittaminen, Diplomityö, TKK, 1990

[36] Peier, D. & Stolle, D. Resistive voltage divider for 1 MV switching and lightning voltages, 5th ISH, Braunschweig 1987, paper 73.02, 3 s.

[37] Qing-Cheng, Q. & Zaengl, W.S. Investigation of errors related to the measured virtual front time T_1 of lightning impulses, IEEE trans. on PAS, Vol. 102, No.8, 1983, s. 2379-2390.

[38] Rungis, J. & Schon, K. The evaluation of impulse divider response parameters, IEEE trans. on PWD, Vol. 3, No.1, 1988, s. 88-95.

[39] Schon, K. et al. On the dynamic performance of digital recorders for hv impulse measurement, 4th ISH 1983, Athens, paper 65.05, 4 s.

[40] Schwab, A. et al. Peak-error correction for front-chopped impulse voltages, 3th ISH 1979, Milan, paper 42.13, 4 s.

[41] Schwab, A. Low-resistance shunts for impulse currents, IEEE trans. on PAS, Vol. 90, No.5, 1971, s. 2251-2257.

[42] Teknillinen Tarkastuskeskus, Kalibroinnin mittausepävarmuuden määrittäminen, Helsinki 1990, 23 s.

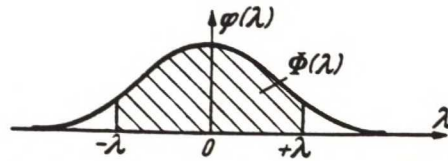
[43] Vaessen, P. & Aartrijk, D. Digitizer aperture uncertainty and its consequences for the digital recording of transients in high-voltage testing, 7th ISH 1991, Dresden, paper 62.05, 4 s.

[44] Yinmei, Y. & Muhong, X. Interference in impulse voltage measuring system, 4th ISH 1983, Athens, paper 64.02, 4 s.

[45] Zhang, Y. X. et al. Interactions between two dividers used in simultaneous comparison measurements, IEEE trans. on PWD, Vol. 4, No.3, 1989, s. 1586-1594.

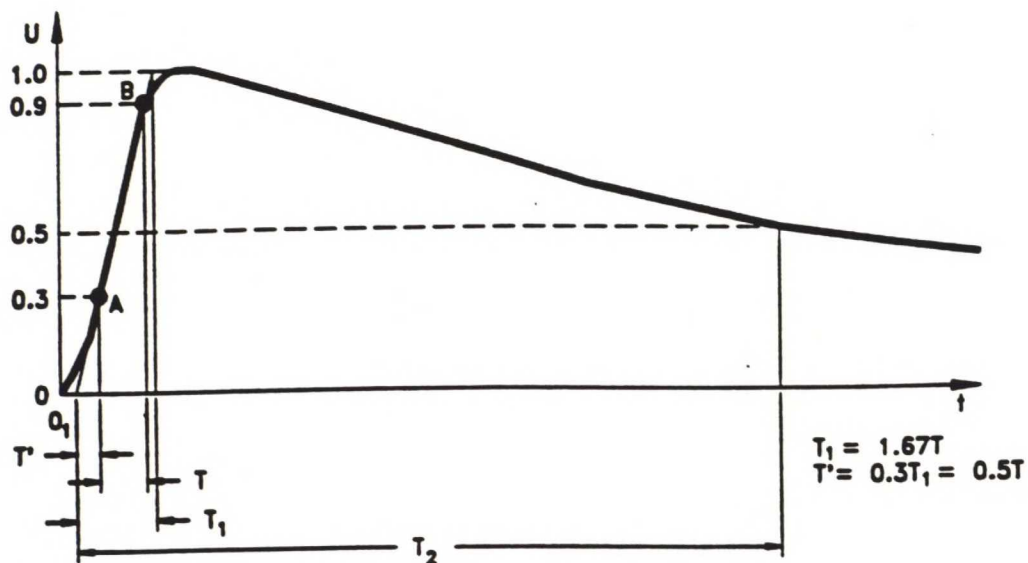
GAUSSIN NORMAALIJAKAUMA

$$\Phi(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\lambda}^{+\lambda} e^{-\frac{\lambda^2}{2}} d\lambda$$



λ	$\Phi(\lambda)$	λ	$\Phi(\lambda)$	λ	$\Phi(\lambda)$	λ	$\Phi(\lambda)$	λ	$\Phi(\lambda)$
0,00	0,0000	0,30	0,2358	0,90	0,6318	1,50	0,8664	3,00	0,9973
0,01	0,0080	0,32	0,2510	0,92	0,6424	1,55	0,8788	3,05	0,9978
0,02	0,0160	0,34	0,2662	0,94	0,6528	1,60	0,8904	3,10	0,9981
0,03	0,0240	0,36	0,2812	0,96	0,6630	1,65	0,9010	3,15	0,9984
0,04	0,0320	0,38	0,2960	0,98	0,6730	1,70	0,9108	3,20	0,9986
0,05	0,0398	0,40	0,3108	1,00	0,6826	1,75	0,9198	3,25	0,9988
0,06	0,0478	0,42	0,3256	1,02	0,6922	1,80	0,9282	3,30	0,9990
0,07	0,0558	0,44	0,3400	1,04	0,7016	1,85	0,9356	3,35	0,9992
0,08	0,0638	0,46	0,3544	1,06	0,7108	1,90	0,9426	3,40	0,9993
0,09	0,0718	0,48	0,3688	1,08	0,7198	1,95	0,9488	3,45	0,9994
0,10	0,0786	0,50	0,3830	1,10	0,7286	2,00	0,9544	3,50	0,9995
0,11	0,0876	0,52	0,3970	1,12	0,7372	2,05	0,9596	3,60	0,9997
0,12	0,0956	0,54	0,4108	1,14	0,7458	2,10	0,9642	3,70	0,9998
0,13	0,1034	0,56	0,4246	1,16	0,7540	2,15	0,9684	3,80	0,9999
0,14	0,1114	0,58	0,4380	1,18	0,7620	2,20	0,9722		
0,15	0,1192	0,60	0,4514	1,20	0,7698	2,25	0,9756		
0,16	0,1278	0,62	0,4648	1,22	0,7776	2,30	0,9786		
0,17	0,1350	0,64	0,4778	1,24	0,7850	2,35	0,9812		
0,18	0,1428	0,66	0,4908	1,26	0,7924	2,40	0,9836		
0,19	0,1506	0,68	0,5034	1,28	0,7994	2,45	0,9858		
0,20	0,1586	0,70	0,5160	1,30	0,8064	2,50	0,9876		
0,21	0,1664	0,72	0,5284	1,32	0,8132	2,55	0,9892		
0,22	0,1742	0,74	0,5408	1,34	0,8198	2,60	0,9906		
0,23	0,1818	0,76	0,5528	1,36	0,8262	2,65	0,9920		
0,24	0,1896	0,78	0,5646	1,38	0,8324	2,70	0,9930		
0,25	0,1974	0,80	0,5762	1,40	0,8384	2,75	0,9940		
0,26	0,2052	0,82	0,5878	1,42	0,8444	2,80	0,9949		
0,27	0,2128	0,84	0,6010	1,44	0,8502	2,85	0,9956		
0,28	0,2206	0,86	0,6102	1,46	0,8558	2,90	0,9963		
0,29	0,2282	0,88	0,6212	1,48	0,8612	2,95	0,9968		
								λ	$100 \cdot \Phi(\lambda)$
								0,675	50,00
								1,645	90,00
								1,960	95,00
								2,282	97,50
								2,326	98,00
								2,576	99,00
								2,878	99,60
								3,090	99,80
								3,291	99,90
								3,719	99,98
								3,891	99,99

$\lambda = 4,41717, \quad 100 \cdot \Phi(\lambda) = 99,9990000$
 $\lambda = 4,89164, \quad 100 \cdot \Phi(\lambda) = 99,9999000$
 $\lambda = 5,32672, \quad 100 \cdot \Phi(\lambda) = 99,9999900$
 $\lambda = 5,73073, \quad 100 \cdot \Phi(\lambda) = 99,9999990$
 $\lambda = 6,10941, \quad 100 \cdot \Phi(\lambda) = 99,9999999$



Kuva L2.1. Kokonainen salamasyöksyjännite [14].

Sallitut poikkeamat:

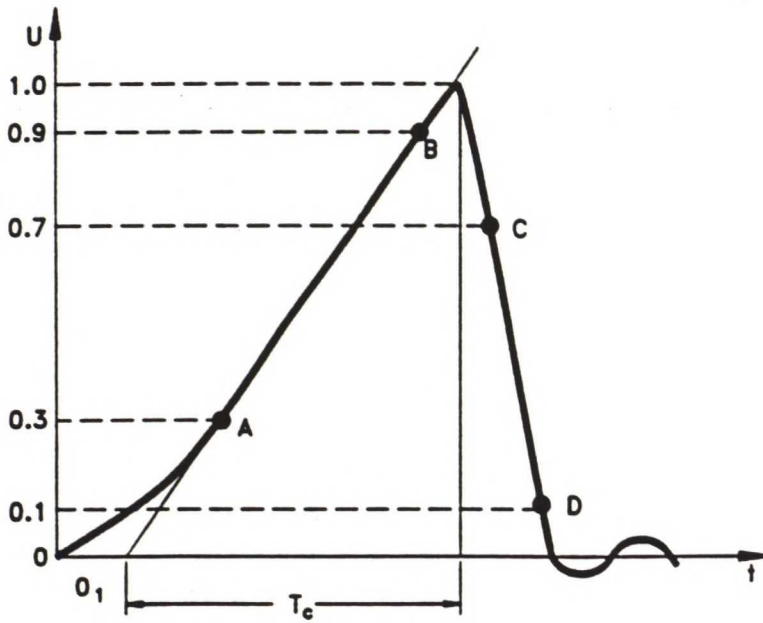
Huippuarvo $\pm 3\%$

$T_1 = 1,2 \mu s \pm 30\% (0,84..1,56 \mu s)$

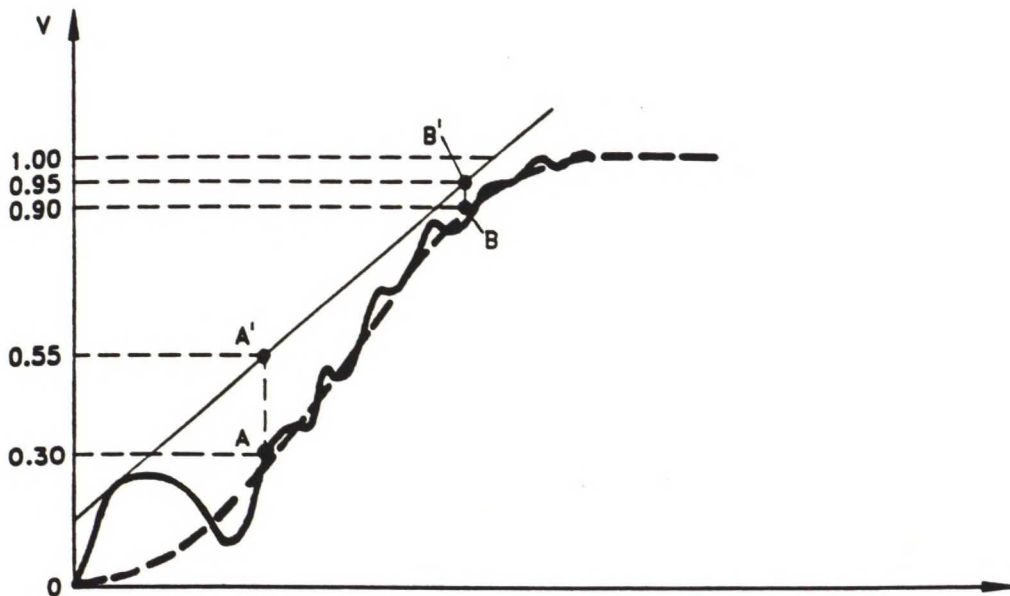
$T_2 = 50 \mu s \pm 20\% (40..60 \mu s)$

Taulukko L2.1. Suomessa tavallisimmat IEC 71-1 suosittelemat eristystason testausjännitteet (salamasyöksyjännite) vaiheen ja maan välillä (jänniteluokka < 300 kV).

	Laitteen suurin käyttöjännite (kV)	Syöksyjännitteen huippuarvo (kV)
A	12	60 / 75
	24	95 / 125
	36	145 / 170
B	72,5	325
	123	450 / 550
	145	450 / 550 / 650
	245	650 / 750 / 850 / 950 / 1050



Kuva L2.2. Rinnalta katkaistu salamasyöksyjännite [14].



Kuva L2.3. Suurimmat sallitut värähtelyt salamasyöksyjännitteen rinnalla [14].

KONVOLUUTIO

Jos mittauspiirin askelvaste g tunnetaan, voidaan mittauspiirin ulostulojännite V_o laskea halutulla sisäänmenojännitteellä V_i konvoluutiointegraalin avulla. Konvoluutio edellyttää, että mittauspiiri on lineaarinen. Käytännössä on menetelmän ongelmana se, ettei mittauspiirin sisäänmenojännitettä tunneta.

$$V_o(t) = \int_0^t [V_i'(t-\tau) * g(\tau)] d\tau \quad (1)$$

Kun salamasyökyjännite katkaistaan rinnalta, on jännite likimain lineaarisesti kasvava. Konvoluutiointegraalilla voidaan laskea lineaarisesti kasvavan jännitteen ulostulojännite V_o . Koska mittauspiirin nimellinen jakosuhte on N , on ulostulojännite jaettava sillä ja konvoluutiointegraalin mukaan ulostulojännite V_o lasketaan kaavasta (2). [24]

$$V_o(t) = S/N \int_0^t g(\tau) d\tau \quad (2)$$

Yhtälöä (2) voidaan hieman muotoilla.

$$N * V_o(t) = S \left[t - \int_0^t [1 - g(\tau)] d\tau \right] \quad (3)$$

Sisäänmenojännitteen ja ulostulojännitteen ero voidaan edelleen laskea kaavalla (4).

$$V_i(t) - N * V_o(t) = S \int_0^t [1 - g(\tau)] d\tau = S * T^o \quad (4)$$

Kun aikaviive sisäänmenon ja ulostulon välillä on τ_{de} , on vakaan tilan (steady state) huippuarvon virhe δV .

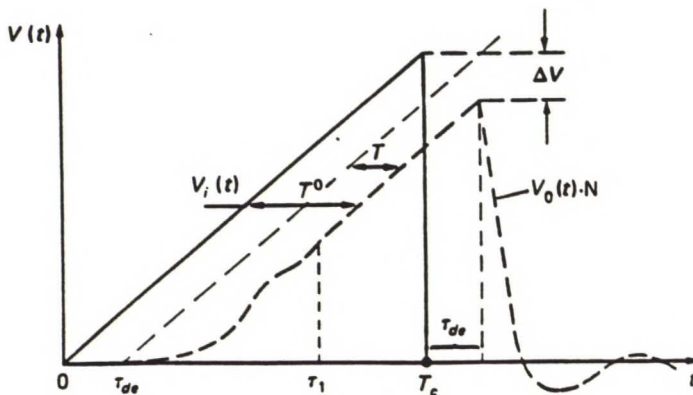
$$\delta V = V_i(T_c) - N \cdot V_o(T_c + \tau_{de}) = S(T^0 - \tau_{de}) = ST \quad (5)$$

Kaavassa (5) esiintyvä vastausaika T on määritelty nyt samalla tavalla kuin kappaleessa 3.

$$T = \int_{\tau_{de}}^{\infty} [1 - g(\tau)] d\tau \quad (6)$$

Lineaarisesti nousevan katkaistun jännitteen suhteellinen virhe voidaan siten laskea kaavalla (7). Kaavassa oletetaan, että askelvasteen asettumisaika on pienempi kuin katkaisuaika.

$$\delta = \frac{\delta V}{S \cdot T_c} = \frac{T}{T_c} \quad (7)$$



Kuva L3.1. Lineaarisesti kasvavan jännitteen katkaisu [24].

Jakajan sovittamista siten, että kokonaisten ja katkaistujen syöksyjännitteiden mittauksessa virheet olisivat mahdollisimman pieniä ja suunnilleen samansuuruisia, on tutkittu. Rinnalta tai huipulta katkaistujen syöksyjännitteiden huippuarvon mittauksessa on todettu mittausvirheiden riippuvan kokeellisesta vastausajasta T_n ja jäännösvastausajasta T_R [12].

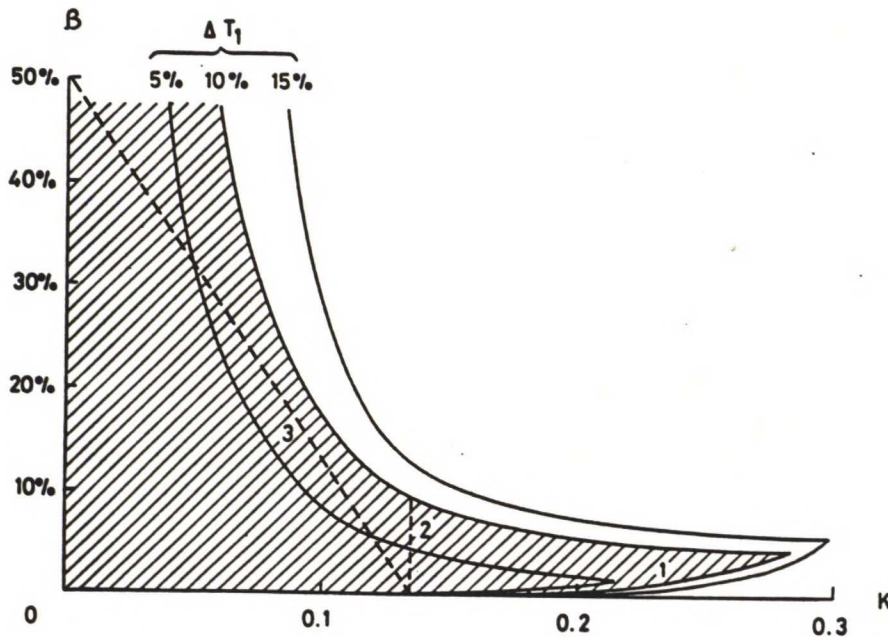
$$-T_n/T_{ch} \leq \delta_{cr} \leq T_R/T_{ch} \quad (8)$$

Pienimmät virheet saataisiin sovittamalla jakaja siten, että askelvasteparametrit ja f_5 täyttävät seuraavat ehdot [10,12]:

- $T_s \leq 500$ ns
- $T_n \approx T_R \leq 25$ ns
- $f_5 \geq 500$ kHz

f_5 on amplitudivasteessa 5 %:n poikkeamaa vastaava taajuus.

Konvoluutiosimulointien avulla on myös tutkittu syöksyjännitteen rinnannousuajan T_1 mittausvirheen riippuvuutta askelvasteparametreista. Kuvassa L3.2 on esitetty virheen riippuvuus askelvasteen ylityksestä β ja suhteesta K ($=T\alpha/T_1$).



Kuva L3.2. Rinnannousuajan T_1 mittauksen virheen riippuvuus askelvasteen yliheilahduksesta β ja parametrasta K ($=T\alpha/T_1$) [37].