

Tallinna Tehnikaülikool  
Elektrotehnika instituut

**Mittetavapärased mõõtemuundurid (NCIT)  
ning tehnilised tingimused nende rakenda-  
miseks Eesti elektrivõrguettevõtetes**

*Aruanne*

Tallinn 2012

Töö on valminud Elering AS ning TTÜ vahelise lepingu nr. LEP12092 / 15 aprill 2012 alusel.

Töödokumendi kuupäev: 30.11.2012

Töödokumendi vastutav autor: teadur Lauri Kütt, [lauri.kutt@ttu.ee](mailto:lauri.kutt@ttu.ee)

Lepingu vastutav täitja: professor Tõnu Lehtla, [tonu.lehtla@ttu.ee](mailto:tonu.lehtla@ttu.ee)

Täitjad: teadur Heigo Mõlder, [heigo.molder@ttu.ee](mailto:heigo.molder@ttu.ee)

Prof. Jaan Järvik, [jaan.jarvik@ttu.ee](mailto:jaan.jarvik@ttu.ee)

## Sisukord

1.	Eessõna ning ülevaade .....	5
1.1	Eessõna .....	5
1.2	Järelduste lühiülevaade .....	5
1.3	Terminid ning lühendid .....	6
1.4	Sümbolid ja tähised .....	6
1.5	Reguleerivad standardid .....	7
1.6	Sõltumatud rahvusvahelised erialakomisjonid.....	9
2.	Sissejuhatus .....	11
2.1	Mõõtemuundurid kõrgepingealajaama tüüpskeemis.....	11
2.2	Tavapärased ja mittetavapärased mõõtemuundurid .....	12
2.3	Mõõtemuundurite tunnussuurused .....	13
2.4	Mõõtsestsenaariumid .....	14
2.4.1	Kommertsarvestusmõõtmine põhisagedusel.....	14
2.4.2	Rikketalitlussuuruste mõõtmine .....	16
2.4.3	Elektrotoite kvaliteedi mõõtmised.....	19
2.5	Mõõtemääramatused.....	22
2.5.1	Mõõtemuunduri väljundi mõõtemääramatus .....	22
2.5.2	Mõõtesuuruste ülekandel tekkiv mõõtemääramatus .....	24
2.5.3	Mõõtesuuruste rakendamisel esinev mõõtemääramatus.....	27
3.	Mõõtemuundurite tehnoloogiad.....	28
3.1	Mõõtemuundurite liigitus.....	28
3.1.1	Mõõtefunktsioonid .....	28
3.1.2	Isolatsioonifunktsioonid.....	29
3.2	Magnetsüdamikuga pingetrafad.....	31
3.2.1	Magnetsüdamikuga pingetrafo tööpõhimõte .....	31
3.2.2	Eelised ja puudused .....	33
3.2.3	Näited praktilistest toodetest.....	34
3.3	Magnetsüdamikuga volutrafad.....	35
3.3.1	Magnetsüdamikuga volutrafo tööpõhimõte .....	35
3.3.2	Eelised ja puudused .....	36
3.3.3	Näited praktilistest toodetest.....	37
3.4	Mahtvuslikud pingetrafad .....	38
3.4.1	Mahtvusliku pingetrafo tööpõhimõte .....	38
3.4.2	Eelised ja puudused .....	39
3.4.3	Näited praktilistest toodetest.....	40
3.5	Mahtvuslikud pingejagurid .....	42
3.5.1	Mahtvuslike pingejagurite tööpõhimõte .....	42
3.5.2	Eelised ja puudused .....	43
3.5.3	Näited praktilistest toodetest.....	44
3.6	Takistuslikud pingejagurid.....	46
3.6.1	Takistuslike pingejagurite tööpõhimõte .....	46
3.6.2	Eelised ja puudused .....	48
3.6.3	Näiteid praktilistest pingejaguritest.....	48

3.7	Õhksüdamikuga voolutajurid .....	50
3.7.1	Õhksüdamikuga voolutajurid tööpõhimõte.....	50
3.7.2	Eelised ja puudused .....	51
3.7.3	Näiteid praktilistest õhksüdamikuga voolutrafodest .....	52
3.8	Optilist efekti kasutavad voolumuundurid.....	55
3.8.1	Optilise efektiga voolumuundurid tööpõhimõte .....	55
3.8.2	Eelised ja puudused .....	57
3.8.3	Näiteid praktilistest optilise efektiga voolumõõtemuunduritest .....	58
3.9	Optilist efekti kasutavad pingetrafod.....	60
3.9.1	Optilise efektiga pingetrafode tööpõhimõte.....	60
3.9.2	Näiteid praktilistest optilise efektiga pingetrafodest.....	62
3.10	Voolušundid .....	63
3.11	Kokkuvõte.....	64
4.	Näited mittetavapäraste mõõtemuundurite rakendamisest.....	66
4.1	Pilootprojektid alajaamades .....	66
4.1.1	Prantsusmaa .....	66
4.1.2	Kanada .....	69
4.1.3	Suurbritannia .....	71
4.1.4	Itaalia .....	72
4.1.5	Šveits.....	73
4.1.6	Saksamaa.....	75
4.1.7	USA .....	76
4.1.8	India .....	76
4.1.9	Austraalia .....	77
4.1.10	Hiina.....	78
4.2	Ülekandevõrguoperaatorite kogemus .....	79
4.2.1	EDF/RTE .....	79
4.2.2	Powerlink .....	80
4.3	Projektijuhtimiskogemused.....	81
4.3.1	National Grid.....	81
4.4	Laboratoorsed sõltumatud katsed.....	81
4.5	Kokkuvõte ja järeldused .....	84
5.	Mittetavapäraste mõõtemuundurite kasutuselevõtt –esmise projekti kavand .....	86
5.1	Ettevalmistavad tööd .....	86
5.2	Laboratoorsed katsed.....	86
5.3	Paigaldus alajaamas.....	87
5.4	Käivitamine ning katsetamine.....	88
5.5	Katseandmete kogumine ning süsteemi valideerimine.....	88
	Kasutatud kirjandus .....	90
	Lisa 1.Valguse omadused ja optilised komponendid	
	Optiline mõõtmisüsteem	
	Optilised elektriliste suuruste mõõtmiseks rakendatavad efektid ja nende rakendamine	
	tajurites – ülevaade	

# 1. Eessõna ning ülevaade

## 1.1 Eessõna

Käesolev aruanne on valminud lepingulise uurimistöö „Mittetraditsioonilistel mõõtetrafodel põhineva tehnoloogia (NCIT) analüüs ja tehnilised tingimused selle rakendamiseks Eesti elektrivõrguettevõtetes” raames. Töö tellija on Elering AS.

Uurimistöö eesmärk on kaardistada mittetraditsioonilisi mõõtemuundurite tehnoloogiad ning anda ülevaade hetkel saadaolevate mõõtemuundurite tiptasemest. Uurimistöö piirneb mõõtemuunduritega, mis on ette nähtud rakendamiseks eelkõige alajaamades kõrgepingeliste (110 kV) ning ülikõrgepingeliste (330 kV) ahelate mõõtmiseks.

## 1.2 Järelduste lühiülevaade

1. Mittetavapäraste mõõtemuundurite kasutuselevõtt on hetkel rõhutatud läbi liikumise uutele digitaalset sidet kasutatavatele alajaamadele. Lisavõimalusi, mida nimetatud mõõtemuundurid pakuvad peale suurema täpsuse, on kirjeldatud napilt. Seejuures suurem mõõtetäpsus on pigem seotud rikketalitluse tingimustes läbi viidud mõõtmistega, mitte tavaliste kommerts-arvestusmõõtmistega.

2. Mittetavapäraste mõõtemuundurite üheks lipulaevaks on olnud optilised mõõtemuundurid. Kuigi nende mõõteomadused laienevad teoreetiliselt väga suurte füüsiliste suuruste mõõtmiseks väga laias sagedusribas, ei ole praktikas seda võimalik hetkel rakendada tänu kasutatavate optiliste mõõtesüsteemide piirangutele.

3 Pakutavate mittetavapäraste mõõtemuundurite hulgast on ühed perspektiivseimad mahtvuslikud ning takistuslikud pingejagurid, Rogowski vöö tüüpi õhksüdamikuga voolumõõtemuundurid. Nende mõõteomaduste, eriti siirdeprotsesside mõõteomaduste kohta, on hetkel juba olemas sisuline tehnoloogiline tõestus. Lisaks sellele on nimetatud tajurid odavamad ning lihtsamad optilistest tajuritest.

4. Pilotprojektid, milles mittetavapärased mõõtemuundurid on rakendust leidnud, on seni olnud kopeerivas funktsioonis ning pigem on veendunud nende seadmete töös üldiselt. Seni on raporteeritud vaid häid tulemusi, mis kahtlemata on märk tehnoloogia küpsusest. Teadmata on samas mõõteseadmete töökindlus pika aja lõikes (5...10) ning seda karmimate ilmastikutingimuste olukorras.

5. Hetkel pakutavad seadmed ja vahendid ei suuda lihtsamates, väikese fiidrite arvuga alajaamades, pakkuda täiendavalt suuremat funktsionaalsust. Seepärast ei ole esimese sammuna mittetavapäraste mõõtemuundurite rakendamine kriitilistes sõlmedes otstarbekas. Pigem tuleks võtta suund nende katsetamisele ning alajaamade digitaalsidele üle viimisele, rakendades olemasolevaid mõõtemuundureid.

6. Hetkel ei ole mittetavapäraste mõõtemuundurite hinnad teada. Samas ühel näitel Suurbritanniast on mittetavapäraste mõõtemuunduritega seotud eelarvest võimalik leida vihje, et suuremat osa nende juurutamisega seotud kuludest kannavad tegelikult firmad, millised neid pakuvad. Tänapäeva seisuga ei ole ilmselt välja ehitatud ühtki kaubanduslikku tüüpiprojekti, mida saaks laiendada kõikidele ülekandevõrkude alajaamadele. Sellega seoses ei ole ka võimalik anda täpset ülevaadet, milliseks kujuneb mittetavapäraste mõõtemuundurite pilotprojekti eelarve.

### 1.3 Terminid ning lühendid

Antud aruandes kasutatakse järgmisi termineid ja lühendeid

Termin või lühend	Selgitus
APDU	Application protocol data unit
ASDU	Application service data unit
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Electriques
DPF	Displacement Power Factor
E/O	Elektrooptiline muundur
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
Mõõtemuundur	Mõõtemuundur on mõõtevahend, mis väljastab sisendsuurusest kindlal viisil sõltuva väljundsuuruse [1]. Muundur, mille ülesanne on edastada informatiivne signaal mõõteriistadele, arvestitele ja kaitse- või juhtseadmetele või sarnastele aparaatidele [2]
O/E	Optoelektriline muundur
Primaarklemmid	Ühendusklemmid, millele pinge või vool, mille väärtuse mõõtmine on eesmärgiks, on rakendatud [2]
Primaarsuurus	Mõõdetav elektriline kõrgepingetasemel füüsikaline suurus; suuruseks võib olla vool või pinge
Sekundaarklemmid	Klemmid, mille kaudu edastatakse informatiivne signaal mõõteriistadele, arvestitele ning kaitse- ja juhtseadmetele või sarnastele aparaatidele [2]
Sekundaarsuurus	Mõõtemuunduri väljundsuurus, mis vastab mõõdetavale primaarsuurusele; suuruseks võib olla vool või pinge
THD	Total Harmonic Distortion
TPF	True Power Factor

### 1.4 Sümbolid ja tähised

$\varepsilon_C$	Komposiitviga
$\varepsilon_I$	Vooluviga
$\varepsilon_U$	Pingeviga
$C_1$	Mahtvusliku pingejaguri kõrgepingekondensaatori mahtvus
$C_2$	Mahtvusliku pingejaguri vahepingekondensaatori mahtvus
$C_R$	Nimimahtvus
$f_R$	Nimitöösagedus
$F_v$	nimipingetegur
$I_{cth}$	Kestev termiline nimivool
$I_{dyn}$	Dünaamiline nimitaluvusvool
$I_p$	Primaarvoolu efektiivväärtus
$i_p$	Primaarvoolu hetkväärtus
$I_{PL}$	Nimipiir-primaarvool
$I_s$	Sekundaarvoolu efektiivväärtus
$I_{th}$	Lühiajaline termiline nimitalitusvool
$KD$	Kvantimisjärk
$k_r$	Mõõtemuunduri nimiülekanedesuhe
$L_C$	Mahtvusliku pingejaguri kompenseeriv mahtvus
$R_b$	Mõõtemuunduri nimiaktiivkoormus
$R_{ct}$	Sekundaarmähise alalisvoolutakistus

$S_r$	nimiväljundvõimsus
$T$	Periood
$U_m$	Seadme suurim lubatud kestevpinge
$U_P$	Primaarpinge efektiivväärtus
$U_{PR}$	nimiprimaarpinge
$U_S$	Sekundaarpinge efektiivväärtus
$U_{SR}$	nimisekundaarpinge
$U_{sys}$	Suurim võrgupinge
$Y_{baas}$	Baasvõrdlusuuruse (kvandi) väärtus

## 1.5 Reguleerivad standardid

Erinevad ülekandevõrkude alajaamad on pika ajaloo vältel läbinud standardiseerimise ning enamik nende ehitust ning tööd kirjeldavaid aspekte on kinnitatud läbi erinevate standardite.

Põhilised kõrgepinge alajaamades rakendatavate mõõtemuundurite kehtivad standardid on koondatud EN/IEC 60044 seeriasse (vt Tabel 1). Antud seeria standardite olulisusest annab märku asjaolu, et mitmed antud seeria standardid on tõlgitud eesti keelde. Standardijärgselt on fikseeritud nii terminid, tunnussuurused, vastupidavuskriteeriumid kui ka näiteks rakendamise eelsete katsete läbiviimine. Seeria standardid on kohati tugeva liiasusega, korrates termineid ning katsetingimusi. Viimane asjaolu on tingitud seeria ülesehitusest, millega on ette nähtud eraldi täielik standard pingetrafoodele, voolutrafoodele ning mahtuvuslikele pingetrafoodele, lisaks erinõuded kombineeritud mõõtetrafoodele. Seeria sisaldab ka standardid elektroonilistele mõõtemuunduritele (pinge- ja voolumuundurid), kuid viimased on pigem väga üldistavad.

**Tabel 1. EN/IEC 60044 seeria standardid.**

Standardi number	Kehtiv/ kehtetu	Nimetus
EVS-EN 60044-1:2002 +A2:2003	Kehtiv	Mõõtetrafod. Osa 1: Voolutrafod
EVS-EN 60044-2:2002 +A2:2003	Kehtiv	Mõõtetrafod. Osa 2: Induktiivpingetrafad.
EVS-EN 60044-3:2003	Kehtiv	Mõõtetrafod. Osa 3: Ühitatud trafod.
IEC 60044-4:1981	Kehtetu	Method for measuring partial discharges in instrument transformers
EVS-EN 60044-5:2004	Kehtetu	Instrument transformers - Part 5: Capacitor voltage transformers
EVS-EN 60044-6:2002	Kehtiv	Instrument transformers - Part 6: Requirements for protective current transformers for transient performance
EVS-EN 60044-7:2002	Kehtiv	Instrument transformers - Part 7: Electronic voltage transformers
EVS-EN 60044-8:2003	Kehtiv	Instrument transformers - Part 8: Electronic current transformers

Rahvusvahelise Standardiorganisatsiooni IEC töögrupi *TC38 Instrument Transformers* poolt on välja töötamisel uus ning põhjalikum seeria IEC 61869, mis asendab varasemad standardid. Antud standardite seeria on väga põhjalik ning määratleb tingimused nii tavapärastele mõõteseadmetele (induktiivsed pinge- ja voolutrafad, mahtuvuslikud pingetrafad, kombineeritud pinge- ja voolutrafad), kui ka uued mõõtemuundurid, mis on

koondatud klassi „elektroonilised mõõtemuundurid ning eraldiseisvad madala võimsusega tajurid” (vt. Tabel 2). Selle klassi standardid on veel eesti keelde kohandamata, kuid samas katavad kogu senise eesti keelde tõlgitud materjali.

**Tabel 2. EN/IEC 61869 seeria standardid.**

Standardi number	Olek seisuga nov 2012	Nimetus	Märkused
EVS-EN 61869-1:2009	Kehtiv	Mõõtetrafod. Osa 1: Üldnõuded	
IEC 61869-2:2012	Kehtiv	Instrument transformers - Part 2: Additional requirements for current transformers	Asendab EN 60044-1, on täienduseks EN 61869-1 juurde
EVS-EN 61869-3:2012	Kehtiv	Mõõtetrafod. Osa 3: Lisanõuded induktiivpingetrafodele	Asendab EN 60044-2, on täienduseks EN 61869-1 juurde
IEC 61869-4	Avaldamiseks heaks kiidetud (ADIS)	Instrument transformers - Part 4: Combined transformers	Asendab EN 60044-3, on täienduseks EN 61869-1 juurde
EVS-EN 61869-5:2011	Kehtiv	Mõõtetrafod. Osa 5: Lisanõuded mahtuvuslikele pingetrafodele	Asendab EN 60044-5, on täienduseks EN 61869-1 juurde
IEC 61869-6	Kavand heaks kiidetud (ACDV)	Instrument transformers - Part 6: Additional general requirement for electronic instrument transformers and low power stand alone sensors	Asendab EN 60044-7, EN 60044-8, on täienduseks EN 61869-1 juurde
IEC 61869-7	Võimalik uus töö (PWI)	Instrument transformers - Part 7: Additional requirements for electronic voltage transformers	Asendab EN 60044-7, on täienduseks EN 61869-1 ning EN 61869-6 juurde
IEC 61869-8	Võimalik uus töö (PWI)	Instrument transformers - Part 8: Additional requirements for electronic current transformers	Asendab EN 60044-8, on täienduseks EN 61869-1 ning EN 61869-6 juurde
IEC 61869-9	Hääletamiseks välja pakutud (CCDV)	Instrument transformers - Part 9: Digital interface for instrument transformers	On täienduseks EN 61869-1 ning EN 61869-6 juurde
IEC 61869-10	Kinnitatud uus töö (ANW)	Instrument transformers - Part 10: Additional requirements for lowpower stand-alone current sensors	Asendab EN 60044-8, on täienduseks EN 61869-1 ning EN 61869-6 juurde
IEC 61869-11	Kinnitatud uus töö (ANW)	Instrument transformers - Part 11: Additional requirements for lowpower stand-alone voltage sensors	Asendab EN 60044-7, on täienduseks EN 61869-1 ning EN 61869-6 juurde



Standardi number	Olek seisuga nov 2012	Nimetus	Märkused
IEC 61869-12	Võimalik uus töö (PWI)	Instrument transformers - Part 12: Additional requirements for combined electronic instrument transformer or combined stand alone sensors	On täienduseks EN 61869-1 ning EN 61869-6 juurde
IEC 61869-13	Kinnitatud uus töö (ANW)	Instrument transformers - Part 13: Stand alone merging unit	On täienduseks EN 61869-1 ning EN 61869-6 juurde
IEC 61869-14	Võimalik uus töö (PWI)	Instrument transformers - Part 14: Specific requirements for DC Current Transformers	On täienduseks EN 61869-1 ning EN 61869-6 juurde
IEC 61869-15	Võimalik uus töö (PWI)	Instrument transformers - Part 15: Specific requirements for DC Voltage Transformers	On täienduseks EN 61869-1 ning EN 61869-6 juurde

Lisaks sellele on sama standardiseeria juurde lisatud erinevaid töötingimusi ning lisanõudeid kirjeldavad üldised standardid. Nende standardite tunnuseks on number, mis on 100 või suurem. Nimetatud standardid on loetletud tabelis

**Tabel 3. IEC 61869 standardite seeriassa kuuluvad lisastandardid.**

Standardi number	Olek seisuga nov 2012	Nimetus	Märkused
IEC 61869-100	Võimalik uus töö (PWI)	Transient performance of Current Transformers - User Guide	
IEC 61869-101	Võimalik uus töö (PWI)	Standard Models for Instrument Transformers	
IEC 61869-102	Avaldamiseks heaks kiidetud (APUB)	Instrument Transformers - Ferroresonance oscillations in substations associated with inductive voltage transformers	
IEC 61869-103: 2012	Kehtiv	The use of instrument transformers for power quality measurement	

## 1.6 Sõltumatud rahvusvahelised erialakomisjonid

Rahvusvahelistest erapooletutest uurimiskomisjonidest tuleks esile tõsta IEEE (ingl. k. Institute of Electrical and Electronic Engineers) ning CIGRE (pr. k. „Conseil International des Grands Réseaux Electriques”). Mõlemad organisatsioonid koondavad tunnustatud rahvusvahelisi erialaspetsialiste ning on mittetulundusorganisatsioonid, mistõttu nendelt lähtuvat infot võib pidada õigeks ning neutraalseks.

Nii IEEE kui CIGRE on oma töös pööranud suurt tähelepanu mõõtemuunduritele ning mõlemal juhul on esitatud mitmeid aruandeid ning standardeid. USAs on IEEE vastav standard ka ametlikuks juhiseks [3].

Mittetavapäraste ping- ja voolutrafode standardite ja juhiste täiendamine toimub praegu aktiivselt. CIGRE uurimisgruppide töökavades on teemagrupi *A3 - High-Voltage Equipment* töögrupi W3.15 plaanis on avaldada eraldi aruanne „Non-conventional Instrument Transformers” [4]. Lisaks sellele on töö käimas grupis W3.31, mis kannab väga sarnast tiitlit „Non-conventional Instrument transformers with digital output”.

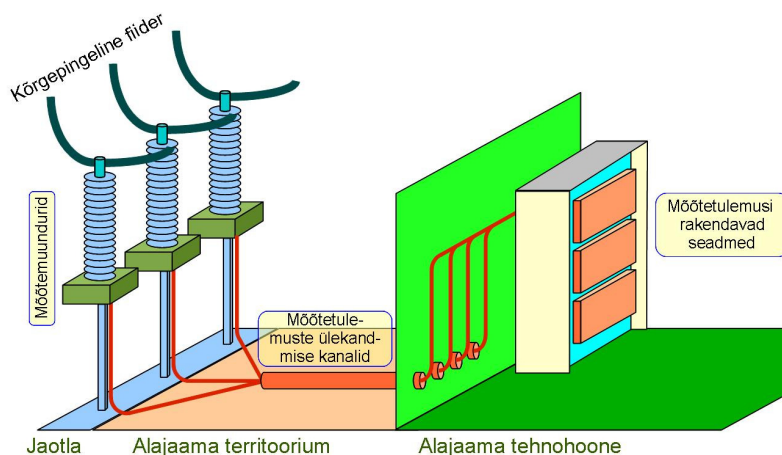
IEEE on avaldanud uue juhend-standardi „Standard for Optical AC Current and Voltage Sensing Systems” esimese visandi [5], mis kirjeldab ära sarnased teemad nagu IEC 60044-7 ja IEC 60044-8 standardid. Tuleb meeles pidada, et IEEE on Ameerika Ühendriikides ning Kanadas sarnase standardi jõuga, kui IEC standardid Euroopas. IEEE standardi visandi hilisem leitud versioon on detsembrist 2010, mistõttu võib eeldada lõpliku standardi peatset valmimist.

USAs tegutseb mittetulundusühendus UCA International Users Group [6], mis on toeks erinevate kasutajate ning tootjate vahel reaalajas töötavate lahenduste standardite rakendamisel. Näiteks on selle organisatsiooni poolt intensiivselt vaatluse all standardiseeritud IEC 61850, mille alla kuuluvad ka mõõtemuunduritega infovahetuseks rakendatav standard IEC 61850-9-2. Viimase kohta on UCA avaldanud omapoolse juhendmaterjali, mis on käsitleb viimatinimetatud standardi mõõtemuunduritega seotud rakendusosa. Tinglikult nimetatakse seda juhendmaterjali ka „kergeks versiooniks” suurestmast standardist ning kannab tinglikku nimetust 61850-9-2LE (LE tähenduseks inglise keelses „Light Edition”) [7].

## 2. Sissejuhatus

### 2.1 Mõõtemuundurid kõrgepingealajaama tüüpskeemis

Kõrgepingelistes elektrienergia ülekandevõrkudes on suure ülekantava võimsuse ning ökonoomsuse kriteeriumide (liini hind, ülekande kaod) huvides rakendatud pingeid alates tasemest 110 kV (liinipinge) ning voolusid, mis ulatuvad mõnekümnest amprist kuni üle kiloampri. Võrgu töö juhtimiseks on vaja pidevalt jälgida mitmeid elektrilisi parameetreid, s.h pinget, voolu, võimsust, võimsustegurit, ülekantud energiat jpm. Tüüpiliselt jälgitakse pinget ja voolu hetkväärtusi ning pinget ja voolu vahelist nurka, mis on tuletatav mõõtmistulemusi kõrvutades.



**Joonis 2.1. Mõõtemuundurid alajaama koosseisus ja nendega seotud olulisimad lülid.**

Liinide elektrilisi parameetreid rakendavad seadmed on releekaitsekontrollerid, arvestid, regulaatorid, sündmuste salvestid, rikke asukoha määravad jpt, mis töötavad madalpingel ning väikese vooluga. Mõõtemuundurid on antud kontekstis seadmed, mis väljastavad nende sisendisse rakendatud kõrgel potentsiaalitasemel sisendsuurusest kindlal viisil sõltuva väljundsuuruse mõõtesignaali kujul. Mõõtemuundurite peamine roll alajaamas on sõnastatav kui

- 1) kõrgepingelise ning suure voolu signaali muundamine madalapingeliseks, madala võimsusega mõõtesignaaliks;
- 2) mõõtesuuruse info viimine kõrgelt potentsiaalilt maa potentsiaali lähedasele tasemele.

Kui tegemist on elektrilise suuruse (vool, pinget) mõõtmise rakendusega ning väljundiks on samuti pinget ja vool, võib sellist mõõtmist vaadelda otseselt elektrilis-elektrilise muundurina. Samuti võib rakendada mitmesuguseid tajureid, mis aitavad kõrgel pingetasemel olevat suurust täpselt ja ohutult määrata.

Elektriliste suuruste mõõtmise korrektsuse ning mõõtetulemuste usaldusväärsusega kontekstis tuleb arvestada

- 1) mõõtemuunduri, mis annab väljundiks fiidri elektriliste parameetrite mõõtetulemuse, omadustega
- 2) mõõtetulemuse ülekandva kanali, mis viib mõõtetulemuse jaotlast kuni mõõtetulemust rakendava seadmeni, omadustega
- 3) mõõtetulemust rakendava seadme omadustega

Käesolevas aruandes on vaadeldud kõikide nimetatud lülide mõju mõõtetulemuse jaoks. Aruandes keskendub analüüs võimalikult väikese veaga mõõtetulemuste tagamisele, erinevate mõõtestsenaariumide korral.

## 2.2 Tavapärased ja mittetavapärased mõõtemuundurid

Ülekandevõrkude alajaamades võib seoses mõõtemuundurite tööpõhimõtete ning väljundi omadustega jagada mõõtemuundureid kaheks:

- 1) *Tavapärased e. konventsionaalsed mõõtemuundurid* omavad väljundit, mis on ette nähtud releekaitseadmete toiteks, mitte ainult mõõtetulemuste edastamiseks. Tavapäraste mõõtemuundurite definitsiooniks võiks pidada standardite EVS-EN60044 järgi antud määratlusi mõõtetrafodele. Tavapärased mõõtemuundurid on sobilikud tööks näiteks elektromehhaaniliste releedega varustatud alajaamades. Mõõtemuundurid on sellisel juhul võimsa tavatalitluse väljundkoormusega (kümned ning sajad VA) ning mõõteaparatuuri sisendi koormus on suur. Tavapärased mõõtemuundurid on reeglina passiivsed, mis tähendab, et nad ei vaja tööks täiendavat elektrilist toidet.
- 2) *Mittetavapärased e. mittekonventsionaalsed mõõtemuundurid*. Sellised mõõtemuundurid omavad väljundit, mis on ette nähtud ainult mõõtetulemuse edastamiseks. Mittetavapäraste mõõtemuundurite definitsiooniks võiks pidada standardite EVS-EN61869-1 järgi antud määratlusi alajaama mõõteseadmetele. Mittetavapäraste mõõtemuundurite väljundi võimsus on väike ning võib olla väikepingeline või optiline analoogsignaali või diskreetne info. Kuna mõõtemuundurite trafod on sellises lahenduses kohmakad ning ebapraktilised, rakendatakse sageli taolistes mõõtemuundurites erinevaid tajureid, millelt tulev mõõtesuurusega signaal on vaja täiendavalt võimendada või töödelda, et väljastada see mõõtesuurust rakendavale aparaadile. Mittetavapärased mõõtemuundurid võivad olla aktiivsed e. vajada tööks välist energiavarustust.

Tavapäraste mõõtemuundurite tüüpilised esindajad on pinge- ja voolutrafod, s.h teatud mõõndustega mahtuvusliku pingejaguriga pingetrafod (viimane ei sobi vanemate releekaitseadmete toiteks). Klassikaline alajaama releekaitse on põhinenud elektromehhaanilistel releedel, mis töötavad vastavalt neid läbivale voolule või nende klemmidele rakendatavale pingele. Igas alajaamas võis nimetatud releesid olla kümneid ning iga rakendamiseks võis vaja olla paari VA koormust. Sellest tingitult võis taoliste releede eesmärgipäraseks rakendamiseks vajalik summaarne võimsus oluliselt suuremgi, kui mõniseda VA. Olukord muutus elektroonsete releekaitseadmete kasutuselevõttuga, kuna need on aktiivseadmed ning saavad energiavarustuse mõõteväljunditest sõltumatult ahelatelt.

Üleminek täiselektronse releekaitse süsteemiga alajaamadele on toonud kaasa mõõtemuundurite nõutavate väljundvõimsuste vähenemise, kuigi pinge- ja vooluparameetrid püsivad suhteliselt muutumatutena. Nõutavate võimsuste vähenemine on avanud uusi võimalusi erinevate uute mõõteseadmete, näiteks mahtuvuslikud pingetrafode, rakendamiseks skeemis. Tüüpilised pinged pingetrafode väljundis on olnud 100 V ning voolutrafodel 5 A. Viimane sobis releede toiteks, kuid samas põhjustas suuri kadusid; varasemal ajal peeti 1 A voolutugevust ka liialt häirealtiks [8].

Mittetavapäraste mõõtemuundurite näideteks on mahtuvuslikud ja takistuslikud pingejagurid, optilised pinge- ja vooluandurid ning õhksüdamikuga vooluandurid. Sellistel seadmetel on selgelt eraldatavad tajuri ning signaalitöötlemise seotud komponendid.

Lisaks võib eristada nn. hübriid-lahendusi, mis näiteks optilise tajuri abil tuvastavad pingeväärtust, kuid väljund antakse läbi täiendava võimendi. Sellisel juhul saab tajurit rakendada süsteemides, mis põhinevad tavapärastele mõõtemuunduritele.

## 2.3 Mõõtemuundurite tunnussuurused

Standardijärgseks definitsiooniks mõõtemuundri kohta võib tuua kohandatud lause. Mõõtemuundur – mõõtemuundur, mille sekundaarsuurus on tavakasutustingimustel võrdeline primaarsuurusega ja faasinurga erinevus sellest on etteantud ühendusviiside korral ligilähedaselt null; mõõtemuundur on mõõtevahenditele, arvestitele, releeseadmetele ja teistele sarnastele seadmetele mõõtesignaali edastamiseks ettenähtud mõõtemuundur.

Kaitsemõõtemuundur – kaitseleede ja juhtimisseadmetele mõõtesignaali edastamiseks ettenähtud mõõtemuundur.

Tunnussuurused võib jaotada erinevatesse gruppidesse:

### 1) Nimitalitlussuurused

$U_m$  – seadme suurim kestevpinge – suurim faasidevahelise pinge eff. väärtus, millele muundur vastavalt tema isolatsioonile on kavandatud;

$U_{sys}$  – suurim võrgupinge – võrgu suurim talitluspinge, mis esineb tavatalitlustingimustel võrgus mis tahes ajamomendil võrgu mis tahes punktis;

$f_R$  – nimisagedus, mille puhul on tagatud mõõtemuunduri tunnussuurused

$K_n$  – nimiülekanadesuhe, nimiprimaarsuuruse suhe sekundaarsuurusesse;

$I_n$  – nimiprimaarvool; primaarvoolu väärtus, mille suhtes on mõõtemuunduri tunnussuurused määratletud,

$I_{sek,n}$  – sekundaarvoolu väärtus, mille suhtes on mõõtemuunduri tunnussuurused määratletud;

$U_{pr}$  – primaarpinge väärtus, mille suhtes on pingemõõtemuunduri tunnussuurused määratletud

$U_{sr}$  – nimisekundaarpinge, sekundaarpinge väärtus, mille korral selle talitus on määratud

$\Delta\varphi$  – nurgaviga, primaar- ning sekundaarsuuruse vektorite faasierinevus, kui vektorite suund on valitud selliselt, et ideaalse mõõtemuunduri korral oleks nendevaheline nurk võdne nulliga;

$R_n$  – nimikoormus; koormuse väärtus, millel põhinevad täpsusnõuded;

$R_b$  – nimiaktiivkoormus – sekundaariga ühendatud aktiivkoormuse väärtus oomides;

### 2) Ülekoormustaluvussuurused

$F_v$  – nimipingetegur – tegur, millega korrutatakse nimiprimaarpinget selleks, et määrata suurim pinge, mille juures trafo peab rahuldama asjakohaseid soojuslikke nõueid määratletud aja jooksul ja asjakohaseid täpsusnõudeid.  $F_v$  väärtused on toodud pingemõõtemuundurite standardites (vt. Tabel 4.).

Tabel 4. Nimipingeteguri standardijärgsed väärtused [9].

Fv	Nimiaeg	Primaarmähise ühendusskeem ja võrgu maandamisviisid
1,2	Pidev	Faaside vahel mistahes võrgus
1,2	Pidev	Faasi ja maa vahel efektiivselt maandatud neutraaliga võrgus
1,5	30 s	
1,2	Pidev	Faasi ja maa vahel mitte-ef. Maandatud võrgus maalühise automaatse väljalülitamisega
1,9	30s	
1,2	Pidev	Faasi ja maa vahel isoleeritud neutraaliga võrgus ilma maalühise automaatse välja-lülitamiseta või resonants-maandatud võrgus ilma maalühise automaatse välja-lülitamiseta
1,9	8h	

$I_{th}$  – Lühiajaline termiline nimitalitlusvool – primaarvoolu ef. väärtus, mida trafo peab kahjulike tagajärgedeta taluma ühe sekundi jooksul, kui sekundaarmähis on lühistet. Võib olla ka kokkuleppeliselt ühest sekundist erinev aeg.

$I_{dyn}$  – dünaamiline nimitalitusvool – primaarvoolu tippväärtus, millel mõjuvate elmagm jõudude toimet tuleb lühistet sekundaarmähisega trafol taluda ilma elektriliste või mehhaaniliste kahjustusteta;

$I_{cth}$  – kestev termiline nimivool – primaarmähises kestvalt lubatava voolu väärtus, kui sekundaarmähisega on ühendatud nimikoormus, ilma et ületemperatuur ületaks maksimaalset väärtust;

$I_{PL}$  – mõõteriista nimipiir-primaarvool – vähim primaarvoolu väärtus, mille juures mõõde-voolutrafo komposiitviga on 10% või enam, kui seejuures sekundaarkoormus on võrdne nimikoormusega

### 3) Isolatsiooni iseloomustavad suurused

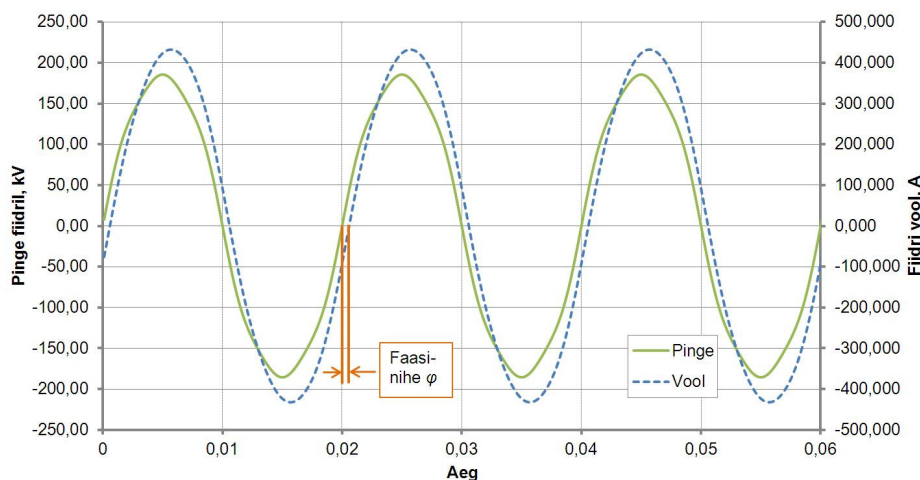
Nimiisolatsioonitase – pingeväärtuste kombinatsioon, mis iseloomustab trafo isolatsiooni võimet taluda elektrilisi mõjusid;

Välguimpulsi nimitaluvuspinge (tippväärtus) – standardse välguimpulsi (1,2 / 50  $\mu$ s) kujulise pingepulsi suurim pinge, mida seade peab taluma.

## 2.4 Mõõtsestsenaariumid

### 2.4.1 Kommertsarvestusmõõtmine põhisagedusel

Kommertsarvestused on võrgu tavatalitluses tähtsaimad mõõtmised. Pinge- ja voolu mõõtmisel saadud väljund peab vastama tegelikult pinge- ja voolu väärtusele liinis. Lisaks peab mõõtemuunduri väljundpinge ja –vool omama väikest nihkenurka.



Joonis 2.2. Võrgupinge siinussuuruste mõõtmine kommerstarvestuseks.

Olulisimateks parameetriteks on pinge ja voolu efektiivväärtused

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt},$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

kus  $U$  – mõõdetud pinge efektiivväärtus,  $T$  – pinge siinussvõnkumise ühe perioodi kestvus,  $u$  – mõõdetud pinge hetkväärtus;  $I$  – mõõdetud voolu efektiivväärtus,  $i$  – mõõdetud voolu hetkväärtus.

Kasutatava energia ja võimsuse määramiseks tuleb arvesse võtta ka pinge ja voolu põhiseduslike siinuskomponentide vaheline faasinihe  $\varphi$ . Kasutatav aktiivvõimsus  $P$  võrgu põhisedusel on leitav kui

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi,$$

kus tegurit  $\cos \varphi$  nimetatakse ka (nihke)võimsusteguriks (ingl. k. *displacement power factor*, DPF).

Praegused arengusuunad erinevate suure võimsusega muundurite kasutamisel elektrivõrgus nõuavad täiendavalt kõrgemate võrgu põhisedusega (50 Hz) kordsete sagedusega harmooniliste pinge- ja voolukomponentide (harmoonikute) arvestamist. Selleks tuleb võrgu pinge- ja voolukõver lahutada erinevateks  $h$ -ndat järku harmoonilisteks siinuskomponentideks Fourier' teisenduse abil. Igal sellisel harmoonikul on oma amplituud ning faasinihe võrreldes põhisedusliku komponendiga. Tegelik aktiivvõimsus leitakse sel juhul, kui

$$P_{teg} = \sum_{h=1}^{\infty} U_h \cdot I_h \cdot \cos \varphi_h,$$

kus  $U_h$  on  $h$ -nda pingeharmooniku efektiivväärtus,  $I_h$  on  $h$ -nda vooluharmooniku efektiivväärtus ning  $\varphi_h$  on nende vaheline faasinihe. Tegelik näivvõimsus leitakse kui

$$S_{teg} = \sqrt{\left( \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \right) \left( \sum_{h=1}^{\infty} U_h^2 \right)},$$

ning tegelik võimsustegur (ingl. k. *true power factor*, TPF)

$$TPF = \frac{P_{teg}}{S_{teg}}$$

Energia mõõtmiseks tuleb võimsus korrutada ajaga, mille vältel mõõtmise toimus

$$W = \int_{t=0}^{T_{kogu}} p_{teg}(t) dt,$$

kus  $p_{teg}$  on hetkaktiivvõimsus ajahetkel  $t$ .

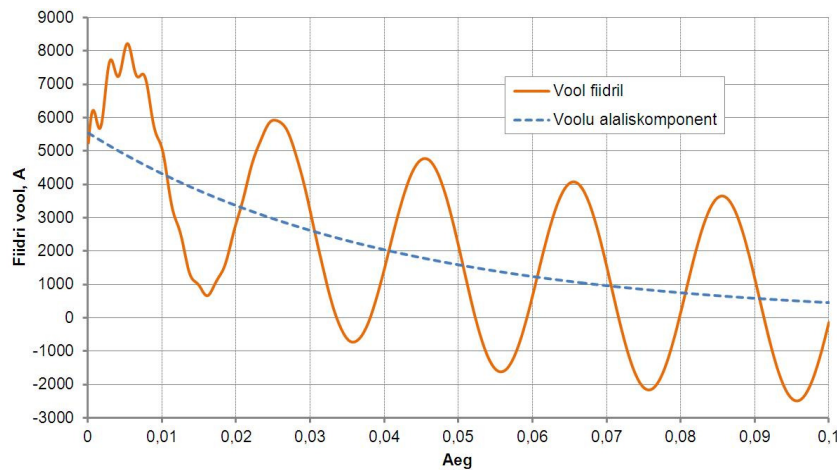
Lihtsaimate kommertsarvestusmõõtmiste puhul on ebatäpsuste allikateks

- pinge(mõõte)viga  $\varepsilon_U$ ;
- voolu(mõõte)viga  $\varepsilon_I$ ;
- pinge(mõõtmisel esinev) nurgaviga  $\Delta\varphi_U$ ;
- voolu(mõõtmisel esinev) nurgaviga  $\Delta\varphi_I$ ;

Loetletud vead on üldiselt standardiseeritud mõõtmisklassidega (vt. „2.5 Mõõtemääramatused”). Et tagada kommertsarvestuste täpsus, rakendatakse mõõtemuundureid klassiga 0,2 või 0,5; erimõõtmisteks ka madalamat klassi 0,1.

## 2.4.2 Rikketalitlussuuruste mõõtmine

Rikketalitlusvoolude mõõtmine tähendab normaaltalitlusest oluliselt erinevaid füüsikalisi suursi ja nende kombinatsioone.



Joonis 2.3. Näide voolu mõõtmisest võrgu rikketalitluses.

Võrreldes normaaltalitlussuurustega, erinevad need

1) mõõdetavate suuruste absoluutväärtuse poolest

- võrreldes fiidri normaaltalitlusvooluga, võib lühise tekkimisel olla löökvool kümneid kordi suurem;
- võrreldes fiidri normaaltalitluspingega, võib lühise korral esineda kuni 1,4 korda kõrgem pinge (piiratud võrgu projekteerimisel rakendatavate meetmetega).

2) mõõdetavate suuruste sageduse poolest

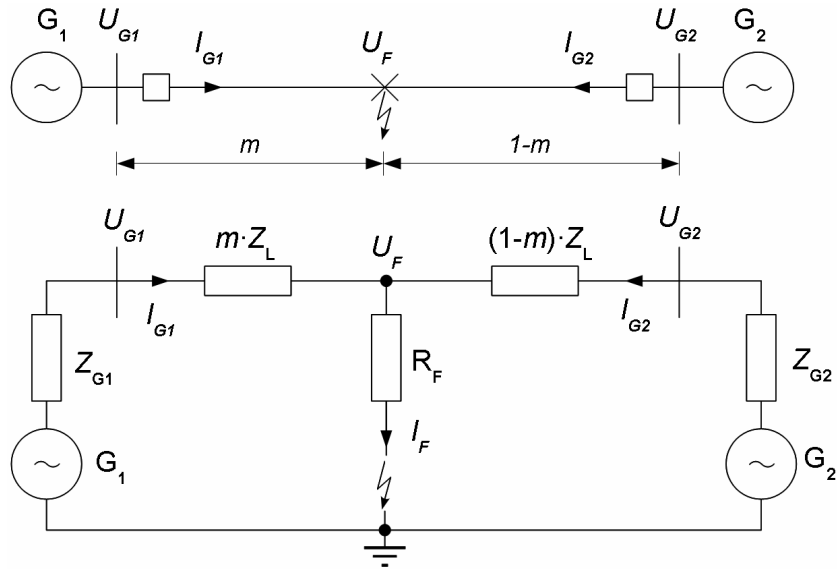
- esineda võivad võrgusagedusest oluliselt kõrgemal sagedusel olevad pinge- ja voolukomponendid;
- esineda võivad aperioidilised (alalis-) pinge- ja voolukomponendid.

Mõõtemuundurite puhul on tihti rikketalitlussuuruste mõõtmine seotud mitmete füüsikaliste (magnetahelate küllastus, jääkmagneetuvus, salvestunud laengud jpm) ning konstruktsiooniliste piirangutega (elektrodünaamilised jõud, isolatsioonitugevus jpm). Seepärast on rikketalitlussuuruste mõõtmiseks tüüpiliselt ette antud suurem tolerants. Näiteks on kaitsefunktsioonide jaoks rakendatavate tavapäraste mõõtemuundurite jaoks määratud standardi alusel täpsusklassid pingemõõtmisel 3% ning 6% ning voolumõõtmisel 5% ning 10%.

Suuremat mõõtetulemuste tolerantsi võib esimeses lähenduses käsitleda kui vajalikku meedet mõõtepiirkonna ulatuse laiendamiseks. Samas on ebatäpsuse kasvamine halvav ka alajaama mitmete funktsioonide jaoks:

- 1) Rikke asukoha automaatne määramiseks kasutatakse sageli meetodeid, mis rikke asukoha leidmiseks võtavad aluseks lühisel esinenud pinge- ja voolumõõtmise tulemused [10]. Selliste rikke asukoha määramise meetodite puhul on ebatäpsuste allikaid väga palju, mistõttu pinge- ja voolu mõõtetulemustest sõltub suurem osa mõõtetulemuse kasutamise usaldusväärsusest. Mida ebausaldusväärsemad on lühisvoolude ning lühise ajal esinenud pinge mõõtetulemused, seda suurem on ka rikkekoha määramise ebatäpsus.





Joonis 2.4. Rikke asukoha määramise aseskeem.

Rikke asukoha määramiseks mõõdetakse rikke ajal fiidri voolu ning pinget. Eeldades, et  $Z_L$  on kogu liini näivtakistus, on vaja leida osa sellest, mis rikkekohas olevale voolule mõju avaldab. Pinge rikkekohas on leitav kui

$$U_F = m \cdot Z_L \cdot I_{G1} + R_F \cdot I_F,$$

kus  $I_{G1}$  on alajaamast „1” mõõdetud rikkevool,  $R_F$  on rikkekoha takistus ning  $I_F$  on vool rikkekohas. Vool rikkekohas summeerub alajaamast „1” ning alajaamast „2” tulevast voolust. Rikkekoha näivtakistus, mõõdetuna alajaamast „1” saab avaldada kui pinge alajaamas „1” jagada vooluga, mis on alajaamas „1”

$$Z_{FG1} = \frac{U_{G1}}{I_{G1}} = m \cdot Z_L + R_F \frac{I_F}{I_{G1}} = m \cdot Z_L + R_F \frac{1}{d_s \cdot n_s},$$

kus  $d_s$  on ahela voolujaotustegur ning  $n_s$  on ahela koormustegur. Esimene neist on määratud võrgu aseskeemis olevate näivtakistuste kaudu kui

$$d_s = \frac{Z_{G2} + (1-m)Z_L}{Z_L + Z_{G1} + Z_{G2}},$$

teine aga vooludega, mis olid mõõdetavad enne ( $I_{G10}$ ) ja peale ( $I_{G1}$ ) rikke tekkimist

$$n_s = \frac{I_{G1}}{I_{G1} - I_{G10}}.$$

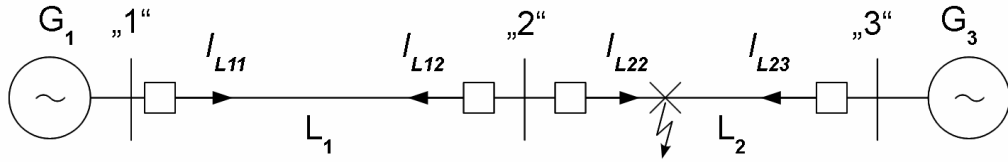
Üks lihtsamaid rikke asukoha leidmise meetodeid on ka lihtne reaktiivtakistuste meetod, mis jätab välja ebatäpse võimaliku rikkekoha takistuse määramise. Selles arvestatakse pinge, voolu ning takistuse imaginaarkomponentidega

$$m = \frac{\text{Im}\left(\frac{U_{G1}}{I_{G1}}\right)}{\text{Im}(Z_L)}.$$

Üldiselt rakendatakse seoseid, mis annavad suurema täpsuse erinevate võrgu ehituslike eripärased arvesse võttes. Samas ei saa ükski taoline meetod läbi ilma täpsete rikke ajal

esinevate pinge ja voolu mõõtmisteta. Seostest on näha, et mõõtetulemuse viga kandub proportsionaalselt üle rikke asukoha määramise tulemusse.

- 2) Diferentsiaalkaitset rakendatakse erinevate rikkega alajaama seadmete ning liinide selgitamiseks. Diferentsiaalkaitse põhimõte on voolu mõõtmine mõlemal pool kaitstavat objekti ning selle järgi rikkega komponendi tuvastamine.



**Joonis 2.5. Diferentsiaalkaitse tööpõhimõte.**

Diferentsiaalkaitse kaitsepiirkond võib olla kahe punkti vahel, milles mõlemas toimub voolu mõõtmine. Kaitse ise töötab kahe mõõdetud voolu võrdlemisel ning Kirchhoffi I seadust järgides. Nimelt, kui vaadeldaval objektil ei ole riket, siis on mõlemas objekti punktis voolud võrdsed (trafode puhul võivad olla ka seotud trafo ülekanalite kordse tulemusena) ning nende summa on ligikaudu null. Kui aga vaadeldaval objektil on rike, siis on objekti ühes otspunktis vool suunatud objektile ning sama kehtib ka teises objekti otspunktis oleva voolu kohta. Voolude suur erinevus annab märku objekti rikkest.

Diferentsiaalkaitse töö näitestsenaarium on kirjeldatud joonisel 2.5, kui liinil  $L_2$  on rike. Liini  $L_1$  voolude  $I_{L11}$  ning  $I_{L12}$  mõõtmisel tuvastatakse sama, kuid vastasmärgiga vool, mis summamana annab kokku nulli. Liini  $L_2$  voolude  $I_{L22}$  ning  $I_{L23}$  mõõtmisel aga liigub vool rikkekohta mõlemast liini otsast, mistõttu nende voolude summaarne suurus on väga suur.

Diferentsiaalkaitse puhul on määratakse ära sättevool, mille ületamisel loetakse objekt rikkis olevaks [19]. Sättevool määratakse kui

$$I_s = k_{varu} \cdot I_{h, arv},$$

kus  $I_{h, arv}$  on arvutuslik hälbevool, mis omakorda leitakse kui

$$I_{h, arv} = k_a \cdot k_s \cdot \varepsilon \cdot I_{k, välis, max},$$

kus  $k_a$  – lühisvoolu aperioidilist komponenti arvestav tegur ( $k_a = 2$  tavalise voolurelee puhul;  $k_a = 1$  küllastustrafo ning mikroprotsessorrelee korral),  $k_s$  – mõõtemuundurite sarnasust arvestav tegur (samatuübiliste korral  $k_s = 0,5$ ; erituübiliste korral  $k_s = 1$ ),  $\varepsilon$  on mõõtemuunduri mõõtemääramatus ning  $I_{k, max, välis}$  on maksimaalne kaitsepiirkonnast väljas esineva lühise vool.

Lühisetalitluse parameetrite täpne selgitamiseks on oluline, et mõõtetrafol oleks piisavalt lai lineaarne mõõtepiirkond. Konservatiivsemates releekaitserakendustes oli kasutuspiiriks paljudel juhtudel näiteks liigvoolu avastamine, mille puhul mõõtetulemuse ebatäpsus võis olla mitmeid protsente ning see oli aktsepteeritav. Uuemate alajaamade kaitseadmete funktsionaalsusesse kuuluvad ka mitmed diagnostikafunktsioonid, mille usaldusväärse töö jaoks on rikketalitlussuuruste mõõtmise täpsus üks võtmegureid.

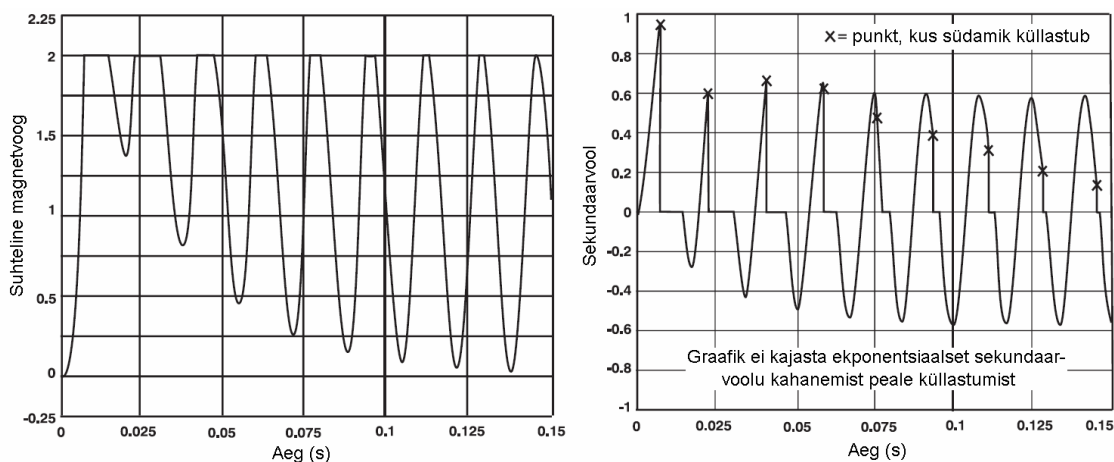
Lühisetalitluse siirdeprotsesside puhul on oodata rohkete kõrgemate sagedustega pinge- ja voolukomponentide esinemist, kuid sama tõenäoline on ka aperioidiliste alalispinge ning – voolukomponentide esinemise. Seetõttu on täpse rikketalitluse mõõtmise eelduseks

täiendavalt lisaks pinge- ja vooluväärtuste lineaarse mõõteulatuse laiusele ka alalis- ning kõrgemate sagedustega pinge- ja voolukomponentide mõõtmine.

Rikketalitlussuurused, mida mõõtemuundurid peaksid mõõtma, võivad olla oluliselt suuremad, kui nimitalitlussuurused. Magnetsüdamikuga voolutrafo puhul on küllastumise oht eriti suur, küllastunud voolutrafo sekundaarvool ei ole enam võrdeline primaarvooluga. Olukorra näitlikustamiseks olgu stsenaarium [12] (vt. Joonis 2.6), kui mõõdetav rikketalitusvool sisaldab nii tugevat vahelduvvoolukomponenti kui ka alalisvoolukomponenti (vt. Joonis 2.3). Antud näites saavutab voolutrafo südamik küllastuse, kui südamiku magnetvoog jõuab tasemele 2 suhtelist magnetvoogu. Voolutrafo sekundaarvoolu määrab magnetvoogu muutumise kiirus. Küllastuse tekkimisel magnetvoogu tugevus ei kasva sama kiirelt kui enne küllastumist, pigem muutub magnetvoogu kasvukiirus nullilähedaseks. Seetõttu ka voolutrafo sekundaarvool kahaneb nullini (teoreetiliselt), realselt aga kahaneb eksponentsiaalselt ajakonstandiga

$$\tau_{TR} = \frac{L_{CT}}{R_{CT}},$$

kus  $L_{CT}$  on voolutrafo induktiivsus ja  $R_{CT}$  on voolutrafo sekundaarahela kogutakistus (antud seos kehtib ainult magnetsüdamikuga voolutrafo puhul).



**Joonis 2.6. Voolutrafos olev suhteline magnetvoog, kui küllastumise piir on 2 suhtelist magnetvoogu. Paremal voolutrafo sekundaarvool, kui voolutrafo küllastub.**

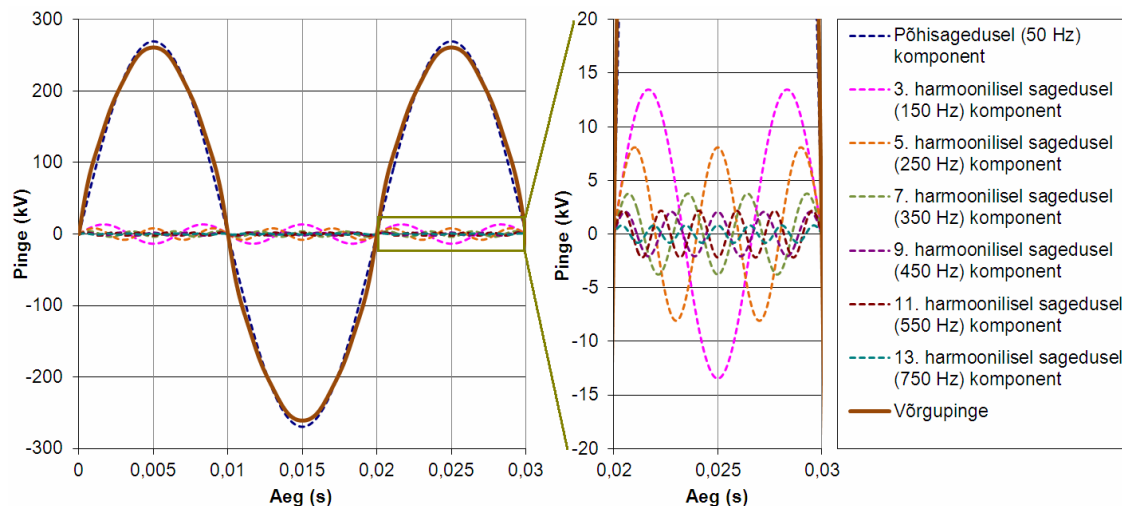
Peale voolutrafo küllastumist ei ole primaarvool ja sekundaarvool enam proportsionaalses suhtes ning sekundaarvoolu väärtus võib erineda primaarvoolu väärtusest oluliselt. Diferentsiaalkaitse töös on valerakendumiste oht tõsine juhul, kui liini ühes otspunktis olev voolutrafo küllastub ning teine ei küllastu, samuti kui ühe voolutrafo küllastus on sügavam kui teisel voolutrafol.

### 2.4.3 Elektrotehnoloogia kvaliteedi mõõtmised

Tänu mittelineaarsete tarbijatele ning ka allikate hulga kasvule ülekandevõrkudes, on järjest enam oluline täpne kõrgemate harmooniliste pinge- ja voolukomponentide (harmoonikute) mõõtmine. Võrgus esinevad pinge- ja vooluharmoonikud tähendavad vastavalt siinuspinge- ja -voolukõvera moonutumist, mille levik võrgusõlmede seadmeteni ning tarbijateni on ebasoovitav. Kõrgemad harmoonikud põhjustavad tüüpiliselt suuremaid kadusid võrgutrafoodes ning samuti tingivad suurema koormuse isolatsioonile, mis viib isolatsiooni kiirema vananemiseni. Tüüpilisteks kõrgemaid harmoonikuid põhjustavateks seadmeteks on erinevad pooljuhttehnoloogial töötavad muundurid, näiteks tuulikute inverterid ning FACTS-

seadmed (ingl. k. „Flexible Alternating Current Transmission System”, paindlikud jõupooljuhtmuunduritega seadmed vahelduvvooluvõrgu talitusparameetrite juhtimiseks), mis ei tööta puhtas siinus-talitus.

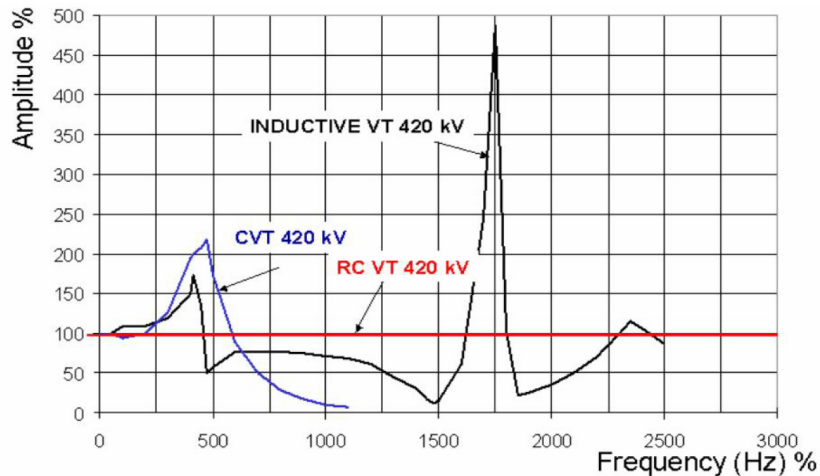
Kõrgemad harmoonikud esinevad alati, kui tegemist ei ole puhta siinussignaali. Seega on kõrgemate sageduste mõõtmise funktsionaalsus mõõtemuunduritele oluline, kuna mittesiinussignaali mõõtmisel ei ole vastasel juhul mõõtetulemus korrektn. Mittesiinussignaali lahutamise näide erinevateks kõrgema harmoonilise sagedusega komponentideks vt. Joonis 2.7.



**Joonis 2.7. Võrgust mõõdetud pinge ja selles olevad kõrgemate harmooniliste sagedustega pingekomponendid.**

Võrgus esinevad kõrgemad harmoonikud võivad sagedusskaalal ulatuda kümnetesse kilohertsidesse. Kõrgemaid harmoonikuid tuleks eristada rikketalitluse suuruste mõõtmisest; tegemist on normaaltalitluse korral pikema aja jooksul esinevate suurustega. Standard IEC 61000-3-6 sätestab harmoonikute parameetrite mõõtmise kuni 40. või 50. põhikomponendi sageduseni, 50 Hz puhul on selleks vastavalt 2000 Hz või 2500 Hz, kuid erijuhtudel ning suure võimsusega pooljuhtmuundurite korral ka 100. põhikomponendi sageduseni (5000 Hz). Standard IEC 61000-3-6 hoiatab ka selle eest, et tavapärased mõõtemuundurid ei ole võimelised üldiselt nimetatud sagedustesse ulatuvaid pinge- ning volukomponente.

Erinevatel mõõtetrafodel on erinev sageduskarakteristik, s.o ülekanalitegur eri sagedusega pinge- või volukomponentide mõõtmiseks. Näitena olgu toodud firma Trench poolt esitatud võrdlus [13], kus on esitatud erineva tööpõhimõttega pingemõõtemuundurite sageduskarakteristikud (vt. Joonis 2.8)



**Joonis 2.8. Erinevat tüüpi pingemõõdetemuundurite sageduskarakteristikute võrdlus.**

Toodud näite põhjal võib öelda, et magnetsüdamikuga ning mahtvuslike pingetrafode puhul ei ole mõõdetemuunduri väljundis korrektset, mõõdetavale vastavat väljundpinget, kui ei mõõdetata puhasst siinuspinget. Takistusliku pingejaguri puhul on aga sageduskarakteristik stabiilne ning see tähendab, et ka pingeharmonikud mõõdetakse korrektselt.

Kõrgepingelelekandevõrkudes tuleb pingele- ja vooluharmonikutega arvestada juba rajatiste planeerimise etapis. Soovituslikud planeerimissuurused on samuti toodud standardis IEC 61000-3-6, mis võivad küll olla erinevad vastavalt süsteemioperaatori või piirkonna eelistustele. Standardijärgsed soovituslikud planeerimisel arvestatavad pingeharmonikute tasemed põhiharmonilise suhtes vt. Tabel 5.

**Tabel 5. Soovituslikud pingeharmonikute planeerimisväärtused kõrgepingevõrkudes [14].**

Harmoniku		Lubatud ef. väärtus, %	Harmoniku		Lubatud ef. väärtus, %	Harmoniku		Lubatud ef. väärtus, %
nr.	$f_h$ (Hz)		nr.	$f_h$ (Hz)		nr.	$f_h$ (Hz)	
2	100	1,40	3	150	2,00	4	200	0,80
5	250	2,00	6	300	0,40	7	350	2,00
8	400	0,40	9	450	1,00	10	500	0,35
11	550	1,50	12	600	0,32	13	650	1,50
14	700	0,30	15	750	0,30	16	800	0,28
17	850	1,20	18	900	0,27	19	950	1,07
20	1000	0,26	21	1050	0,20	22	1100	0,25

Kõrgemate harmooniliste sagedustega komponentide kogumõju hinnatakse harmoonilis-moonutusteguriga. Kogumoonutustegur (THD – ingl. k *total harmonic distortion*) arvutatakse teades kõikide harmooniliste komponentide pingete (või voolude) efektiivväärtusi kui

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^H \left( \frac{Q_h}{Q_1} \right)^2}$$

$Q$  – pingele või vool

$Q_1$  – põhisagedusliku komponendi efektiivväärtus;

$Q_h$  –  $h$ -ndal harmoonilisel sagedusel oleva komponendi efektiivväärtus;

$h$  – harmooniku number;

$H$  – suurima arvestatava harmooniku järjekorranumber.

Kokku on THD planeerimistase kõrgepingealajaamadele 3% [14].

## 2.5 Mõõtemääramatud

Iga mõõtmine on seotud teatud mõõtetäpsuse ja mõõtetulemuse usaldusväärsusega. Täpsem mõõtmistega seotud terminoloogia on määratud standardis [1].

*Suurus* on nähtuse, keha või aine omadus, mida saab kvantitatiivselt väljendada arvu ja tugiviite abil;

*Mõõtühik* on leppeliselt määratletud ja kehtestatud reaalne skalaarne suurus, millega saab võrrelda iga teist sama liiki suurust, et avaldada nende suuruste suhe arvuna.

*Suuruse väärtus* on arv ja tugiviide, mis koos väljendavad suurust kvantitatiivselt.

*Mõõtesuurus* – suurus, mida kavatakse mõõta.

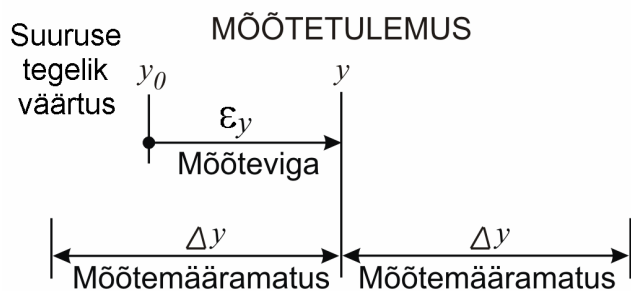
*Mõõtetulemus* – suuruse väärtuste kogum, mis koos kogu muu saadaoleva asjakohase infoga omistatakse mõõtesuurusele.

*Suuruse tõeline väärtus* – suuruse väärtus, mis on kooskõlas suuruse määratlusega.

*Mõõtehälve/mõõteviga* – mõõtesuuruse mõõdis miinus suuruse tugiväärtus. Mõõteviga on määratud kui mõõtetulemuse ning suuruse tõelise väärtuse erinevus.

*Mõõtemääramatus* – olemasoleva info põhjal mõõtesuurusele omistatud suuruse väärtuste hajuvust iseloomustav mittenegatiivne parameeter. Mõõtemääramatus on vahemik, milles mõõtetulemuse põhjal võib esineda mõõdetava suuruse väärtus.

Keerulisi määratlusi aitab selgitada Joonis 2.9.  $\varepsilon$



Joonis 2.9. Selgitus mõõtetulemuse, mõõteviga ning mõõtemääramatuse kohta.

Mõõtemääramatuste allikaid on mitmeid, kuid alajaamades rakendatavate mõõtemuundurite kontekstis tuleks keskenduda

- 1) mõõtemuunduri väljundi
- 2) mõõtesuuruste ülekande
- 3) mõõtesuuruste rakendamise

määramatustele.

Mõõtemuundurite mõõtemääramatud on kirjeldatud nende tunnussuurusi kirjeldavates standardites. Mõõtetrafode mõõtemääramatuste normid on kirjeldatud näiteks standardites EVS-EN 60044-1, EVS-EN 60044-2, EVS-EN 60044-5 jpt.

### 2.5.1 Mõõtemuunduri väljundi mõõtemääramatus

Mõõtemuundurite mõõtemääramatuste definitsioonide aluseks on võetud standardite IEC 60044 järgsed definitsioonid.

Mõõtesuuruse viga on määratud kui

$$\varepsilon = \left[ \left( K_n \cdot Y_{sek} - Y_{prim} \right) / Y_{prim} \right] \cdot 100\%$$

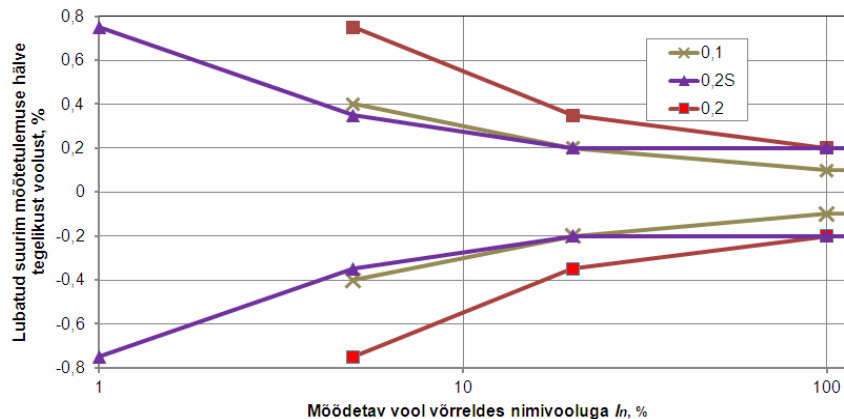
kus  $K_n$  on nimiproportsionaalsustegur,  $Y_{sek}$  on sekundaarpoolel nähtav mõõtetulemusega proportsionaalne väljundsignaal ning  $Y_{prim}$  on mõõdetava primaarsuuruse efektiivväärtus. Selline mõõtemääramatuse arvutus vastab juhule, kui mõõtemuunduri väljund on lineaarse e. proportsionaalse suhtega mõõtesuurusesse.

Standardi järgselt on sarnaselt määratud vooluviga (IEC 60044-1) ja pingeviga (IEC 60044-2). Selline viga määrab ära mõõtemuunduri väljundi vea tavatalitluses täppismõõtmiste kontekstis. Suurima mõõtevea järgi on mõõtemuundurid tüüpiliselt jagatud mõõteklassidesse, standardijärgselt on soovituslikud klassid 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 3,0. Klassi number tähistab seejuures suurimat mõõtevea protsenti mõõtemuunduri jaoks. Voolumõõtemuunduritel on ka eriklassid 0,2S ning 0,5S, mis tähistavad suurema mõõtetäpsusega muunduri klassi. Voolumõõtemuundurite täpsusklasside nimivea väärtused erinevate mõõtesuuruste korral on määratud standardis, vt. Tabel 6.

Tabel 6. Voolumõõtemuundurite täpsusklassid, aluseks standard EVS-EN 60044-1.

Klass	Vooluviga (suhteveiga) protsentes alltoodud voolutugevusel protsentes nimivoolust $I_n$					Nurgaviga allpool näidatud voolutugevusel protsentes nimivoolust $I_n$									
						min (nurgaminutit)					crad (sentiradiaani)				
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0,1	-	0,4	0,2	0,1	0,1	-	15	8	5	5	-	0,45	0,24	0,15	0,15
0,2	-	0,75	0,35	0,2	0,2	-	30	15	10	10	-	0,9	0,45	0,3	0,3
0,2S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3	0,3
0,5	-	1,5	0,75	0,5	0,5	-	90	45	30	30	-	2,7	1,35	0,9	0,9
0,5S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9	0,9
1,0	-	3,0	1,5	1,0	1,0	-	180	90	60	60	-	5,4	2,7	1,8	1,8

Märkus: '-' tähendab, et standardis on täpsus antud tingimustel määramata.



Joonis 2.10. Lubatud vooluviga mõõteklassi 0,1; 0,2 ning 0,2S voolumõõtemuunduritele.

Tabel 7. Klass 3 ning klass 5 voolumõõtemuundurite lubatud veapiirid.

Klass	Vooluviga (suhteveiga) protsentes alltoodud voolutugevusel protsentes nimivoolust $I_n$	
	50	120
3,0	3	3
5,0	5	5

**Tabel 8. Pingemõõtemuundurite standardijärgsed lubatud mõõtevea piirid.**

Klass	Pingeveiga (suhteveiga) %	Nurgaveiga nimiprimaarpingel	
		min	crad
0,1	0,1	5	0,15
0,2	0,2	10	0,3
0,5	0,5	20	0,6
1,0	1,0	40	1,2
3,0	3,0	-	-

Märkus: '-' tähendab, et standardis on täpsus antud tingimustel määramata.

Kaitsefunktsioonides mõõtemuundurite jaoks on defineeritud komposiitveiga

$$\varepsilon_C = \left[ \frac{1}{Y_{prim}} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n \cdot y_{sek} - y_{prim})^2 dt} \right] \cdot 100\%,$$

kus  $Y_{prim}$  on primaarsuuruse efektiivväärtus,  $y_{sek}$  on sekundaarsuuruse hetkväärtus ning  $y_{prim}$  on primaarsuuruse efektiivväärtus. Komposiitveiga on kasutuses mõõtemuundurite jaoks, mille tähises on mõõteklassi järel ära määratud kaitseotstarve (täht „P”, näiteks 3P).

**Tabel 9. Klass 5P ning klass 10P kaitse-voolumõõtemuundurite lubatud veapiirid.**

Klass	Vooluveiga nimi-primaarvoolul %	Nurgaveiga nimiprimaarvoolul		Komposiitveiga normtäpsuspiiri primaarvoolul %
		min	crad	
5P	1	60	1,8	5
10P	3	-	-	10

Märkus: '-' tähendab, et standardis on täpsus antud tingimustel määramata.

**Tabel 10. Kaitse-pingemõõtemuundurite standardijärgsed lubatud mõõtevea piirid.**

Klass	Pingeveiga (suhteveiga) %	Nurgaveiga	
		min	crad
3P	3,0	120	3,5
6P	6,0	240	7,0

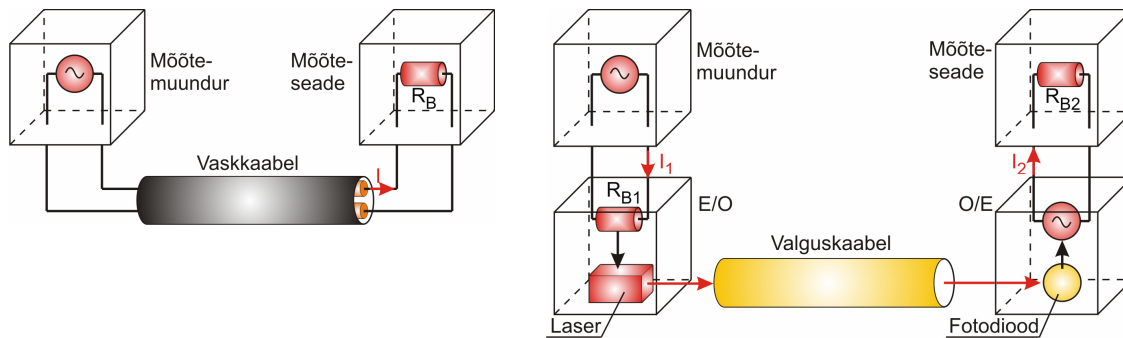
Mittetavapäraste mõõtemuundurite kontekstis on mõõtemuunduri mõõtemääramatuseks primaarsuurust tajuva mõõtesensori täpsus.

## 2.5.2 Mõõtesuuruste ülekandel tekkiv mõõtemääramatus

Mõõtesuuruste üle kandmine mõõtemuundurist mõõtetulemust rakendavasse seadmesse ei ole absoluutselt täpne. Siin võib vaadelda täpsemalt analoog- ning digitaalsuuruste ülekandmisel esinevaid vigasid.

Analoogsuuruste ülekandmisel väljastab mõõtemuundur analoogsignaali. Taoline analoogsignaali võib olla moduleeritud (amplituud-, sagedus-, faasmoduleeritud jne.), alajaamades rakendatakse sagedamini moduleerimata mõõtesuuruse ülekannet. Sellisel juhul kantakse mõõtetulemus üle reaalse pingele või voolu väärtusena, milline on proportsionaalne primaarsuurusega. Juhul, kui ülekandel esineb mingi väärtusega üle kantava pingele või voolu väärtuse muutumine, kandub see üle ja mõõteväärtusele. Näiteks juhul, kui juhtmetes, mida rakendatakse mõõtesuuruse üle kandmiseks, esineb pingelang, liitub viimane mõõtetulemusega.





**Joonis 2.11. Analogmõõtesuure ülekandmine vaskjuhi ning valgusjuhi abil. E/O – elektrooptiline muundur; O/E – optoelektriline muundur.**

Olukord on tundlikem pingemõõteahelates tavapärase mõõtemuundurite rakendamisel, kui analoogsuureks kantakse üle pinge efektiivväärtusega 100 V ning võimsusega vähemalt 25 VA. Antud näites mõõteahela juhtmes liikuva voolu efektiivväärtuseks

$$I = \frac{S}{U} = \frac{25}{100} = 0,25 \text{ A.}$$

Rakendades mõõtesuure üle kandmiseks vaskjuhtmeid (eritakistus  $\rho_{Cu} = 1,68 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ ) ristlõikega  $A_{Cu} = 4 \text{ mm}^2$ , on meetrise juhtme takistus

$$R'_{Cu} = \frac{\rho}{A_{Cu}} = \frac{1,68 \cdot 10^{-8}}{4 \cdot 10^{-6}} = 0,0042 \Omega.$$

Mõõtemääramatuse 0,1% piiriks on antud juhul

$$U_{0,1} = \frac{0,1}{100} \cdot U = \frac{0,1}{100} \cdot 100 = 0,1 \text{ V.}$$

Sellise pingelangu saavutamiseks on vajalik juhtme takistus maksimaalselt

$$R_{Cu} = \frac{U_{0,1}}{I} = \frac{0,1}{0,25} = 0,4 \Omega,$$

mis vastab kahejuhtmelise ahela pikkusele

$$l_{liin} = \frac{R_{Cu}}{2 \cdot R'_{Cu}} = \frac{0,4}{2 \cdot 0,0042} = 47,6 \text{ m.}$$

Seega, sellest vahemaast pikemate juhtmete, mille ristlõige on  $4 \text{ mm}^2$ , rakendamisel ei ole võimalik tagada nõutud mõõtetäpsust kogu mõõtepiirkonnas. Lahenduseks on juhtme ristlõikepindala suurendamine või mõõtekoormuse vähendamine. Täiendavaks vea allikaks on erinevate ühenduskontaktide, juhtme jätkuklemmide jt. takistused, mis võivad olla isegi suuremad, kui juhtme enda takistus.

Juhtmetest tingitud mõjutuste elimineerimiseks võib vaskjuhtmete asemel rakendada optilist kanalit (vt. Joonis 2.11). Sellisel juhul edastatakse mõõtesuure elektrilis-optilisse muundurisse, mille väljund suunatakse optilisele ülekandemeediale (valguskiud). Üle kantud optiline signaal muundatakse vastavas seadmes, mis asub mõõtetulemust rakendava seadme ligiduses, tagasi elektriliseks signaaliks. Siin samas on täpsus seotud otseselt elektrilis-optilise muundusseadme ning optilis-elektrilise muundusseadme täpsusega. Üldiselt on sellistel seadmetel väga hea täpsus, jäädes paremaks kui 0,05%.

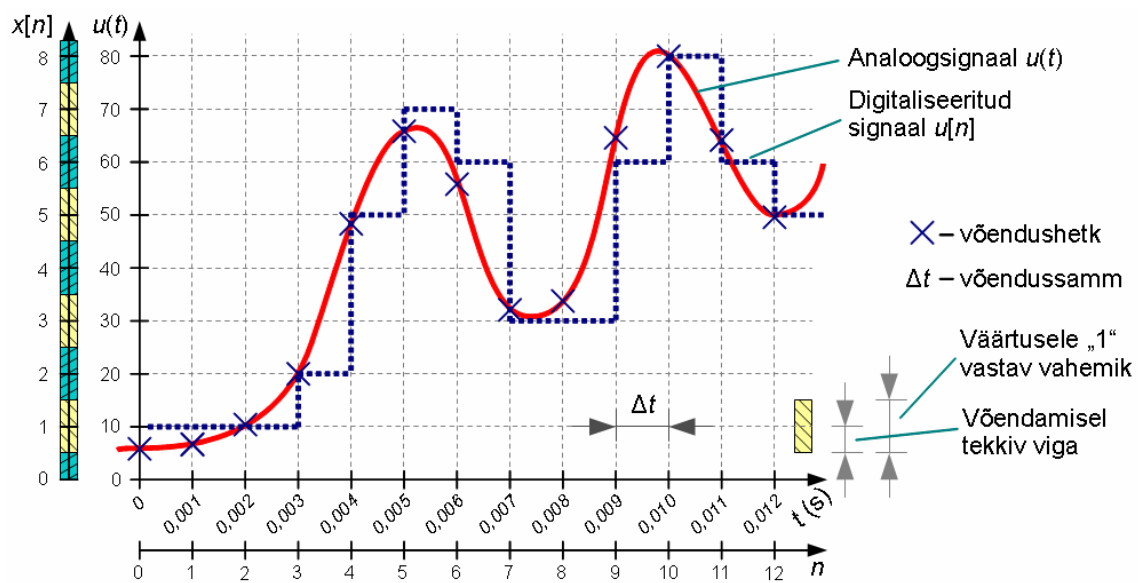
Digitaalsuuruste ülekandmise puhul ei ole pingelangudest ja kontakti takistustest tingitud ebatäpsustel rolli mujal kui töökindluse seisukohast (sellest ka hiljem). Mõõtesuurus edastatakse konkreetse numbrilise infona, mistõttu selle kodeeritud väärtus on lõplik. Tänu andmevahetuspakettidesse lisatud liiasuse ning kontrollinfo rakendamisele on lihtsalt tuvastatav andmevahetusel tekkinud viga, mõnel juhul on see isegi parandatav.

Täiendav viga mõõtesuuruse ülekandmisel tekib sellises mõõtesüsteemis analooginfo kvantimisel, mille käigus mõõtetulemusele vastav analoogsignaali teisendatakse numbriliseks väärtuseks. Numbrilise info puhul esineb alati teatud vähim võrdlussuurus, mis on aluseks kogu mõõtepiirkonna väärtuste esitamisel. Numbriline signaal saadakse ajaliselt pideva signaali ajalise diskreetimise (võendamine) teel, s.t iga teatud ajalise viite (võendussammu) järel ajaliselt pideva signaali võrdlemisel etalon-ühikuga (kvandiga).

Võendamise protsess käib võrdlemise teel, kui leitakse lähima täisarvulise kordaja väärtus

$$Y_D[n] = \text{int} \left[ \frac{Y(t) - (Y_{baas} / 2)}{Y_{baas}} \right],$$

kus  $Y_{baas}$  - vähim võrdlussuurus (baasvõrdlussuurus) e. kvant ning  $Y_D$  on diskreetse signaali väärtus täisarvuna. Selle valemi alusel võib öelda, et võendamise käigus tekkinud on viga määratud suurusega  $Y_{baas} / 2$ . Võendamisprotsessi kirjeldab ka Joonis 2.12



**Joonis 2.12.** Selgitus võendusprotsessi ning tulemuseks saadud diskreetse signaali kuju kohta.

Minimaalse kvantimissuuruse määramine on mõõtetulemuste seisukohast samuti kriitiline. Väikeste suuruste, mis jäävad  $Y_{baas}$  -ga samasse suurusjärku, mõõtmine ei ole võimalik müravabalt. Seejuures on müravabaks sama kvantimise tõttu tekkinud viga.

Numbriliste süsteemide dünaamiline ulatus on määratud suurima kvantimisjärguga  $KD$ . Näiteks kahendsüsteemis, 10-järgulise kvantimise korral on võimalike edastatavate väärtuste arv

$$Y_{D,max} = 2^{KD} = 2^{10} = 1024.$$

Teades seda suurust, saab määrata suurima edastatava väärtuse ning ka mõõtevea, mis on tingitud otseselt kvantimisest. Suurim edastatav mõõtetulemus

$$Y_{\max} = Y_{D,\max} \cdot Y_{baas} = 1024 \cdot Y_{baas} ,$$

ning viga maksimaalse väärtuse edastamisel

$$\varepsilon_D = \frac{Y_{\max}}{Y_{baas/2}} \cdot 100\% = 0,05\% .$$

Kvantimistäpsuse suurendamisel, s.o suurema kvantimisjärguni töötava analoog-digitaal-muunduri rakendamisel on võimalik ka mõõtetulemuse korral sellist viga vähendada. Reaalsetes rakendustes, kus mõõtemuunduri täpsus jääb 0,1% piirile, ei ole otstarbekas väga suurte kvantimisjärkude kasutamine, kuna mõõtemuunduri viga on kvantimisveast sel juhul oluliselt suurem. Täpsem kvantimisprotsess lisab süsteemile hinda ning keerukust. Oodatav mõõtemuundurites rakendatav kvantimistäpsus ei ületa tavaliselt 16 järku.

Lisaks kvantimisveale, on suur tähtsus ka suuruse  $Y_{baas}$  etalonväärtusel. Selleks on kõige tüüpilisemalt pinge- või vooluetaloniga määratud suurus. Seadmetes sagedamini rakendatavate etalonide täpsus jääb piiridesse 0,01...0,2 %.

Kvanteerimisel on oluline jälgida ka kvantimissammu ajalist suurust. Nyquist'i teoreemi alusel peab võendussagedus olema vähemalt 2-kordne mõõdetava suuruse sagedus.

### **2.5.3 Mõõtesuuruste rakendamisel esinev mõõtemääramatus**

Selline mõõtemääramatus esineb juhul, kui mõõtetulemus seda rakendava seadmeni edastatakse analoogsignaale kasutades.

Kaasaegsetes elektroonilistes releekaitseseadmetes leiab üldjuhul kasutamist digitaalsüsteem, mille koosseisus on mikro- ning signaaliprotsessorid. Töö aluseks on digitaalsuurused, mis saadakse sisendisse antud analoogsuuruste kvantimisel. Selline protsess on sarnane eespoolkirjeldatud kvantimisele, esinevad samasugused kvantimisvead ning etalonsuuruse täpsuse küsimused.

## 3. Mõõtemuundurite tehnoloogiad

### 3.1 Mõõtemuundurite liigitus

Ülekandevõrkude alajaamades rakendataval kõrgel potentsiaalitasemel mõõtmisi läbi viivate mõõtemuunduritel on kaks põhiülesannet [8]:

- 1) mõõtmis- ja tajumisfunktsioonid;
- 2) isolatsioonifunktsioonid.

Vastavalt nimetatud funktsioonide realiseerimiseks rakendatud meetoditele ning kasutatud materjalidele toimub ka mõõtemuundurite liigitus.

#### 3.1.1 Mõõtefunktsioonid

Mõõtmisega seotult on mõõtemuunduritel kaks ülesannet:

- 1) muundada kõrgel potentsiaalitasemel ja/või suure voolu mõõtesignaal madalapingeliseks, väikese võimsusega signaaliks;
- 2) viia mõõtesuuruse info kõrgelt potentsiaalilt maa potentsiaali lähedasele tasemele.

Mõõdetavaid füüsikalisi suuruseid on kaks – elektriline pinge fiidril ning elektrivool, mis fiidri kaudu liigub. Selle alusel, millist elektrilist suurust mõõdetakse, liigitatakse mõõtemuundureid vastavalt pingemõõtemuunduriteks ning voolumõõtemuunduriteks.

Mõõtemuundurites rakendatavad mõõtefunktsioonidega seotud tüüpilised tehnoloogiad on

##### A. Tavapärased tehnoloogiad

- 1) Induktiivsed pingetraford
- 2) Induktiivsed voolutraford
- 3) Mahtuvuslikud pingetraford

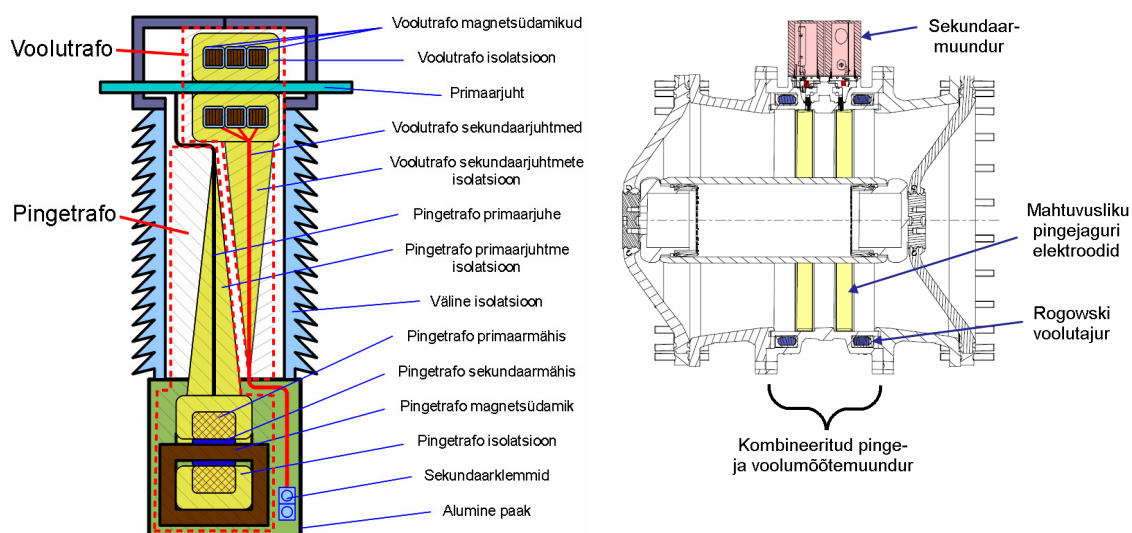
##### B. Mittetavapärased tehnoloogiad

- 1) Takistuslikud pingejagurid
- 2) Mahtuvuslikud pingejagurid
- 3) Rogowski voolutajurid (õhksüdamikuga induktiivtjurid)
- 4) Optilised, Faraday efekti rakendavad voolumõõtemuundurid
- 5) Optilised, Pockels'i efekti rakendavad pingemõõtemuundurid
- 6) Voolumõõtešundid

Lisaks loetletutele on ka terve rida erinevaid mõõtemeetodeid, kuid nendel käesoleva aruande raames pikemalt ei peatuta, kuna nimetatud tehnoloogiaid ei rakendata saadaolevates kõrgepingemõõtemuundurites.

Mõõtemuundurites kasutatavate töömeetodite puhul ei saa sama mehhanismiga mõõta nii pinget kui voolu. Tootjate poolt on samas suhteliselt tihti välja pakutud ka kombineeritud pinge- ja voolumõõtemuundureid, mis mõõdavad ning väljastavad info mõlemate, pinge- ning voolusuuruste mõõtetulemustega. Kombineeritud mõõtemuundurite eeliseks on eelkõige ruumiline aspekt, kuna kahe eraldi muunduri asemel on võimalik teostada samal tasemel mõõtmised kasutades ainult ühte seadet. Pinget- ja voolu korraga mõõtvate kombineeritud mõõtemuundurites on rakendatud kaks eraldiseisvat komponenti – pingemõõtemuundurit ning voolumõõtemuundurit. Näiteks ka kombineeritud induktiivses pinge-voolutrafos on tegelikult eraldiseisvad pinge- ja voolutrafo (vt. Joonis 3.1). Sama kehtib ka mittetavapärastele mõõtemuunduritele, milles paiknevad eraldi tajurid nii pinge- kui voolu mõõtmise jaoks.

Antud ülevaates erinevates pinge- ja voolumõõtemuunduritest ei ole vaadeldud eraldi kombineeritud muundureid, vaid viidatud eraldi nende pinge- ja voolumõõtmiste sooritamiseks rakendatud seadmetele.



Joonis 3.1. Kombineeritud induktiivse pinge- ja voolutrafo konstruktsioon (vasakul) ning mittetavapärase kombineeritud mõõtemuunduri näide (paremal) [15] [16].

Mõõtemuundurite tehnoloogiatest annab käesolev peatükk lähema ülevaate.

### 3.1.2 Isolatsioonifunktsioonid

Mõõtemuundurite poolt tagatavad isolatsioonifunktsioonid hõlmavad

- 1) elektrilise isolatsiooni tagamine pika tööaja vältel, isoleerides võrgu nimipingel olevad komponendid maa potentsiaalst;
- 2) vastupidavus lülitus- ja välguimpulsside poolt avaldatavatele suure tugevusega elektriväljadele.

Isolatsioonifunktsioonide realiseerimiseks kasutatakse erinevaid isolatsioonimaterjale, mis peavad lisaks täitma mehhaanilisi ja atmosfääritingimustest tulenevaid nõudeid

- 1) tagama mehaanilise vastupidavuse rikete või ülekoormuse olukorras tingitud elektromehaanilistest jõududest;
- 2) tagama mehaanilise tugevuse ja püsivuse atmosfääri- ja looduslike mõjutuste suhtes (tormid, temperatuurikõikumised jpt.);
- 3) tagama mehaanilise vastupidavuse seismiliste mõjude korral;
- 4) tagama mehaanilise tugevuse, mis oleks vastupidav mõõtemuunduri külge nõuetekohaselt ühendatud juhtmete poolt avaldatavale jõule;
- 5) pikaajalise keskkonnast ning atmosfäärist tingitud saaste talumine.

Nimetatud nõudeid peab mõõtemuunduri isolatsioon täitma ilma isolatsioonitugevust kaotamata ning mõõtemuunduri mõõtefunktsioonide halvendamiseta. Üldiselt on isolatsioon ka osa, mis määrab väga suure osa mõõtemuunduri hinnast. Selle ehituse mõjutajad on mõõtemuundurile rakendatav nimipinge, nõuded mõõtemuunduri mehhaanilisele tugevusele, mõõtemuunduri enda sisemine struktuur. Näiteks induktiivsetel mõõtetrafodel on probleemiks suur kaal, kuna magnetsüdamik on raske; samas peab viimane olema samas fikseeritud vibratsioonide korral.

Mõõtemuundurite juures võib eristada sise- ja välisolatsiooni. Siseisolatsioon tagab mõõtemuunduri korpuse sees olevate osade vajaliku tugevusega elektrilise isolatsiooni, s.h ka muunduri aktiivosa isolatsiooni. Selleks on rakendatud tüüpiliselt õli-paberisolatsiooni, kuid uuemad trafod on ehitatud SF<sub>6</sub> gaasisolatsiooniga. Õli-paberisolatsiooni korral on mõõtemuunduris küllalt suur kogus õli, mis lisab mõõtemuunduri massi ning nõuab seeläbi

tugevamat mehaanilist paigaldust. Lisaks on võimalus kasutada isolatsiooniks epoksiidvaike, mille korral kogu mõõtemuunduri kõrgepingeline osa uputatakse vaigu sisse. Vastavalt siseisolatsiooni tüübile liigitatakse mõõtemuundureid

- 1) õli-paberisolatsiooniga, mis on ajalooliselt enim rakendatud mõõtemuundurite isolatsioon. Sellise isolatsiooni kasutamisel on muunduris suhteliselt suur kogus õli, mis viib mõõtemuunduri massi suureks ning seega tingib suuremad nõuded konstruktsiooni mehhaanilisele tugevusele. Probleemiks käidul on õli degradeerumine ja ka lekked;
- 2) SF<sub>6</sub>-isolatsiooniga, kus mõõtemuunduri sees on survestatud elegaas (SF<sub>6</sub>). Seni on olnud suhteliselt palju probleeme mõõtemuundurite hermeetilisuses, kuid uusimad mõõtemuundurid omavad gaasikadu vähem kui 0,1%/aastas [17], mis on hooldusväljapade suhtes vastuvõetav;
- 3) valatud epoksiidvaik-isolatsiooniga, rakendatakse sagedamini väikesematel pingestemtel töötavatele osadele, näiteks mahtuvuslikes pingetrafoodes valatakse elektromagnetiline osa sellisesse isolatsiooni. Valatud epoksiidvaik-isolatsiooni iseloomustab suur töökindlus ning hooldusvabadus. Samuti on see levinud mittetavapäraste mõõtemuundurite juures.
- 4) õhkisolatsiooniga, kus mõõtemuunduri isoleerimiseks rakendatakse vaid õhku. Sellisteks näideteks on Rogowski muundurid ning optilised muundurid, mille puhul info ülekanne ja mistahes muud ühendused realiseeritakse läbi õhu kasutades optilist kaablit.

Välisolatsioon on ette nähtud tööks avatud atmosfääritingimustes, sellele rakenduvad erinevad looduslikud mõjud. Välisolatsioon võib olla valmistatud erinevatest materjalidest, milleks levinuimad on tänapäeval

- 1) portselan,
- 2) komposiitisolaatorid, klaasfiibriga tugevdatud epoksiid koos silikoon-isolatsiooni-seelikutega. Omab suurt vastupidavust ning oluliselt kergemat kaalu ja paljudel juhtudel odavamat hinda, kui portselanisolatsioon;
- 3) valatud epoksiidvaik, millele on valatud külge seelikud välistingimustes töötamiseks.

Mõõtemuunduri isolatsiooni peamine eesmärk on tagada tugev isolatsioon mõõtemuunduri töö korral võrgu normaaltalitusel, põhjustamata suuremaid lekkevoolusid ega dielektrilisi kadusid. Samuti peab mõõtemuunduri isolatsioon olema vastupidav erinevatele atmosfääriliigpingetele, lülitusliigpingetele jms. Nõuded mõõtemuundurite juures kasutatavale isolatsioonile on esitatud ka mõõtemuundurite standardis EVS-EN 61869-1.

Isolatsioonile esitatavad vastupidavusnõuded on esitatud kolmel stsenaariumil:

- 1) võrgusagedusliku pinge taluvus;
- 2) välguimpulsspinged;
- 3) lülitusimpulsspinged.

Isolatsioonile esitatavad nõuded Eestis rakendatavatel pingetasemetel 110 kV ning 330 kV võrkudes kasutatavatele mõõtemuunduritele on esitatud tabelis vt. Tabel 11 [2].

**Tabel 11. Isolatsioonile ja seadmete pingetaluvusele esitatavad nõuded.**

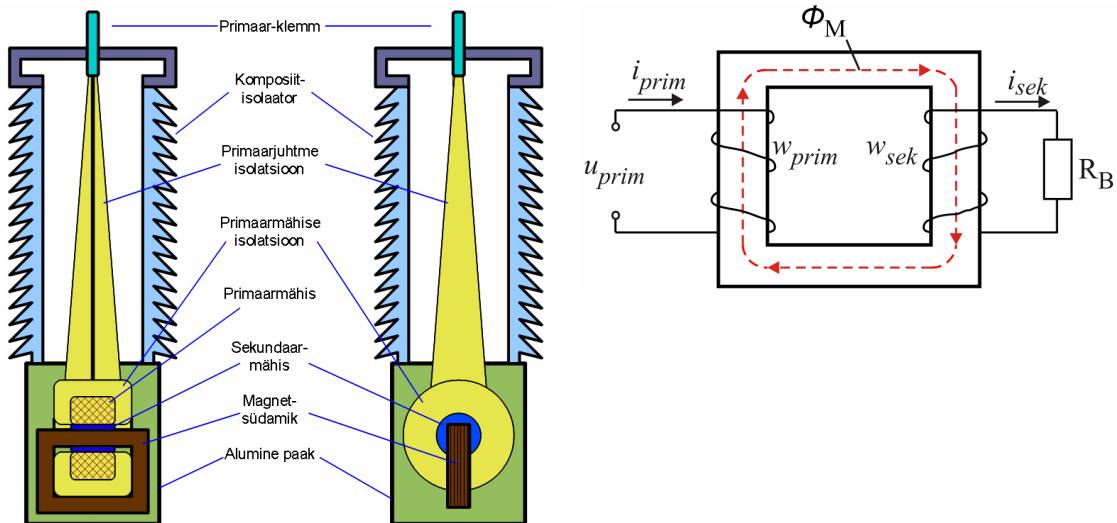
Seadme suurim kestepinge, kV	Võrgusageduslik nimi- taluvuspinge (ef. väärtus) kV	Lülituspulsi nimitaluvuspinge (tippväärtus) kV	Välguimpulsi nimitaluvuspinge (tippväärtus) kV
123	185	Ei määratleta	450
	230		550
362	460	850	1050
	510	950	1175

## 3.2 Magnetsüdamikuga pingetrafod

### 3.2.1 Magnetsüdamikuga pingetrafo tööpõhimõte

#### Füüsikaline

Magnetsüdamikuga pingetrafo on olemuselt sarnane iga magnetsüdamikuga trafoga. Trafo põhikomponendid on primaar- ning sekundaarmähis(ed), mis on paigutatud ümber elektromagnetilisest terasest magnetsüdamiku (vt. Joonis 3.2).



Joonis 3.2. Induktiivse pingetrafo läbilõige kahes vaates; ning tööpõhimõtet selgitav lihtsustatud skeem.

Primaarmähis ühendatakse mõõdetava pinge tasemele ning sekundaarmähis on mõõtesuure väljundiks. Kumbki mähis omab kindlat arvu mähisekerde. Primaar- ja sekundaarmähise keerdude arvu suhe määrab ka ära trafo ülekandesuhte

$$\frac{U_{pri}}{U_{sek}} = \frac{w_{sek}}{w_{pri}}, \quad (1)$$

kus  $U_{pri}$  – primaarmähise pinge (mõõdetav pinge),  $w_{pri}$  – primaarmähise keerdude arv,  $U_{sek}$  – sekundaarmähise väljundpinge,  $w_{sek}$  – sekundaarmähise keerdude arv.

Reaalses elus selline suhe ei ole täpne, kuna reaalses trafos esinevad mitmesugused kaod ning sekundaarpinge on ka väljundi koormusest. Magnetsüdamikuga pingetrafod töötavad suhteliselt suurel koormusel (arvestustrafod 25 VA ning releekaitse 100 VA) väljundiga, trafodes on täpsuse tagamiseks vajaduse korral ka keerdude arvu seetõttu täpsustatud.

Induktiivse pingetrafo elektriline aseseem on toodud joonisel (üleval). Trafo parameetrid on otseselt sõltuvad trafo primaarmähise takistusest ( $L_{prim}$  ning  $R_{prim}$ ), trafo südamikust ( $L_{süd}$  ja  $R_{süd}$ ) ning sekundaarmähise parameetritest ( $L_{sek}$  ja  $R_{sek}$ ). Trafo magnetsüdamikus oleva magnetvoo  $\Phi_M$  amplituudväärtus  $\Phi_{M,m}$  on määratud kui

$$\Phi_{M,m} = \frac{U}{\sqrt{2\pi \cdot f \cdot w_{prim}}} = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot w_{prim}}, \quad (2)$$

kus  $U$  – trafo primaarmähisele rakendatud pinge efektiivväärtus,  $f$  – pinge sagedus,  $w$  – primaarmähise keerdude arv.

Magnetvoo tihedus südamikus  $B_m$  on määratud südamiku ristlõike pindalaga

$$B_M = \frac{\Phi_M}{A_M},$$

kus  $A_m$  on magnetsüdamiku ristlõike pindala. Magneetiv väli

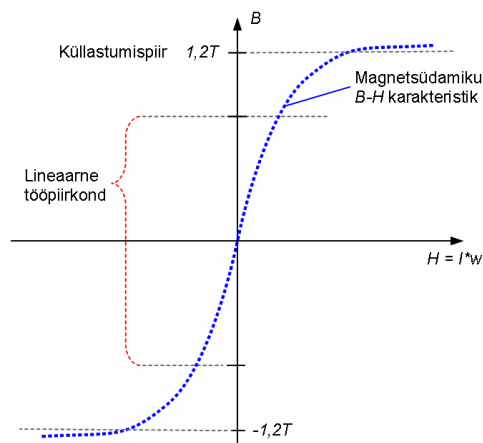
$$H = w \cdot I = \frac{B_M}{\mu},$$

kus  $\mu$  - magnetahela magentiline läbitavus.

Mida väikesem on magnetsüdamik, seda suurem on teatud primaarmähise pinge korral südamikule rakenduv magnetvoo tugevus. Ideaalse pingetrafo primaarmähise elektromotoorjõud ning sekundaarmähise elektromotoorjõud on määratud lineaarse seosega

$$u_{prim} = e_{prim} = \frac{w_{prim} \cdot d\Phi_m}{dt} = \frac{w_{sek} \cdot d\Phi_m}{dt} = \frac{w_{prim}}{w_{sek}} e_{sek}$$

Igal magnetmaterjalil on samas ka magnetiline küllastuspiir, mille ületamisel lineaarne seos magnetvoo ning rakendatud pinge vahel kaob. Antud piiri saab leida materjali  $B$ - $H$  kõveralt (vt. Joonis 3.3), kus  $H$  on primaarvoolu poolt tekitatud magnetväli õhksüdamikuga mähise korral ning  $B$  on magnetsüdamiku magnetvoo tihedus. Küllastumis-magnetvoo tiheduseks võib trafode magnetsüdamikes kasutatava elektromagnetilise terase (pehme raua) puhul lugeda 1,2 T.



Joonis 3.3. Magnetsüdamiku  $B$ - $H$  karakteristik.

Küllastuse tekkimisel edasisel magnetvoo kasvul magnetvoo tihedus südamikus ei kasva. Kuna kehtib seos

$$I = \frac{H}{w_{prim}} = \frac{\Phi_M}{\mu \cdot w_{prim} \cdot A_M}$$

see tähendab, et magnetvälja  $H$  tugevus peab kasvama oluliselt ning see omakorda, et vool  $I$  peab kasvama. Küllastusse jõudmisel seega trafo mähist läbiv vool suureneb oluliselt ning võib kaasa tuua trafo tunduva ülekoormuse. Pingetrafo puhul küllastus võib suurendada sekundaarpingeväljundi viga kuni paarikümne protsendini. Suurem oht on voolu tõttu tekkivas mähiste ülekoormuses, mille tõttu võib pingetrafo ülekoormuse korral rikenda.

Rakenduslik



Tüüpilistel pingetrafodel võib olla ka mitu sekundaarmähis, kuna alajaamas on trafo pingefotot vaja mitmetele seadmetele. Erinevad sekundaarmähised paigutatakse ümber sama magnetsüdamikuga, samas ülekandesuhte (1) jääb kehtima. Mitme mähisega pingetrafodel on üldiselt väikesem täpsus, kuna erinevate mähiste erinev koormus mõjutab trafo primaarmähise tööd.

Trafo sekundaarpinge on alati sõltuvuses sekundaarahelasse rakendatud koormusest. Et trafo talitluses oleks tagatud spetsifitseeritud täpsusklass, on trafo sekundaarmähis vaja koormata teatud samuti vastavalt spetsifikatsioonile (vt [18]). Vajalik koormus on arvestustrafode puhul 25 VA ning relekaitse mõõtetrafodel 100 VA, tüüpiline nimiväljundpinge 100 V.

Ülekandevõrkudes rakendatavatel trafodel on ette nähtud pideva töö võime pikema aja jooksul ülepingeteguri  $F_v$  –kordse nimipinge talumine (vt. tabel). Tänu ülekandevõrkude ehitusele ning võrgu neutraali maandusele on püsivad rikketalitluspinged väiksemad, kui 1,4-kordne võrgu nimipinge. Seetõttu suuremat ohtu pingetrafode küllastumisele ei ole.

### 3.2.2 Eelised ja puudused

#### *Eelised*

Töökindlus. Magnetsüdamikuga pingetrafod on tänu oma lihtsale konstruktsioonile ning koostekomponentide väikesele arvule väga töökindlad. Turul olevad pingetrafod on üldiselt juba suhteliselt hooldusvabad kogu oma eluea vältel. Pika ajaloo tõttu on isolatsioonimaterjalid head ning isolatsioonirikked harvad.

Hind. Magnetsüdamikuga pingetrafode saadavus võrreldes muude trafotüüpidega on Eestis kasutatavate pingetasemete puhul väga hea ning suure tootmishulga tõttu on ka trafode hinnad madalad. Pingetrafode hoolduskulud on madalad, nende paigaldamine ja tööleseeadmine toimub lihtsalt ning odavalt.

#### *Puudused*

Küllastusnähtused. Küllastusnähtuse oht pingetrafode puhul on suhteliselt suur. Kuna rikketalitus on suhteliselt erandlik olukord, arvestatakse pingetrafode puhul enamasti mõõtefunktsioonidega. Trafo magnetsüdamiku hind moodustab suure osa trafo hinnast ning selle dimensioneerimisel (vt. (valem)) arvestatakse pigem suhteliselt väikese küllastusohuga.


Kuna küllastumise esinemine on tõenäoline pigem rikketalitluses, siis mõjutab küllastumine rikkeolukordade parameetrite fikseerimist. Vead võivad olla seotud


- 1) pinge mõõtmisega rikke esinemise ajal
- 2) liigpingete mõõtmisega

Rikketalitluses pingete mõõtmine võib tugevalt mõjutada näiteks automaatse rikke asukoha määramise täpsust, kui selleks rakendatakse meetodeid, mis vajavad nii pinge- kui ka voolufotot.

Ferroresonants. Ferroresonants avaldub samuti tänu küllastusele ning trafo enda induktiivsusele. Ferroresonantsi läbi jõuab trafo pidevalt küllastusse ka peale küllastusse viiva stiimuli kadumist; suure voolu tulemusena hakkab kuumenema primaarmähis ning trafo võib rikneda.

### 3.2.3 Näited praktilistest toodetest

<b>Tootja</b>	Trench	 <p><a href="http://www.trenchgroup.com">http://www.trenchgroup.com</a></p>
<b>Tüüp</b>	TVG	
<b>Kirjeldus</b>	SF6-isolatsiooniga induktiivne pingetrafo	
<b>Um, kV</b>	362	
<b>Väljundid</b>	Kuni 4 mähist	
<b>Väljundi tüüp</b>	IEC60044-1, 25 / 100 VA	
<b>Kaal, kg</b>	780	
<b>Täpsusklass</b>	0.2 / 0.5 / 1.0; 3P – 6P	
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.trenchgroup.com">www.trenchgroup.com</a>	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www.trenchgroup.com/content/download/880/7047/file/SF6_362-550kV.pdf">http://www.trenchgroup.com/content/download/880/7047/file/SF6_362-550kV.pdf</a>	

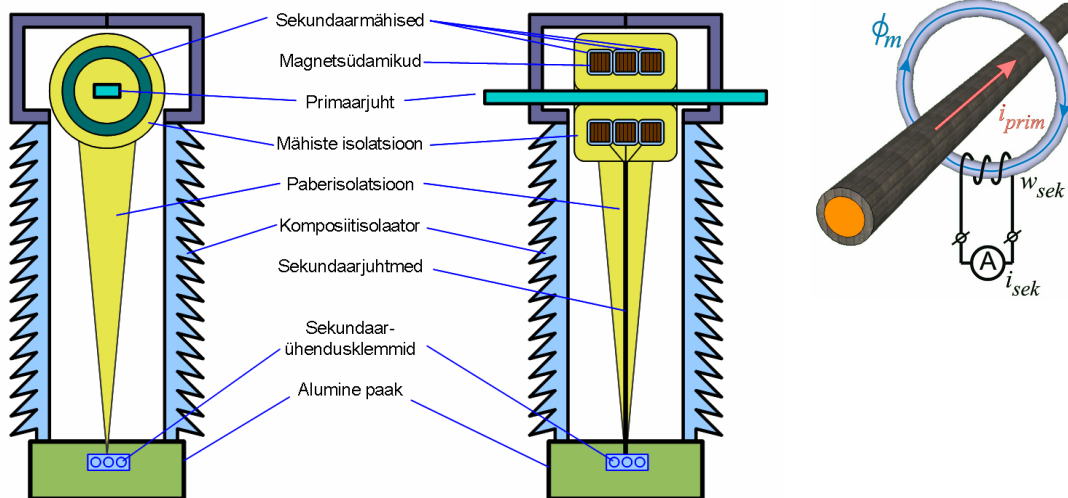
<b>Tootja</b>	Alstom	 <p><a href="http://www.alstom.com">http://www.alstom.com</a></p>
<b>Tüüp</b>	OTEF	
<b>Kirjeldus</b>	Õli-paberisolatsiooniga induktiivne pingetrafo	
<b>Um, kV</b>	362	
<b>Väljundi tüüp</b>	IEC60044-1, 25 / 100 VA	
<b>Kaal, kg</b>	1450	
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.alstom.com">www.alstom.com</a>	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www.alstom.com/Global/Grid/Resources/Documents/Products/High%20voltage%20products/OTEF%20Voltage%20transformers%20100%20kV%20to%20800%20kV%20-%20Brochure%20GB.pdf">http://www.alstom.com/Global/Grid/Resources/Documents/Products/High%20voltage%20products/OTEF%20Voltage%20transformers%20100%20kV%20to%20800%20kV%20-%20Brochure%20GB.pdf</a>	

### 3.3 Magnetsüdamikuga volutrafod

#### 3.3.1 Magnetsüdamikuga volutrafo tööpõhimõte

##### Füüsikaline

Magnetsüdamikuga volutrafod töötavad erinevalt sama konstruktsiooniga pingetrafodest lühistalitusel, s.t sekundaarmähis töötab väga väikese takistusega talitusel.



Joonis 3.4. Induktiivne volutrafo kahes vaates; tööpõhimõtteskeem ja aseskeem.

Sarnaselt pingetrafodele on määratud primaarmähisist läbiva voolu ning sekundaarmähisist läbiva voolu suhe vastavate mähiste keerdude arvuga:

$$\frac{I_{pri}}{I_{sek}} = \frac{w_{sek}}{w_{pri}}$$

Tüüpilise kõrgepingelise volutrafo puhul on primaarmähisel 1, sageli läbib vooluga juhttrafo südamiku otse.

Taoline volutrafo töötab lühistalitusel. See tähendab, et trafo väljund peaks olema koormatud suhteliselt väikese takistusega. Sekundaarmähisist läbib sel juhul vool, mis on proportsionaalne primaarmähisist läbiva vooluga.

Volutrafo puhul toob magnetsüdamikku läbivas primaarjuhtmes kulgev vool sel juhul kaasa magnetvälja  $H_m$ , mis on leitav kui

$$H_m = \frac{I_{prim} \cdot w_{prim}}{l_m},$$

kus  $l_m$  on magnetsüdamikus oleva magnetjõujoone keskmine pikkus, primaarmähise keerdude arv on üldjuhul 1. Magnetsüdamikus oleva magnetvoo tihedus  $B_m$  on leitav kui

$$B_m = H_m \cdot \mu_m,$$

trafo südamikus kulgev magnetvoog  $\Phi_m$

$$\Phi_m = B_m \cdot A_m,$$

kus  $A_m$  on südamiku ristlõike pindala. Sarnane seos kehtib ka sekundaarmähise kohta, kus

$$I_{sek} = \frac{\Phi \cdot l_m}{w_{sek} \cdot \mu_m \cdot A}$$

Juhul, kui magnetsüdamik töötab  $B-H$  kõveral lineaarses piirkonnas, on südamiku magnetilise läbitavuse tegur  $\mu_m$  konstantne ning  $I_{sek}$  ning  $I_{prim}$  omavahel proportsionaalsed. Juhul, kui südamikku mõjutab suur vool  $I_{prim}$ , võib tugeva magnetvälja tõttu aset leida magnetsüdamiku küllastumine. Küllastumisel jõuab magneetimispunkt piirkonda, kus see seos enam ei kehti ning  $\mu_m$  väärtus kahaneb kiirelt. Sellisel juhul sekundaarvool  $I_{sek}$  ei ole enam proportsionaalne primaarvoolu  $I_{prim}$ -ga.

Voolutrafode puhul tuleb arvestada ka pingega, mis lühistamata trafo mähise otstel võib esineda. Näiteks selleks, et voolutrafo ülekandesuhe oleks 1:1000, peaks trafo sekundaarmähisel olema 1000 keerdu. Ühes mähisekeerus indutseeritakse samas pinges, mis on määratud sarnaselt pingetrafoga. Seepärast on voolutrafod sekundaarmähise katkemisel oht seadmetele ning ka personalile.

### Rakenduslik

Voolutrafode töö lühistalitusel eeldab nende ühendamist seadmetega, mille takistus on võrdlemisi väike. Standardne koormusvool sekundaarmähisel on 1 A ning 5 A, esimene on soovituslik välispaigalduses seadmetele, kuna koormusvoolust sõltuvad ka magnetahela mõõtmed. Tüüpilised koormused voolutrafode sekundaarahelates peaksid olema reguleeritud vastavalt trafode spetsifikatsioonile, jäädes vahemikku 2,5 ... 15  $\Omega$ . Tüüpiline sekundaarahela võimsus on seega 2,5 ... 75 VA, mis on pingetrafode näitajatest madalam.

Voolutrafo konstruktsiooniline eripära on mitmete erinevate südamike kasutamise võimalus. Kõik mähised, mis on paigutatud sama voolujuhi ümber, omavad sama primaarmõju ning sõltuvus kõrvalolevast sühamikust ja mähisest on suhteliselt tühine. Sellega saab näiteks ühe voolutrafo sees realiseerida nii väikese ristlõikepindalaga magnetsüdmikuga, kuid samas täpse mõõtetrafo ning teistel juhtudel suurema südamikuga, küllastumiskindla kaitse-voolutrafo.

## **3.3.2 Eelised ja puudused**


### ***Eelised***


Töökindlus on voolutrafodel suhteliselt kõrge tänu lihtsale konstruktsioonile ning pikaajalisele tootmispraktikale on suhteliselt lihvitud tootmistehnoloogia.

### ***Puudused***

Suhteliselt suur oht magnetsüdamiku küllastuseks. Kuna rikketalitusvoolud on tüüpiliselt mitmetes kordades suuremate väärtustega kui nimitalitusvoolud, on mõõtetrafode küllastumisoht suhteliselt suur. Olukorda teeb keerulisemaks lühistega kaasnevad suured aperioidilised voolukomponendid, mis põhjustavad magnetsüdamiku tugevat ühes suunas magneetumist. Tugev alalismagneetumine seab probleemiks lühisvoolude õiget suurust esitava mõtetulemuse saamise. Kaitse-voolutrafo südamikel on küllastumise vältimiseks suurem südamike ristlõige, kuid see alati küllastumist täielikult ei võimalda vältida.

### 3.3.3 Näited praktilistest toodetest

<b>Tootja</b>	Trench	 <p><a href="http://www.trenchgroup.com">http://www.trenchgroup.com</a></p>
<b>Tüüp</b>	TAG 362 /M	
<b>Kirjeldus</b>	SF6-isolatsiooniga induktiivne voolutrafo	
<b>Um, kV</b>	362	
<b>Südame arvu</b>	Kuni 6	
<b>Kaal, kg</b>	1500	
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.trenchgroup.com">www.trenchgroup.com</a>	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www.trenchgroup.com/content/download/880/7047/file/SF6_362-550kV.pdf">http://www.trenchgroup.com/content/download/880/7047/file/SF6_362-550kV.pdf</a>	
<b>Täiendav info</b>		

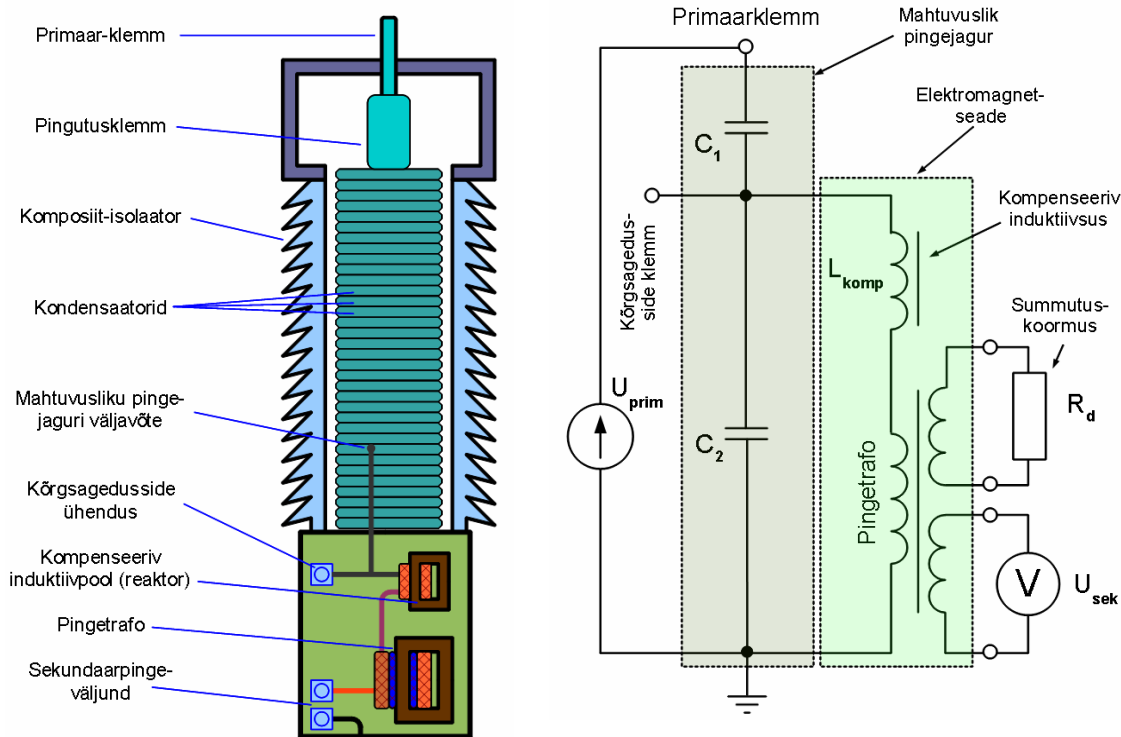
<b>Tootja</b>	Alstom	 <p><a href="http://www.alstom.com">http://www.alstom.com</a></p>
<b>Tüüp</b>	OSKF 362 /3A	
<b>Kirjeldus</b>	Õli-paberisolatsiooniga induktiivne voolutrafo	
<b>Um, kV</b>	362	
<b>Südame arvu</b>	Kuni 8	
<b>Kaal, kg</b>	1020	
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.alstom.com">www.alstom.com</a>	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www.alstom.com/Global/Grid/Resources/Documents/Products/High%20voltage%20products/OSKF%20Current%20Transformers%20-%20ENG.pdf">http://www.alstom.com/Global/Grid/Resources/Documents/Products/High%20voltage%20products/OSKF%20Current%20Transformers%20-%20ENG.pdf</a>	
<b>Täiendav info</b>		

### 3.4 Mahtvuslikud pingetrafo

#### 3.4.1 Mahtvusliku pingetrafo tööpõhimõte

##### Füüsikaline

Mahtvusliku pingetrafo peamine komponent on kondensaatoritest koosnev mahtvuslik pingejagur ning elektromagnetseade.



Joonis 3.5. Mahtvusliku pingetrafo struktuur ning askeem.

Taoline pingejagur töötab sarnaselt takistuslikule pingejagurile, pinge jaguneb kahe kondensaatori vahel vastavalt kondensaatorite mahtuvusele

$$\frac{U_{pri}}{U_{sek}} = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

Mahtvusliku pingetrafo rakendamise teeb kõrgepinge ning ülikõrgepinge kasutamiseks tema konstruktsioon. Kondensaatorite jadaühenduses mahtvus väheneb ning konstruktsiooni seisukohast teeb see vertikaalsete jadamahutuslike sammaste ehitamise väga kergeks. Tüüpiliselt on mahtvusliku pingejaguri kogumahtvus suurusjärgus mõnituhat pikofaradit, mis piirab ära suurtel pingetasemetel kondensaatoreid läbiva voolu.

Sellises trafos ei ole vaja rakendada tugevat paberisolatsiooni, kuna kondensaatorite vahel jaguneb pinge suhteliselt ühtlaselt. Kuna trafol puudub kõrge potentsiaaliga seotud magnetahel, on tema isoleerimine tehniliselt lihtsam.

Kõrg- ja ülikõrgpinge alajaamades rakendatakse elektromagnetilise seadmega mahtvuslikke pingetrafosid. Sellisel mõõtetrafol on mahtvuslikule pingejagurile rakendatud magnetsüdamikuga pingetrafo. Sekundaarpingeväljund saadakse just nimelt viimaselt.

Elektromagnetseadmele mahtvuslikust pingejagurist antav pinge jääb tüüpiliselt 10 – 20 kV tasemele.

Elektromagnetseadme pingetrafo väljundpinge on standardne (näiteks 100 V). Nimetatud väljundtrafo rakendamiseks on saavutatav väljundi suurem võimsus, mis põhimõtteliselt viib sellise pingetrafo sekundaarväljundi sarnaseks magnetsüdamikuga trafode näitajatele.

Et mahtvuslikku pingejagurit ning elektromagnetseadet tasakaalustada, on mahtvusliku pingejaguri ning pingetrafo vahele rakendatud täiendav magnetsüdamikuga induktiivne kompensator. Kompensatori induktiivsus on määratud seosega

$$L_{komp} = \frac{1}{(C_1 + C_2) \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_R)^2},$$

kus  $f_R$  on mahtvusliku voolutrafo nimisagedus.

Mahtvuslikus pingetrafos on väga suur oht erinevate resonantside ja ka ferresonantsi tekkeks. Pingetrafo väljundiks on tüüpiliselt mitu sekundaarmähist, mis resonantside summutamiseks kolmefaasilises süsteemis ühendatakse teiste faaside samasuguste pingetrafoodega kolmnurkühenduses kokku ning ahel varustatakse suhteliselt väikese koormustakistusega (vt. Joonis 3.5).

#### *Rakenduslik*

Elektromagnetseadmega mahtvuslikud pingetraford võimaldavad kompenseerida pingejaguri mahtvust, rakendades selleks täiendavat induktiivset kompensatorit. Täpne kompenseerimine suures sagedusalas aga ei ole kuigi lihtne ülesanne ning üldjuhul tagatakse täpne kompensatsioon ainult 50 Hz, ehk põhisageduse ümber. Sellise sagedusega pinge mõõtmisel on suur täpsus tagatud, kuid näiteks pingeharmonikute mõõtmiseks antud lahendus täpset tulemust ei paku. Samas on pingeharmonikute mõõtmine suure tähtsusega pingekvaliteedi määramise seisukohast. Toitequaliteedi mõõtmise võimaluste pakkumiseks on tootjate poolt välja pakutud ka täiendava funktsionaalsusega mahtvuslikud pingetraford (näiteks PQSensor).

Siirdeprotsesside mõõtmiseks on samuti mahtvuslikul pingetrafol puudusi, kuna kondensaatoritesse võib suurte pingemuutuste korral jääda suhteliselt suur laeng, mis neutraliseerub läbi elektromagnetosa. Samuti on siirdeprotsesside mõõtmisel probleemiks kompenseerivas induktiivpoolis salvestunud energia. See põhjustab primaarsiideprotsesside puhul omakorda võnkuvad siirdeprotsessid. Siirdeprotsesside summutamiseks on sellisel juhul taas abiks täiendav sekundaarkoormus.

Mahtvuslikud pingetraford seisavad tavapäraste ning mittetavapäraste mõõtemuundurite klasside piiiril. Kuigi sama tüüpi väljundiga, ei sobi sellised pingetraford traditsiooniliste elektromehhaaniliste releede toiteks ning on ette nähtud pigem elektrooniliste releekaitseseadmetele mõõtesuuruse edastamiseks.

### **3.4.2 Eelised ja puudused**

#### *Eelised*

Töökindlus. Töökindlus on kõrge tänu lihtsale konstruktsioonile ning väikesele komponentide arvule. Isolatsiooni töökindlus on tagatud tänu pingejaguri pingele lineaarsele jagunemisele, mis võimaldab isoleeriva konstruktsiooni lihtsamaks teha. Elektromagnetseadmes olevad komponendid on paarikümne kilovoldise pingele all, mis on isolatsiooni seisukohast suhteliselt lihtne.

Konstruksioon. Kuna kõrgel ning madalal potentsiaalitasemel osad on teineteisest hästi eraldatud, ei ole vajalik keeruline ning tugev isolatsioon erinevate komponentide vahel. Puuduvad massiivsed kõrge potentsiaaliga seotud trafode terassüdamikud. Massiivsete konstruktsioonide asendamine võimaldab vähendada ka seadme kaalu.

Kõrge töösagedusvahemik. Kondensaatorid töötavad paremini kõrgetel sagedustel, magnetahela puhul piirdub sagedusvahemik mõnekümne kilohertsiga. Uuringute järgi ulatub mahtvusliku pingejaguriga voolutrafode vaheväljundi ribalaius üle 500 kHz. Sellest piisab küllalt täpsete siirdeprotsesside parameetrite mõõtmiseks. Tänu laiale töösagedusribale saab taoliste mõõtetrafode kasutamisel rakendada näiteks laineprotsessidel põhinevaid rikke asukoha määramise meetodeid.


Kõrgsagedusside valmidus. Mahtvuslikud pingejagurid võimaldavad keskväljavõtte kaudu eraldada võrgupingest alajaamade vahelise kõrgsagedusside signaale, samuti saab seda väljavõtet rakendada kõrgsagedussignaali liinile andmiseks.

### ***Puudused***


Alalispinge mõõtmise täpsus. Kondensaatoritest pingejagurit läbib vool ainult juhul, kui kondensaatoritel olev pinge muutub ning pinge jagamine on tagatud ainult piisavalt kõrge sagedusega vahelduvpinge puhul. Väikesel sagedusel (mõni herts) ei ole kondensaatorpingejaguri töö stabiilne ning mõõtetäpsus pole tagatud. Seetõttu on mahtvusliku pingetrafo puhul oodatavalt suhteliselt kesine siirdeprotsesside mõõtetäpsus.

Kõrgema sagedusega pingekomponentide mõõtmise ebatäpsus. Mahtvusliku pingejaguriga ühendatud elektromagnetseade on kompenseeritud võrgu põhisedusele, mis võimaldab täpselt läbi viia võrgu põhiseduslikke pingemõõtmisi. Pingekvaliteedi mõõtmisi on sellise seadmega läbi viia keeruline, kuna põhisedusest kõrgemate, erinevate harmooniliste sagedustega pingekomponentide puhul võib ülekandesuhte väärtus olla erinev. See kehtib nii võrgupinge moonutusteguri hindamise kui ka siirdeprotsesside mõõtmise kohta.

### **3.4.3 Näited praktilistest toodetest**

<b>Tootja</b>	Trench		
<b>Tüüp</b>	TCVT 362		
<b>Kirjeldus</b>	Mahtvuslik pingetrafo		
<b>Um, kV</b>	362		
<b>Kogumah-tuvus, pF</b>	4000 / 6000		
<b>Väljundi tüüp</b>	IEC60044-5 500 / 750VA (kokku)		
<b>Kaal, kg</b>	360		
<b>Täpsusklass</b>	0.2 / 0.5 / 1.0		
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.trenchgroup.com">www.trenchgroup.com</a>		
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www.trenchgroup.com/content/download/1339/11174/file/Capacitor%20Voltage%20Transformers%20for%20Outdoor%20Installation.pdf">http://www.trenchgroup.com/content/download/1339/11174/file/Capacitor%20Voltage%20Transformers%20for%20Outdoor%20Installation.pdf</a>		
<b>Täiendav info</b>			
			<a href="http://www.directindustry.com">http://www.directindustry.com</a>



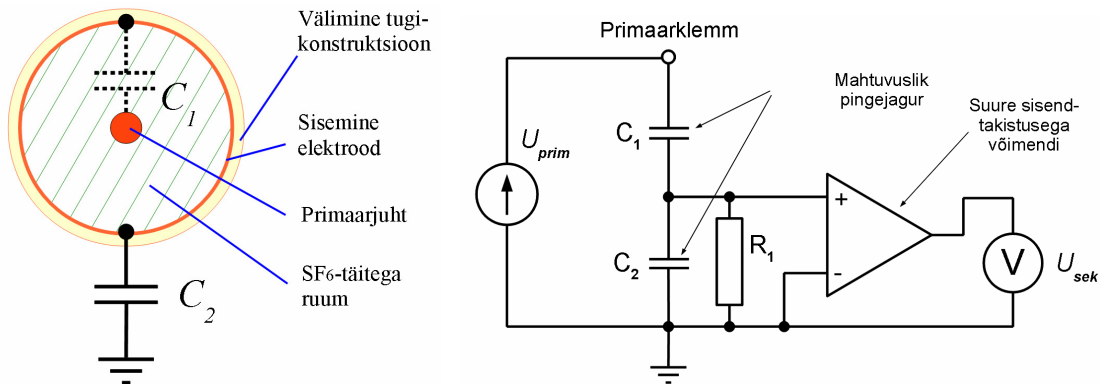
<b>Tootja</b>	Alstom	
<b>Tüüp</b>	OTCF 362	
<b>Kirjeldus</b>	Mahtuvuslik pingetrafo	
<b>Um, kV</b>	362	
<b>Kogumahtuvus, pF</b>	2630...8100	
<b>Väljundi tüüp</b>	IEC60044-5 120 ... 1000 VA (kokku)	
<b>Kaal, kg</b>	368 ... 705	
<b>Täpsusklass</b>	0.2 / 0.5 / 1.0	
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.alstom.com">www.alstom.com</a>	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www.alstom.com/Global/Grid/Resources/Documents/Products/High%20voltage%20products/OCTF%20Capacitor%20Voltage%20transformers%2072,5%20to%20765%20kV%20-%20Brochure%20ENG.pdf">http://www.alstom.com/Global/Grid/Resources/Documents/Products/High%20voltage%20products/OCTF%20Capacitor%20Voltage%20transformers%2072,5%20to%20765%20kV%20-%20Brochure%20ENG.pdf</a>	
<b>Täiendav info</b>		<a href="http://www.alstom.com">http://www.alstom.com</a>

## 3.5 Mahtuvuslikud pingejagurid

### 3.5.1 Mahtuvuslike pingejagurite tööpõhimõte

#### Füüsikaline

Mahtuvuslikud pingejagurid koosnevad põhimõtteliselt kahest järjestikku ühendatud kondensaatorist, mis on ühendatud liini ja maa vahele jadalülituses. See on sarnane mahtuvusliku pingetrafo juures rakendatud komponendiga, kuigi esineb olulisi erinevusi.



Joonis 3.6. Mahtvuslik pingejaguri konstruktsiooni näide gaasisoleeritud alajaamas ning selle askeem võimendiga koostöös.

Mahtuvusliku pingejaguri väljundisse ühendatakse elektrooniline võimendi, mille sisendtakistus on väga suur, ühtlasi sisendvool väga väike. See on üks olulisemaid erinevusi mahtuvusliku pingetrafo – mahtuvuslikul pingetrafol on vajalik, et mahtuvusliku pingejaguri voolust jaguks suhteliselt suure koormusega induktiivse pingetrafo ning selle väljundi varustamiseks toitega.

Mahtuvusliku pingejaguri ülekandesuhe on määratud jaguri moodustavate kondensaatorite omavahelise suhtega.

$$\frac{U_{pri}}{U_{jagur}} = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

Kui pingejagurit koormab suhteliselt väike koormusvool, siis ei ole vaja pingejaguris rakendada suuri mahtuvusi. Seejuures mahtuvuse  $C_1$ , mis on seotud primaarpingega, mahtuvuse võib viia suhteliselt väikeseks, mõne pikofaradini. See võimaldab realiseerida pingemõõdetemuunduri näiteks gaasisoleeritud alajaamas tavapärasele voolujuhile sarnases konstruktsioonis (vt. Joonis 3.6), kus kondensaatori  $C_1$  ühe elektroodi rolli täidab primaarjuht ning teiseks elektroodiks on põhimõtteliselt alajaama juhi silindriline korpus.

Mahtuvuslik vool pingejaguris ei ole samas faasis pingega vaid pinge muutusega, olles proportsionaalne pinge muutumise kiirusega

$$i_C = \frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2} \frac{du_{prim}}{dt}$$

kus  $i_C$  on mahtuvuslikku pingejagurit läbiv vool.

Mahtuvuslikku pingejagurit läbiv vool on lineaarses sõltuvuses pinge muutumiskiirusest (sellega ka mõõdetava pinge sagedusest) ning pingejaguri kogumahtuvusest. Seepärast on

väikestel sagedustel kondensaatoreid läbimas võrgu nimisagedusel (50 Hz) suhteliselt väike vool. Alalisvoolu korral kahaneb vool olematuks ning selline pingejagur ei sobi näiteks alaliskomponendiga siirdeprotsesside mõõtmiseks. Väike vool tähendab ka väikeseid kadusid. Samas on mahtuvusliku pingejaguri täpsus tagatud väga laias sagedusribas ning selline pingejagur sobib näiteks kõrgemate pingeharmonoonikute mõõtmiseks.

Mahtuvuslik pingejagur on seevastu suhteliselt vastupidav erinevatele liigpingetele, kusjuures liigpingete mõõtmisel määrab mõõteulatuse ülemise piiri jagurile ühendatud võimendi sisendpingeulatus.

#### *Praktiline*

Puhtalt mahtuvuslikke pingejagureid on välja pakutud peamiselt gaasisolatsiooniga alajaamades mõõtmiste läbiviimiseks, kuna gaasisolatsiooniga alajaamas on konstruktiivsete kaalutluste tõttu sellise pingemõõtemuunduri rakendamiseks kõik eeldused täidetud.

Puhtalt mahtuvusliku pingejaguri puuduseks on järskude pingemuutuste korral kondensaatorile  $C_2$  jääv suhteliselt suur laeng, mis hoiab pinget võimendis sisendis kõrgel ka peale pinge kadumist primaarklemmidel ( $C_1$  on suhteliselt väike). Selle puuduse kõrvaldamiseks rakendatakse šunteerivat takistust  $R_1$  [19] [16], mille takistus on oluliselt väikesem, kui kondensaatori  $C_2$  näivtakistus võrgusagedusel. Takistit läbib sel juhul peamiselt läbi  $C_1$  kulgev vool (mis põhjustab takistil omakorda selle vooluga võrdelise pingelangu), siis on võimendi ka pinge, mis on määratud  $C_1$  kaudu kulgeva vooluga  $i_C$ . Selline pinge on võrdeline võrgupinge tuletisega ning mõõtetulemuse saamiseks sooritab mõõtevõimendi ka integreerimise.

Gaasisoleeritud alajaamades on mahtuvusliku pingejaguri üks puuduseid primaarjuhiga seotud mahtuvuse sõltuvus gaasi rõhust ning kontsentratsioonist. See nõuab mõõtesüsteemi täiendavat jooksvat kalibreerimist, gaasi parameetrite muutuste mõju minimeerimist kirjeldab näiteks Alstom oma tooteliini CEVT tooteliini puhul [20]

### **3.5.2 Eelised ja puudused**

#### *Eelised*

Lai lineaarne tööpiirkond. Mahtuvusliku pingejaguri vähima mõõdetava pinge piirab ära võimendi sisendmõra ning tajurit mõjutav keskkonnast tulenev müra. Ülemine mõõtepiir on määratud pingejaguri külge ühendatud võimendiga suurima sisendpingega.

Ülekoormuse talumise võime. Mahtuvuslikus pingejaguris on rakendatud väikese mahtuvusega kondensaatoreid, mistõttu on ka pingejagurit läbiv vool suhteliselt väike. Kõrgema pingetaseme juures töötamisel ei kujune vool samuti sedavõrd suureks et kahjustaks jagurit.

Lai sagedusriba. Mahtuvuslike pingejagurite töösagedusriba lineaarne piirkond ulatub tüüpiliselt kilohertsidesse, võimaldab ka sooritada ka pingekvaliteedi mõõtmisi.


Lihtne konstruktsioon. Kondensaatori saab valmistada, kasutades gaasisoleeritud alajaama juhti ning selle ümber olevat korpust. Tänu sellele on tajurina töötav osa väga töökindel ning vastupidav, loomulikult ka odav.

#### *Puudused*


Alalispinge mõõtmine. Mahtuvuslik pingejagur ei sobi alalispinge mõõtmiseks ega alaliskomponendiga siirdeprotsesside pinge mõõtmiseks.

### 3.5.3 Näited praktilistest toodetest


<b>Tootja</b>	Alstom	
<b>Tüüp</b>	COSI-CEVT	
<b>Kirjeldus</b>	Mahtuvusliku pingejaguriga pingemõõtemuundur	
<b>Um, kV</b>	Kuni 1100	
<b>Väljundi tüüp</b>	IEC 61850	
<b>Kaal, kg</b>	1,2 (ainult pingejagur, ilma tugikonstruktsioonita)	
<b>Täpsusklass</b>	< 0,05%	
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.alstom.com">www.alstom.com</a>	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www.docushare-ais.aveva-ttd.com/tde/appli/mvbdoc.nsf/ByRefDoc/00B863926FCD5731C1257A2B00335FB9/\$FILE/95130_GRID_210_X_280_DATASHEET_-_2pp-_LEVEL_3_VCh_loRes.pdf">http://www.docushare-ais.aveva-ttd.com/tde/appli/mvbdoc.nsf/ByRefDoc/00B863926FCD5731C1257A2B00335FB9/\$FILE/95130_GRID_210_X_280_DATASHEET_-_2pp-_LEVEL_3_VCh_loRes.pdf</a>	
<b>Täiendav info</b>	Töösagedusriba 0...10 kHz. Toitepinge 48 V, tarbitav võimsus u. 5 W. Toode on varustatud EEPROM mälega, kuhu on salvestatud konkreetse toote kalibreerimisväärtused. Toote avalik info kodulehel puudub (20.11.12).	

<b>Tootja</b>	ABB	
<b>Tüüp</b>	ELK-CP3	
<b>Kirjeldus</b>	Mahtuvusliku pingejaguriga pingemõõtemuundur, kombineeritud koos Rogowski voolumõõtemuunduriga	
<b>Um, kV</b>	550	
<b>Väljundi tüüp</b>	IEC 61850	
<b>Kaal, kg</b>	250 (koos voolutajuri ja tugikonstruktsiooniga)	
<b>Täpsusklass</b>	0.2	
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.abb.com">www.abb.com</a>	
<b>Täiendav info</b>	Töösagedusriba 0...1 kHz. Toote avalik info kodulehel puudub (20.11.12).	

[21], [15]

<b>Tootja</b>	NRelect	 <p>www.nrelect.com</p>
<b>Tüüp</b>	PCS-9250-EGI	
<b>Kirjeldus</b>	Mahtuvusliku pingejaguriga pingemõõtemuundur, kombineeritud koos Rogowski voolumõõtemuunduriga gaasisoleeritud alajaamadele	
<b>Um, kV</b>	363	
<b>Väljundi tüüp</b>	IEC 61850	
<b>Täpsusklass</b>	0.2	
<b>Tootja veebileht</b>	www.nrelect.com	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www.nrelect.com/upfiles/20101126145630873.pdf">http://www.nrelect.com/upfiles/20101126145630873.pdf</a>	
<b>Täiendav info</b>	Sisaldab 2 mahtuvuslikku pingejagurit (dubleeritud) ning samuti kahte õhksüdamikuga voolutajurit (dubleeritud).	

<b>Tootja</b>	NRelect	 <p>www.nrelect.com</p>
<b>Tüüp</b>	PCS-9250-EAI	
<b>Kirjeldus</b>	Mahtuvusliku pingejaguriga pingemõõtemuundur, kombineeritud koos Rogowski voolumõõtemuunduriga õhksolatsiooni-ga alajaamadele	
<b>Um, kV</b>	363	
<b>Väljundi tüüp</b>	IEC 61850	
<b>Täpsusklass</b>	0.2	
<b>Tootja veebileht</b>	www.nrelect.com	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www.nrelect.com/upfiles/20101126145630873.pdf">http://www.nrelect.com/upfiles/20101126145630873.pdf</a>	
<b>Täiendav info</b>	Sisaldab 1 mahtuvuslikku pingejagurit ning kahte õhksüdamikuga voolutajurit (dubleeritud). Lisaks sellele on varustatud ka energiakogumismähisega, millelt saab energia kõrgel potentsiaalil asuva elektroonikaseadme toiteks. Kõrgelt potentsiaalilt madalale viiakse mõõtetulemus kasutades optilist kanalit.	

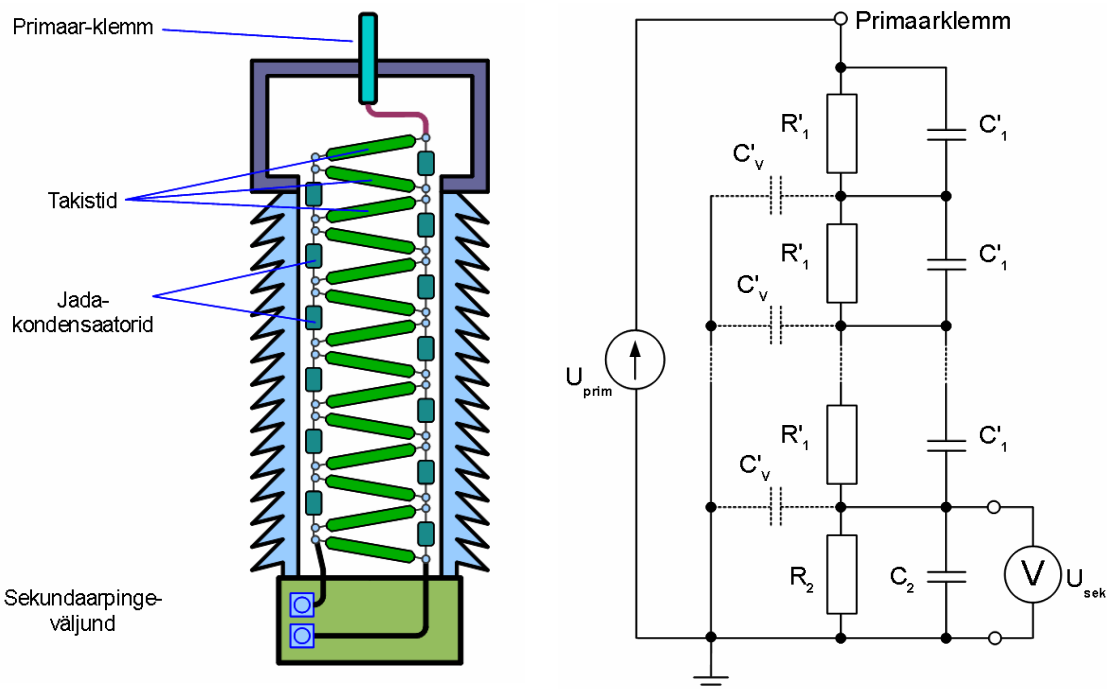
<b>Tootja</b>	Seeco	 <p>www.seecoswitch.com</p>
<b>Tüüp</b>	VS-1300	
<b>Kirjeldus</b>	Mahtuvusliku pingejaguriga pingemõõtemuundur	
<b>Um, kV</b>	$U_n = 345 \text{ kV}$	
<b>Väljundi tüüp</b>	0 ... 10 V, IEC 60044-2	
<b>Kaal, kg</b>	65,7	
<b>Täpsusklass</b>	5%	
<b>Tootja veebileht</b>	www.seecoswitch.com	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www.seecoswitch.com/pdf/PC-006-1.pdf">http://www.seecoswitch.com/pdf/PC-006-1.pdf</a>	
<b>Täiendav info</b>	Mahtuvusliku pingejaguri-laadne tööpõhimõte on kirjeldatud antud mõõtemuunduri kirjelduses, kuid ei ole mainitud otseselt, et tegemist on mahtuvusliku pingejaguriga. Abitoide 24 ... 110 V (valikuline).	

## 3.6 Takistuslikud pingejagurid

### 3.6.1 Takistuslike pingejagurite tööpõhimõte

#### Füüsikaline

Takistuslikud pingejagurid koosnevad põhimõtteliselt kahest aktiivtakistusest, mis on ühendatud liini ja maa vahele jadalülituses.



Joonis 3.7. Kompenseeritud takistuslik pingejagur ning selle aseskeem.

Väljundpinge mõõdetakse maaga ühenduses oleva takisti klemmidelt, mille korral takistusliku pingejaguri ülekandegur avaldub kui

$$\frac{U_{pri}}{U_{sek}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Kõrgepingel töötav takistuslik pingejagur on üldjuhul realiseeritud ülisuurte takistusega takistite abil. Selliste pingejagurite primaar- ning sekundaarväljavõtte vaheline takistus võib ulatuda sadadesse megaoomisesse. Näiteks juhul, kui pingejaguri nimipinge on 110 kV ning takistus 100 MΩ, liigub läbi takistusliku pingejaguri vool

$$I_R = \frac{U_{prim}}{R_1 + R_2} = \frac{110 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^9} = 1,1 \cdot 10^{-6} = 1,1 \text{ mA}$$

Takistusliku pingejaguri puuduseks klassikalises rakenduses on väike mõõdetud pingeväljundi koormamisvõimalus. Et mõõtetulemus oleks korrektne, peab takistusliku pingejaguri koormus jääma oluliselt väikesemaks seda läbivast koormusvoolu. Seepärast ei ole ka põhjust takistusliku pingejaguri voolu üleliia vähendada. Lisaks muutub väga väikese voolu korral pingejagur tundlikumaks väliste elektromagnetväljade mõjule.

Kõrgete pingete puhul on pingejaguri takistus väga kõrge, ulatudes kümnetesse giga-oomidesse. Pingejagurit läbiv vool on 1 mA piirides [22], mistõttu jaguris eralduv võimsus on siiski suhteliselt suur, ulatudes paarisaja vatini. Näiteks 1 mA voolu korral ning mõttes pinget tasemel 200 kV on pingejaguris eralduv võimsus

$$P_{jagur} = \frac{U_{prim}^2}{R_1 + R_2} = U_{prim} \cdot I_{jagur} = 200 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 200 \text{ W}.$$

Selline võimsus põhjustab pingejaguri komponentide kuumenemist ning lisab vajaduse lisajahutuse järele. Takistustel eralduv võimsus seab ka piirangud antud pingejaguri ülekoormamisele. Nimelt on eralduv võimsus ning rakendatud pinge omavahel ruutsõltuvuses ning 22%-line pinge kasv annab juba 50% suurema eralduva soojusliku võimsuse, kui tavatalitluses. Seepärast tuleb takistuslike pingejagurite tööaega rikketalitlussuuruste mõõtmisel piirata. Ülekuumenemine viib takistusliku pingejaguri täpsuse vähenemiseni ning riknemiseni.

Tänu väikesele töövoolule on varjestamata pingejagur võrreldes teiste mõõtemuunduritega suhteliselt vastuvõtlik välistele elektromagnetväljadele (eriti raadiosageduslikele). Seepärast on vajalik taoliste pingejagurite korralik varjestamine. Tänu varjestusele hakkab mõju avaldama varje ning pingejaguri vaheline mahtuvus  $C_v$  (vt. Joonis 3.7), mis tänu jaguri takistite suurele takistustele põhjustab suure hilineamise väljundpingesse. Selle tulemusena ületaks faasiviga lubatud piiri oluliselt. Pingejaguris kasutatavate kõrgetel pingetel väikese induktiivsusega takisteid takistite mõju seejuures on suhteliselt tühine.

Kompenseeritud pingejagurites (nn. RC-pingejagurid) rakendatakse pingejaguri takistitega paralleelselt lisakondensaatoreid, millega kompenseeritakse lisaks induktiivsusele ka hajutatud mahtuvust, mis esineb takistite ning teiste juhtide vahel [23]. Selliselt saab suures osas neutraliseerida ajalise viite ning tagada laia töösagedusriba.

Väikese koormamisvõime tõttu on vajalik rakendada elektroonilisi võimendeid väljundis, et välised ahelad ei mõjutaks mõõtetulemust. Antud hetkel on elektrooniliste võimendite funktsionaalsus väga hea, töökindlus kõrge ning hind suhteliselt madal.

#### *Rakenduslik*

Takistuslikud pingejagurid on laialt olnud rakenduses laboratoorsete katsete puhul, mille puhul ei ole nõutud standardijärgne väljundpinge. Standardijärgse tugeva väljundi tagamine on võimalik ainult läbi täiendavate lisavõimendusastmete.

Takistuslike pingejagurite üheks oluliseimaks eeliseks mahtuvuslike pingejagurite ees on alalisvoolu mõõtmise funktsionaalsus. Puhtalt mahtuvuslikud pingejagurid (vt. „3.4.1. Mahtuvusliku pingetrafo tööpõhimõte”) omavad puudusena piiratud töövõimet madalatel sagedustel, kuna nende näivtakistus kujuneb väga suureks ning alaliskomponendi mõõtmisel jääb nende täpsus allapoole rakendatavat piiri. Takistuslikul pingejaguril sellist puudust ei esine ning need sobivad seepärast väga erinevate siirdeprotsesside mõõtmiseks.

Takistuslik pingejagur on lisaks optilistele pingetajuritele üks vähestest mõõtemuunduritest, mille sageduskarakteristik on väga ühtlane alates alalisvoolukomponendist kuni kõrgete sagedusteni. See annab võimaluse rakendada takistuslikke pingejagureid põhimõtteliselt kõikides pingemõõtestsenariumides alates kiirete siirdeprotsesside mõõtmistest, pingekvaliteedi mõõtmistest kuni alaliskomponendiga siirdeprotsesside mõõtmiseni.

Takistuslikud pingejagurid on laiemalt rakendatud näiteks gaasisoleeritud alajaamades ning ka kõrgepingelise alalisvoolu ülekandel.

### 3.6.2 Eelised ja puudused

#### *Eelised*

Lai lineaarne sagedusriba. Takistuslikud või kompenseeritud pingejagurid omavad laia töösagedusriba, milles on tagatud suur ülekandetäpsus. Tänu sellele sobivad takistuslikud pingejagurid kõrgemate pingeharmonooniliste täpseks mõõtmiseks, kui ka siirdeprotsesside täpseks jälgimiseks.

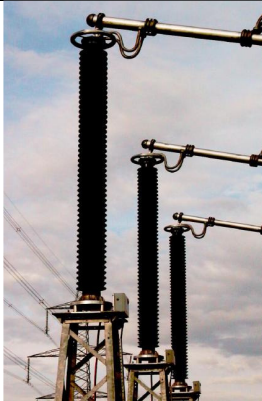
Alaliskomponendi täpne mõõtmine. Takistuslik pingejagur mõõdab täpselt ka alalispingekomponenti, kuna tema väljundpinge on võrdne mõõdetava pinge ning pingejaguris olevate aktiivtakistite takistuste suhtega.


#### *Puudused*

Tavamõõtmisteks vajalik lisaelektronika. Kuna takistusliku pingejaguri väljundi võimsus on väike, on tavarakenduses vajalik lisavõimenduslülitus, mis tagaks standardijärgse väljundpingetaseme (100 V) ning võimsuse (>25 VA).


Suur eralduv võimsus. Tänu aktiivtakistusele pingejaguri koosseisus eraldub igalt takistilt soojuslik võimsus. Viimane on sõltuvuses pingejagurit läbivast voolust, kuid sellest on sõltuv ka pingejaguri täpsus. Seetõttu ei saa pingejaguri voolu väga väikeseks viia, tüüpiline pingejaguri võimsustarve võib ulatuda mitmesaja vatini.

### 3.6.3 Näiteid praktilistest pingejaguritest

<b>Tootja</b>	Trench	 <small>www.trenchgroup.com</small>
<b>Tüüp</b>	RCVT 362	
<b>Kirjeldus</b>	Kompenseeritud RC-pingejagur	
<b>Isolatsioon</b>	Õli-paber polüpropüleen	
<b>Um, kV</b>	362	
<b>Kaal, kg</b>	310	
<b>Täpsusklass</b>	0,2 ja väikesem	
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.trenchgroup.com">www.trenchgroup.com</a>	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www.trenchgroup.com/en/content/download/1382/11376/file/AC%20Voltage%20Divider.pdf">http://www.trenchgroup.com/en/content/download/1382/11376/file/AC%20Voltage%20Divider.pdf</a>	
<b>Täiendav info</b>		

<b>Tootja</b>	Schniewindt	 <small>www.schniewindt.de</small>
<b>Tüüp</b>	CSN	
<b>Kirjeldus</b>	Takistusliku pingejaguriga ning magnetilise südamikuga voolutajuriga kombineeritud pinge-voolumõõdetemuundur	
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.schniewindt.de">http://www.schniewindt.de</a>	
<b>Info teabeleht</b>	-	
<b>Täiendav info</b>	Saadaval SF6 või lämmastiktäitega. Toote kohta on saadaval ainult minimaalne info, kuigi andmeid on sarnaste toodetega katsete läbiviimise kohta alajaamades [24].	



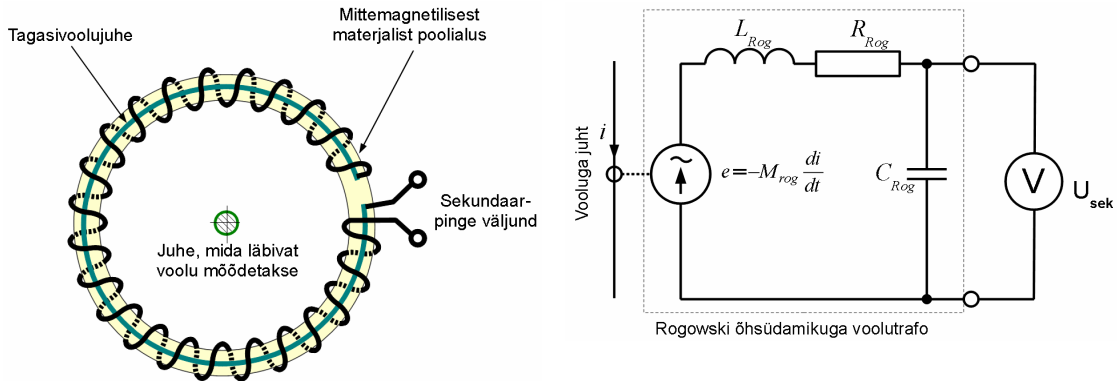
<b>Tootja</b>	Trench	 <p><i>www.trenchgroup.com</i></p>
<b>Tüüp</b>	RCVD 362	
<b>Kirjeldus</b>	Kompenseeritud RC-pingejagur gaasisooleeritud alajaamadele	
<b>Isolatsioon</b>	SF6	
<b>Um, kV</b>	362	
<b>Kaal, kg</b>	160	
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.trenchgroup.com">www.trenchgroup.com</a>	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www.trenchgroup.com/content/download/1401/11741/file/GIS%20RC%20Voltage%20Divider.pdf">http://www.trenchgroup.com/content/download/1401/11741/file/GIS%20RC%20Voltage%20Divider.pdf</a>	
<b>Täiendav info</b>	Töösagedusriba 0...20 kHz	

## 3.7 Õhksüdamikuga volutajurid

### 3.7.1 Õhksüdamikuga volutajurid tööpõhimõte

#### Füüsikaline

Õhksüdamikuga volutrafo tüüpiline esindaja on Rogowski vöö, mis on saanud nime oma leiutaja järgi. Sarnaselt magnetsüdamikuga volutrafolele paigaldatakse ka Rogowski vöö ümber juhtme, milles voolu mõõdetakse.



Joonis 3.8. Rogowski õhksüdamikuga volutajur ning selle aseskeem.

Juhtmes liikuv vool indutseerib mähisekeerdudes elektromotoorjõu, mis on võrdeline juhtmes oleva voolu muutumise kiirusega

$$e_{sek} = -M \frac{di_{prim}}{dt},$$

kus  $di_{prim}/dt$  on voolu muutumise kiirus juhtmes ning  $M$  on juhtme ning õhksüdamikuga trafo vaheline vastastikune induktiivsus. Ümar-ristlõikega Rogowski vöö vastastikune induktiivsus on avaldatav kui

$$M = \frac{w \cdot \mu_0}{2} \left( h_r - \sqrt{h_r^2 - r^2} \right),$$

kus  $w$  on Rogowski vöö keerdude arv,  $r$  on pooli läbimõõdust,  $h_r$  on poolikeeru keskpunkti kaugus juhtme teljest ning  $\mu_0$  on õhu magnetiline konstant  $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  H/m.

Sellise õhksüdamikuga trafo sekundaarväljundiks on pinge, mis on sõltuvuses juhtmes oleva voolu muutumise kiirusest ning sellega ka mõõdetava voolu sagedusest. Tüüpiliselt antakse õhksüdamikuga trafo ülekandetegur (sagedus) samuti sõltuvuses mõõdetava voolu sagedusest [25]

$$U_{sek} = K_S \cdot I_{prim} \cdot f, \quad (3.16)$$

kus  $U_{sek}$  – sensori väljundpinge efektiivväärtus;  $I_{prim}$  – juhet läbiva voolu efektiivväärtus;  $f$  – mõõdetava voolu sagedus;  $K_S$  – tundlikkus (ühik V/(A·Hz)).

Tavaliselt rakendatakse tuletiskomponendi eemaldamiseks õhksüdamikuga volutrafo järele integraatorlülitus, mille väljund on juhtmes oleva voolu hetkväärtusega proportsionaalne.

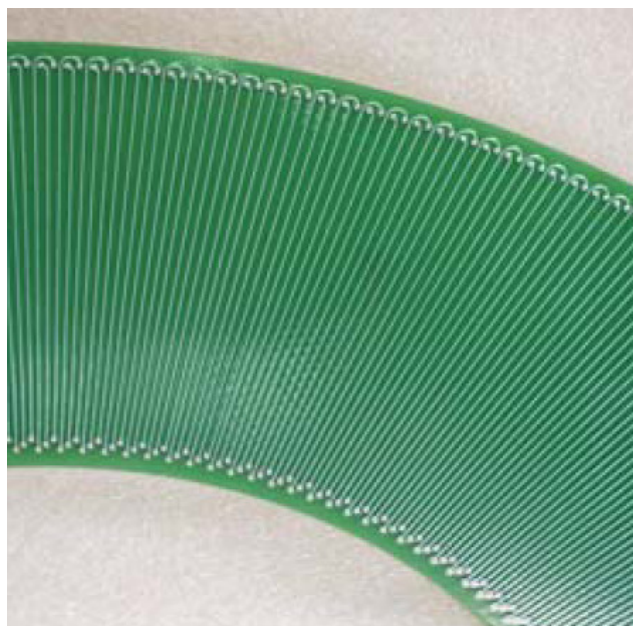
Õhksüdamiku tõttu ei ole Rogowski vööga volutrafolel küllastusohtu ning tagatud on lineaarne töö laias sagedusvahemikus. Samas tänu volutrafo südamiku madalale magnetilisele läbitavusele ei esine südamiku kaasabil magnetefekti võimendust ning sellise volutrafo väljundpinge jääb madalaks. Võrgusagedusel piisava ning müravaba pinge

saavutamiseks peaks sellisel trafol olema tuhandeid keerde hoolimata asjaolust, et mõõdetakse suhteliselt suurt koormusvoolu.

Väikese koormamisvõime tõttu on vajalik rakendada elektroonilisi võimendeid väljundis, et välised ahelad ei mõjutaks mõõtetulemust. Antud hetkel on elektrooniliste võimendite funktsionaalsus väga hea, töökindlus kõrge ning hind suhteliselt madal.

#### *Rakenduslik*

Õhksüdamikuga voolutrafo on võimalik teostada väga erinevate konstruktsioonide abil. Üldiselt on trafo mähis realiseeritud mitte õhus, vaid mõne plastmaterjali peal (mittemagnetiline), mis annab mähisele kindla kuju ning konstruktsioonelemendi fikseerimiseks. Plastmaterjal annab võimaluse realiseerida Rogowski vöö ka painduvalt ja/või lahtikäivalt, seetõttu on seda väga lihtne paigaldada. Kasutada saab ka kõrge stabiilsusega materjale ning mähisekeerdude paigutusega neutraliseerida temperatuurimõju, näiteks võib rakendada Rogowski alusena klaastekstoliidist trükkplaati [19], viimane teeb ka sellise tajuri tootmise väga odavaks.



**Joonis 3.9. Rogowski tüüpi õhksüdamikuga voolutajur, mis on ehitatud klaastekstoliidist trükkplaadile.**

Lisaks sellele on Rogowski vöö võimalik realiseerida väga väikeste mõõtmetega. Rogowski vöö tööpõhimõtte järgi ei ole vajalik Rogowski vöö monteerimine otse vooluga juhi lähedale. See võimaldab paigaldada antud mõõdetrafo ka näiteks läbiviikisolaatori või võimsuslüliti välisküljele, ilma lisaisolatsiooni üksuseta.

### **3.7.2 Eelised ja puudused**

#### *Eelised*

Lai lineaarne sagedusriba. Kuna õhksüdamikuga voolutrafodel ei esine küllastusefekte, on trafo tundlikkus tagatud laias töösageduste vahemikus. Lineaarsus on tagatud nii väikeste kui ka suurte voolude korral.

Väike temperatuuritegur. Kuna õhksüdamikuga voolutrafo parameetrid on määratud pigem antud trafo geomeetriliste mõõtmetega. Materjalide geomeetrilised temperatuuritegurid on väikesed ning erimaterjalide kasutamisel on võimalik temperatuuritegurit veelgi vähendada.


#### *Puudused*

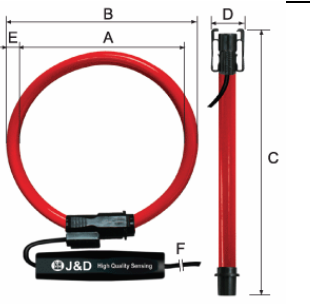
Tavamõõtmisteks vajalik lisaelektronika. Õhksüdamikuga voolutrafo omab väikese võimsusega väljundit, mille pinget võib olla isegi liiga väike numbrilisele kujule üleviimiseks (tundlikkused millivoltides kiloampri kohta). Seetõttu on praktilises kasutuses vältimatu lisavõimendi rakendamine, mis peab omama suhteliselt suurt võimendustegurit


Alaliskomponendi mõõtmise ebatäpsus. Rogowski vöö tüüpi õhksüdamikuga trafo väljundpinge on proportsionaalne mõõdetava voolu tuletisega. Siirdeprotsesside puhul, milles esineb alaliskomponent, on taoliste mõõtetrafode puhul probleemiks täpse voolu määramine. Alaliskomponendi puhul on tuletise väärtus määratud alaliskomponendi kahanemise kiirusega, mitte alaliskomponendi väärtusega. Alaliskomponendi mõõtmiseks on vaja rakendada täiendavaid meetmeid, s.h kombineerida teist tüüpi tajuritega.


Mürad põhiseduse mõõtmisel. Voolu tuletis on seda suurem, mida kõrgem on mõõdetava voolu sagedus. 50 Hz voolu muutumise kiirus on siiski küllalt väike ning õhksüdamikuga trafo väljundpinge põhisedusel seetõttu samuti väike. Väljundpingetase millivoltides tähendab suuremat tähelepanu elektromagnetilise ühilduvuse (EMÜ) küsimustes. Sellist pinget ei ole ka võimalik tõenäoliselt kanda üle suurema vahemaa, mistõttu peab elektroonikalülitus olema suhteliselt tajuri lähedal.


### 3.7.3 Näiteid praktilistest õhksüdamikuga voolutrafodest


<b>Tootja</b>	Alstom / Nextphase	 <p>www.docushare-ais.areva-td.com</p>
<b>Tüüp</b>	RogoFlex	
<b>Kirjeldus</b>	Painduv, lahtivõetav Rogowski voolutajur	
<b>Mõõdetav vool</b>	Kuni 200 kA	
<b>Väljundi tüüp</b>	Analoogpinge 48 mV / kA	
<b>Kaal, kg</b>	1,0	
<b>Täpsusklass</b>	1	
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.nxtphase.com">http://www.nxtphase.com</a>	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www.docushare-ais.areva-td.com/tde/appli/mvbdoc.nsf/ByRefDoc/81179FF77D42E9A1C1257A2B0032EE3D/\$FILE/95133_GRID_210_X_280_DATASHEET_-_2pp-_LEVEL_3_VCh_loRes.pdf">http://www.docushare-ais.areva-td.com/tde/appli/mvbdoc.nsf/ByRefDoc/81179FF77D42E9A1C1257A2B0032EE3D/\$FILE/95133_GRID_210_X_280_DATASHEET_-_2pp-_LEVEL_3_VCh_loRes.pdf</a>	
<b>Täiendav info</b>	Sagedusriba 0 - 10 kHz Toote avalik info kodulehel puudub (20.11.12)	


<b>Tootja</b>	J&D Electronics Co	 <p>http://www.hqsensing.com</p>
<b>Tüüp</b>	JRF333	
<b>Kirjeldus</b>	Painduv, lahtivõetav Rogowski voolutajur	
<b>Mõõdetav vool</b>		
<b>Väljundi tüüp</b>	Analoogpinge 333mV	
<b>Kaal, kg</b>		
<b>Täpsusklass</b>	1	
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.hqsensing.com">http://www.hqsensing.com</a>	
<b>Täiendav info</b>		


<b>Tootja</b>	Alstom / Nextphase	 <p>COSI-RECT sensors</p> <p>www.docushare-ais.areva-td.com</p>
<b>Tüüp</b>	COSI-RECT	
<b>Kirjeldus</b>	Rogowski voolutajur gaasisoleeritud alajaamadele	
<b>Mõõdetav vool</b>	Kuni 150 kA	
<b>Väljundi tüüp</b>	IEC 61850	
<b>Kaal, kg</b>	1,2	
<b>Täpsus</b>	<0,05% 50/60 Hz vahelduvvoolu mõõtmisel	
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.nxtphase.com">http://www.nxtphase.com</a>	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www.docushare-ais.areva-td.com/tde/appli/mvbdoc.nsf/ByRefDoc/A2F0E80B2A3DE4E7C1257A2B0033207C/\$FILE/Grid-GIS-L3-COSI-RECT_for_GIS-72402-2012_07-EN.pdf">http://www.docushare-ais.areva-td.com/tde/appli/mvbdoc.nsf/ByRefDoc/A2F0E80B2A3DE4E7C1257A2B0033207C/\$FILE/Grid-GIS-L3-COSI-RECT_for_GIS-72402-2012_07-EN.pdf</a>	
<b>Täiendav info</b>	Sagedusriba 0 - 10 kHz, mõõdetav vool kuni 150 kA. Toitepinge 48V, võimsustarve <10W. Kombineeritakse tootena koos mahtuvusliku pingejaguriga pingetrafoaga COSI-CEVT. Toote avalik info kodulehel puudub (20.11.12)	

<b>Tootja</b>	Schniewindt	 <p>[26]</p>
<b>Tüüp</b>	(Teadamata)	
<b>Kirjeldus</b>	Rogowski voolutajur õhkisoleeritud ülekandevalajaamadele	
<b>Mõõtepiirkond</b>	40 – 4000 A	
<b>Kaal, kg</b>	Umbes 50	
<b>Täpsus</b>	< 0,2%	
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.schniewindt.de">www.schniewindt.de</a>	
<b>Info teabeleht</b>	Avalik teabeleht puudub, info allikaks [26].	
<b>Täiendav info</b>	Toote avalik info kodulehel puudub (20.11.12). Mõõtetulemuste ülekande, samuti toitevõimsuse andmine tajuriga koos töötavale süsteemile toimub läbi optilise toitega andmekanali (OPDL – Optically Powered Data Link) [27]	

<b>Tootja</b>	ABB	 <p>[28]</p>
<b>Tüüp</b>	iPass ELK-CP3	
<b>Kirjeldus</b>	Rogowski voolutajur gaasisoleeritud alajaamadele, kombineeritud koos mahtuvusliku pingejaguriga pingetajuriga	
<b>Mõõtepiirkond</b>	100...4,000	
<b>Täpsus</b>	Klass 0,2/0,2S + 5P	
<b>Kaal, kg</b>	250	
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.abb.com">www.abb.com</a>	
<b>Info teabeleht</b>	Avalik teabeleht puudub, info allikaks [21].	
<b>Täiendav info</b>	Toote avalik info kodulehel puudub (20.11.12)	

<b>Tootja</b>	NRelect	 <p>www.nrelect.com</p>
<b>Tüüp</b>	PCS-9250-EGI	
<b>Kirjeldus</b>	Rogowski voolumõõtemuundur kombineeritud koos mahtvusliku pingejaguriga pingemõõtemuunduriga, gaasisoleeritud alajaamadele.	
<b>Mõõtepiirkond</b>	300...3000 A, ülemine piir vähemalt 50 kA	
<b>Väljundi tüüp</b>	IEC 61850	
<b>Täpsusklass</b>	0.2S	
<b>Tootja veebileht</b>	www.nrelect.com	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www.nrelect.com/upfiles/20101126145630873.pdf">http://www.nrelect.com/upfiles/20101126145630873.pdf</a>	
<b>Täiendav info</b>	Sisaldab 2 mahtvuslikku pingejagurit (dubleeritud) ning samuti kahte õhksüdamikuga volutajurit (dubleeritud).	

<b>Tootja</b>	NRelect	 <p>www.nrelect.com</p>
<b>Tüüp</b>	PCS-9250-EAI	
<b>Kirjeldus</b>	Mahtvusliku pingejaguriga pingemõõtemuundur, kombineeritud koos Rogowski voolumõõtemuunduriga õhksisolatsiooniga alajaamadele	
<b>Mõõtepiirkond</b>	300...3000 A, ülemine piir vähemalt 50 kA	
<b>Väljundi tüüp</b>	IEC 61850	
<b>Täpsusklass</b>	0.2S	
<b>Tootja veebileht</b>	www.nrelect.com	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www.nrelect.com/upfiles/20101126145630873.pdf">http://www.nrelect.com/upfiles/20101126145630873.pdf</a>	
<b>Täiendav info</b>	Sisaldab 1 mahtvuslikku pingejagurit ning kahte õhksüdamikuga volutajurit (dubleeritud). Lisaks sellele on varustatud ka energiakogumismähisega, millelt saab energia kõrgel potentsiaalil asuva elektroonikaseadme toiteks. Kõrgelt potentsiaalilt madalale viiakse mõõtetulemus kasutades optilist kanalit.	

<b>Tootja</b>	Seeco	 <p>www.seecoswitch.com</p>
<b>Tüüp</b>	CS1300	
<b>Kirjeldus</b>	Rogowski volutajur	
<b>Mõõtepiirkond</b>	600 ... 1200 A	
<b>Um, kV</b>	$U_n = 345$ kV	
<b>Täpsus</b>	0,15%	
<b>Kaal, kg</b>	63	
<b>Tootja veebileht</b>	www.seecoswitch.com	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www.seecoswitch.com/pdf/PC-006-2.pdf">http://www.seecoswitch.com/pdf/PC-006-2.pdf</a>	
<b>Täiendav info</b>	Abitoide 24 ... 110 V (valikuline).	

### 3.8 Optilist efekti kasutavad voolumuundurid

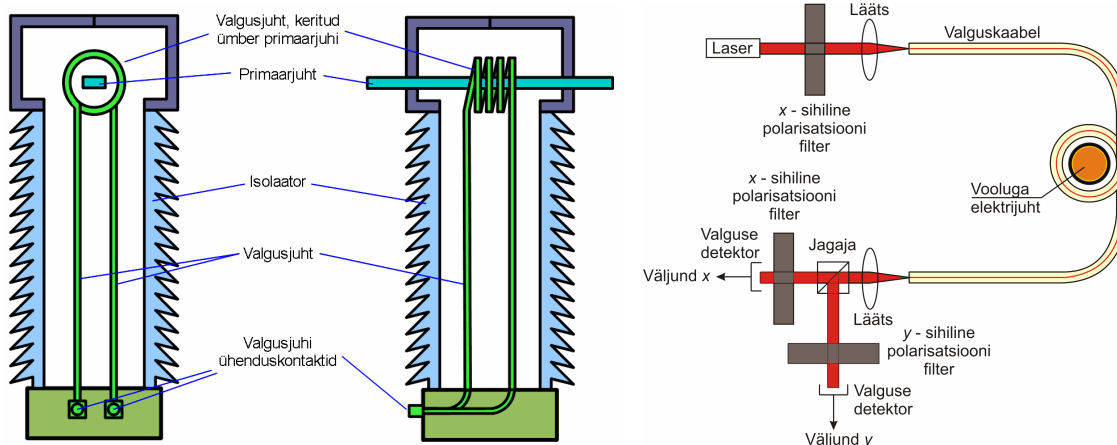
#### 3.8.1 Optilise efektiga voolumuundurid tööpõhimõte

*Füüsikaline*

Levinuim kasutatav optiline efekt voolu mõõtmiseks on tuntud Faraday optilise efektina. Selle kohaselt valguse, mis läbib magnetvälja, polarisatsiooninurk muutub proportsionaalselt magnetvälja tugevusega

$$\Delta\alpha_{pol} = k \cdot \oint \vec{H} d\vec{s},$$

kus  $\Delta\alpha_{pol}$  – polarisatsiooninurga muutus,  $k$  – materjali tundlikkus (kraadi / amprile) ning viimane osa on Ampere' koguvoolu seadus.



**Joonis 3.10. Optilist Faraday efekti rakendav voolumuundur ning voolutajuri süsteem.**

Valguse polarisatsiooni muutuse jälgimiseks on vaja monokromaatilist valguse allikat, valgusjuhti ning polarisatsioonidetektorit. Faraday efektil töötava voolutajuri ehitamiseks tuleks valgusjuht paigutada magnetvälja, kus magnetvälja põhjustajaks on juhtmes liikuv vool. Ampere' seaduse kohaselt on vooluga juhtme ümber suletud kontuuris liikudes alati sama integraali väärtus

$$I = \oint_l \vec{H} d\vec{l},$$

kus  $l$  on kontuur ning  $d\vec{l}$  on kontuuri vähima osa sihis olev ühikvektor. Seega valguskiu paigaldamine mistahes asendis ja kauguses juhtme ümber pakub teoreetiliselt sama polarisatsioonimuutuse.

Faraday efekt seisneb valguse polarisatsioonitasandi nurga muutumisega tänu asjaolule, et valgus läbib keskkonna, mida mõjutab magnetväli  $H$ . Juhul, kui keskkonda lasta valgus, mille polarisatsiooninurk on 0, siis magnetvälja tõttu on keskkonnast väljumisel on valguse polarisatsiooninurk muutunud nurga

$$\varphi_F = \rho \cdot l \cdot H,$$

kus  $\rho$  on keskkonna parameetritest sõltuv Verdet' konstant e. magnetiline eripõrang ning  $l$  on keskkonna pikkus, võrra.

Seega, paigutades valgusjuhi ümber mõõdetava juhtme ning kasutades mitut optilise juhi silmust suurema polarisatsioonimõjutuse saamiseks, on tulemus alati otseselt sõltuvuses juhete läbivast voolust

$$\varphi_F = \rho \cdot N \cdot I,$$

kus  $N$  – optilise juhi keerdude arv ümber vooluga juhi.

Optilise mõjutuse mõõtmiseks rakendatakse mõõtesüsteemi (vt. Joonis 3.10), milles valgusallika (laseri) valgus läbib esmalt polarisatsioonifiltri ning koondavate läätsede süsteemi. Selliselt tagatakse ühes tasandis polariseeritud valguse jõudmine valgusjuhti, mis juhivad valguse uuritava magnetvälja. Seejärel jõuab valgus poolläbilaskva peegli, mis saabunud valguse kaheks jaotab. Kumbki valguskiir suunatakse eri teljel paiknevale polarisatsioonifiltrile ( $+45^\circ$  ning  $-45^\circ$ ), mille alusel saab leida täpse polarisatsiooninurga muutumise. Voolu väärtuse saab mõõteandmetest arvutada, kui võrrelda x- ning y-telje sihis oleva valguskomponendi intensiivsust

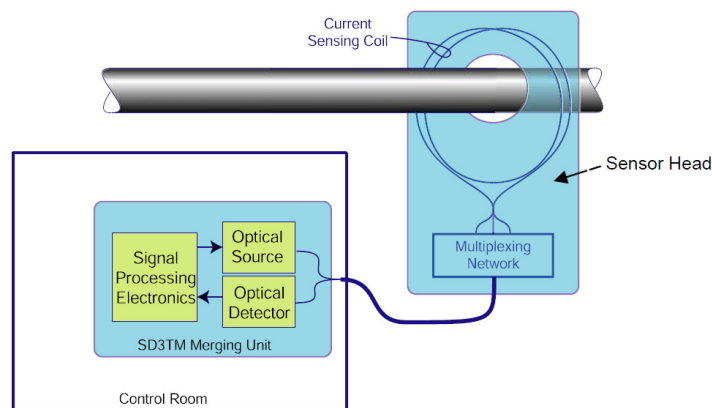
Polarisatsioonimuutus sõltuvalt mõõdetava voolu tugevusest võib põhjustada polarisatsiooninurga muutuse üle  $360^\circ$ . Seetõttu on valguse polarisatsiooninurga mõõtesüsteemis vajalik täiendav kontrollfunktsionaalsus, mis nimetatud polarisatsiooninurga täisringi korral suudaks pakkuda korrektset mõõtetulemust.

Valguse polarisatsiooni määramiseks ning filtreerimiseks rakendatakse polarisatsioonifiltreid. Nii valgusallikas kui ka valgusdetektorid on realiseeritud elektrooniliste keeruliste seadmetena, mille töökindluse tagamiseks on vaja rakendada väga kvaliteetseid ning kalleid komponente.

#### Rakenduslik

Optilise voolusensori eeliseks on valguskaabli loomulik isolatsioon. Valguskaabli koosseisus olev valgust juhtiv fiiber on tüüpiliselt valmistatud plastist või räniühenditest, mis voolu ei juhi. Elektri juhtide puudumise tõttu ei ole vajalik kallist isolatsiooni, sageli monteeritakse optilist efekti kasutavad voolutrafod otse tugiisolaatorile.

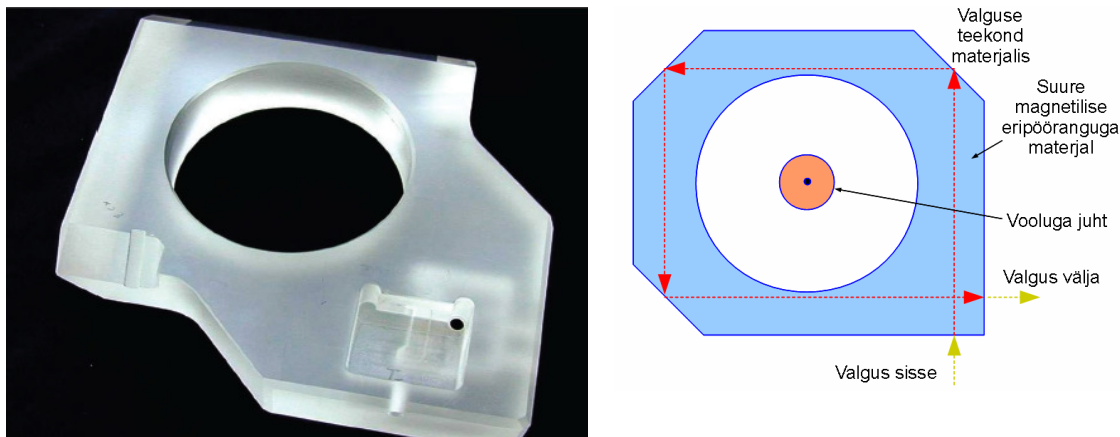
Sageli on optilised voolutajurid passiivsed ning jaotlasse paigaldatud voolutajuri ja alajaama seadmete vahel kulgevad valguskaablid. Sellises süsteemis valgusallikas ning valguse analüsaator paiknevad alajaama tehnoruumides (vt joonis). Et valguskaablis valguse ülekandmisel võib esineda mitmeid mõõtetulemust segavaid tegureid, võib selline ühendusskeem olla samuti ebatäpsusi põhjustav.



**Joonis 3.11. Optilise voolutajuri ühendus, kui valgusallikas ning valguse analüsaator paiknevad mõlemad alajaama tehnoruumides (SDO SAIT näitel) [29].**



Sageli rakendatakse Faraday efektiga voolu mõõtmiseks erinevaid jäiksid kristalle, mis ei sobi rakendamiseks painduvates valgusjuhtides. Sellisel juhul rakendatakse voolutajuris jäika kristallmoodulit, millesse valgus sisse lastakse ning see läbib seal kindlaks määratud tee, mille järel saabub taas valguskaablistesse (vt. Joonis 3.12)



Joonis 3.12. Näide jäigast optilisest tajurist [20] ning valguse teekond selles [30].

### 3.8.2 Eelised ja puudused

#### *Eelised*

Kõrge lineaarsus. Optilist efekti rakendavad voolutrafod omavad suurt lineaarset tööpiirkonda ning mõõdavad täpselt nii väikeseid kui ka suuri voolusid. Voolu mõõtetäpsus ei sõltu seejuures voolu mõõtepiirkonnast, mistõttu saab sama voolutajurit rakendada nii kommertsarvestuse rakenduses kui ka kaitsefunktsioonides, kui mõõta tuleb väga suuri voolusid.

Alalispinge mõõtetäpsus. Kuna valguse polarisatsiooni nurk on sõltuvuses mõõdetavast voolust, siis on taoliste voolutrafode väljund proportsionaalne voolu hetkväärtusega. Seetõttu on nimetatud voolutrafod sobilikud nii alalis- kui ka vahelduvvoolumõõtmiste läbiviimiseks. Optilise efektiga voolumõõteseadmed on seepärast rakendatavad ka kõrgepingelistes alalisvooluülekandesõlmedes mõõtmiseks.

Loomulik isolatsioon. Optilise efektiga voolutrafo saab koostada voolu mittejuhtivatest komponentidest ning selle põhiline tundlik sõlm – valgusjuht – on valmistatud isolatsioonimaterjalist. Tänu sellele puudub vajadus kallite isolatsioonimaterjalide rakendamiseks, mõõteseadme saab kinnitada odavale tugiisolaatorile. Selline voolutajur sobib seega väga hästi väga kõrgete pingete ja ülikõrgete pingete mõõtmiseks.


#### *Puudused*

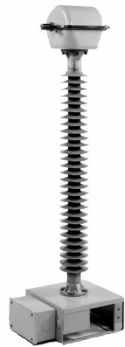
Madal töösagedusvahemik. Keeruline valgusallikaga ning mõõtedetektoriga seotud elektroonikasüsteem omab suuremat inertsi ning täpselt väikeste voolude põhjustatud polarisatsiooninurga muutuste mõõtmine nõuab täiendavat analüüsi. Seepärast ei ole turul olevad seadmed kuigi kõrge mõõteribalaiusega, kuigi kogu ribas on mõõtetäpsus tagatud.


Suur hulk mõõtetulemust määravaid tegureid. Voolust tingitud magnetväli ei ole ainus, mis polarisatsiooninurga muutust põhjustab. Iga valgusjuht omab teatud loomulikke polarisatsiooninurga mõjutamise tegureid, mis on sõltuvuses keskkonna rõhust, valgusjuhi paindest, valgusjuhi sisepingest, temperatuurist jpt. teguritest. Seetõttu on väliskeskkonnas töötamiseks sobivat optilist voolutrafot keeruline kompenseerida ning aja jooksul võib tema täpsus väheneda.


Suur komponentide hulk. Kuna valgusallikas ning mõõtedetektor koosnevad väga keerulistest elektroonilistest sõlmedest, on neis rakendatud väga suur hulk erinevaid komponente. See omakorda võib põhjustada töökindluse vähenemist ning parameetrite triivi.

### 3.8.3 Näiteid praktilistest optilise efektiga voolumõõtemuunduritest

<b>Tootja</b>	NxtPhase / Alstom	 <p><a href="http://www.nxtphase.com">http://www.nxtphase.com</a></p>
<b>Tüüp</b>	COSI-CT 362	
<b>Kirjeldus</b>	Optiline voolumõõtemuundur	
<b>Um, kV</b>	362	
<b>Väljundi tüüp</b>	Analoog 4 V, IEC 61850	
<b>Kaal, kg</b>	56	
<b>Täpsusklass</b>	0.2	
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.nxtphase.com">http://www.nxtphase.com</a>	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www.nxtphase.com/pdf/ALSTOM_COSI_UK_WEB_02.pdf">http://www.nxtphase.com/pdf/ALSTOM_COSI_UK_WEB_02.pdf</a>	
<b>Täiendav info</b>	Väljund täiendava opto-elektrilise seadme kaudu. Sagedusriba 0.5 Hz ... 6 kHz, alaliskomponent	

<b>Tootja</b>	ABB	 <p><a href="http://www.abb.com">http://www.abb.com</a></p>
<b>Tüüp</b>	MOCT 362	
<b>Kirjeldus</b>	Optiline voolumõõtemuundur	
<b>Um, kV</b>	362	
<b>Väljundi tüüp</b>	1 A	
<b>Kaal, kg</b>	158	
<b>Täpsusklass</b>	0.2	
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.abb.com">http://www.abb.com</a>	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/206275cc76bcb0ba8525755f006c0e9c/\$file/MOCT_2GNM110060_new.pdf">http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/206275cc76bcb0ba8525755f006c0e9c/\$file/MOCT_2GNM110060_new.pdf</a>	
<b>Täiendav info</b>	Tavapärane vooluväljund, 1A (sõltub liiteseadmest)	

<b>Tootja</b>	Arteche	 <p><a href="http://www.smartdigitaloptics.com">http://www.smartdigitaloptics.com</a></p>
<b>Tüüp</b>	SDO SAIT	
<b>Kirjeldus</b>	Optiline voolumõõtemuundur	
<b>Um, kV</b>	-	
<b>Väljundi tüüp</b>	Analoog 5 V, IEC 61850	
<b>Kaal, kg</b>	15 (isolaatorita)	
<b>Täpsusklass</b>	0.2	
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.arteche.com">http://www.arteche.com</a>	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www.arteche.com/arteche/html/pdfs/108/smART%20DO(EN).pdf">http://www.arteche.com/arteche/html/pdfs/108/smART%20DO(EN).pdf</a>	
<b>Täiendav info</b>	Väljund täiendava opto-elektrilise muundurseadme kaudu. Optilise kaabli pikkus kuni 5 km.	

<b>Tootja</b>	NRelect	
<b>Tüüp</b>	PCS-9250-OAC	
<b>Kirjeldus</b>	Optiline voolumõõtemuundur	
<b>Väljundi tüüp</b>	Analoog 5 V, IEC 61850	
<b>Kaal, kg</b>	15 (isolaatorita)	
<b>Täpsusklass</b>	0.2	
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.nrelect.com">http://www.nrelect.com</a>	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www.nrelect.com/upfiles/20101126150135875.pdf">http://www.nrelect.com/upfiles/20101126150135875.pdf</a>	
<b>Täiendav info</b>	Rakendatakse Sagnac' interferentsimeetodit, et vähendada temperatuuri, vibratsiooni jt. mõju mõõtetulemustele.	

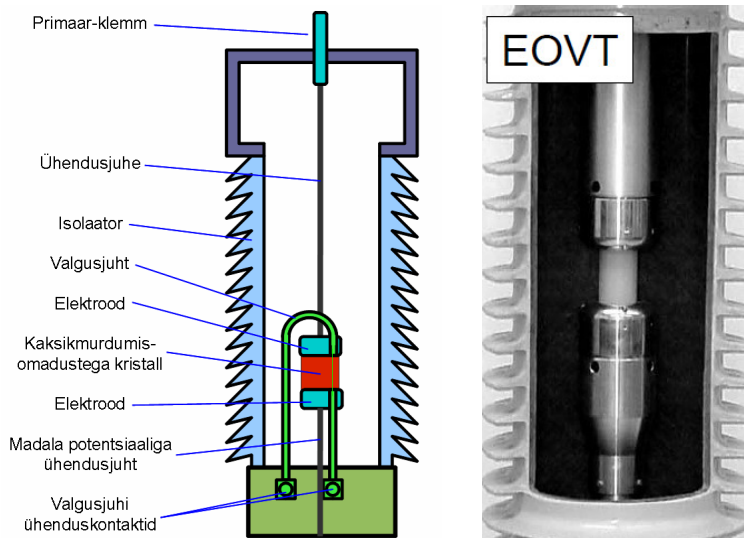
<http://www.nrelect.com>

### 3.9 Optilist efekti kasutavad pingetraford

#### 3.9.1 Optilise efektiga pingetrafode tööpõhimõte

*Füüsikaline*

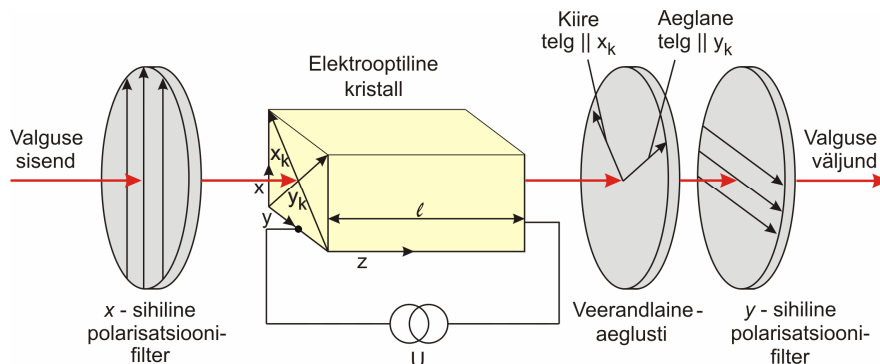
Optilise efektiga töötavad pingetajurid rakendavad tüüpiliselt nn. Pockelsi efekti, mis põhineb teatud kristallides esineval kaksikmurdumisel (ingl. k. birefringence).



**Joonis 3.13. Optiline pingetajur [31].**

Kaksikmurdumise põhjustajaks on valguse levikiiruse erinevus teatud materjalide erinevates kristallstruktuuri tasandites. Elektro-optiline efekt tähendab, et valguse levikiiruste erinevus erinevates materjali tasandites on sõltuvuses on sõltuvuses materjalile rakendatud elektriväljast.

Üheks mooduseks elektro-optilise efekti kaudu elektrivälja tugevust määrata, on materjalist läbi mineva valguse amplituudmoduleerimine. See saavutatakse, liites kokku kahes materjali eri tasandis liikuvad valguse geomeetriselised komponendid. Tänu erinevale levikiirusele eri materjali tasandites omavad need peale materjali läbimist faasinihet üksteise suhtes. Selliseks moduleerimiseks on kasutusel keeruline optiline süsteem (vt. Joonis 3.14).

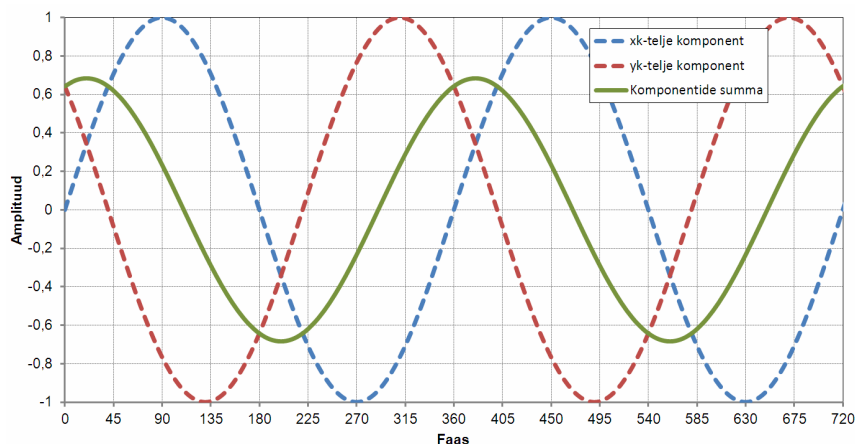


**Joonis 3.14. Optilist efekti kasutava pingemõõtmisüsteemi struktuur.**

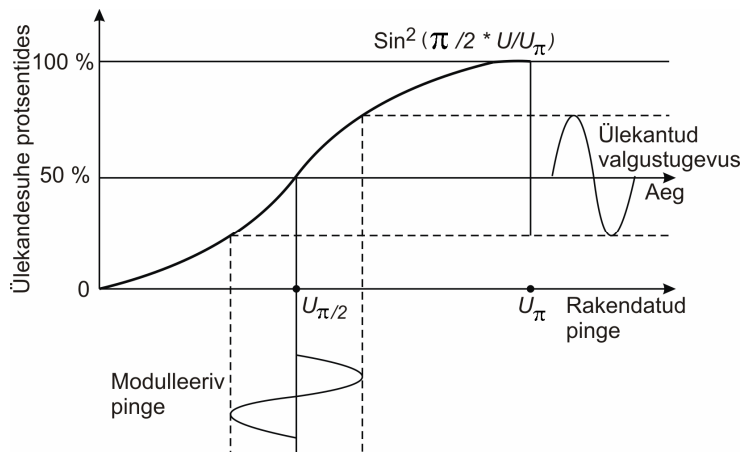
Selleks filtreeritakse valgusallikast saabuv valgus esmalt  $x$ -telje suunaliselt polariseeritud filtriga, mille järel suunatakse valgus kristalli. Kristalli geomeetriselise asendi valitakse selliselt, et kristalli struktuursed  $x_k$ - ning  $y_k$ -teljed on ruumi  $x$ - ja  $y$ -telgede suhtes pööratud

45 kraadi. Sellega antakse võrdne valguskomponent kristalli  $x_k$ - ning  $y_k$ -telgede suunas. Peale kristalli läbimist on kristalli aeglases tasandis liikuv valgus erineva faasiga, kui kiires tasandis olev valgus. Juhul, kui kristalli otstele rakendada poollainehilistumist põhjustav pinge, on elektrivälja tugevus ühel teljel vastasmärgiline teisel teljel oleva elektriväljakomponendiga.

Selliste valguskiirte ühises polarisatsioonitasandis (ruumilises vaates) olevate komponentide kokku liitmisel hakkab edastatava valguse intensiivsus vähenema (elektriväljakomponendid nõrgendavad üksteist) või kasvama (elektriväljakomponendid tugevdavad üksteist). Vastavate valguskomponentide liitmiseks tuleb taas rakendada polarisatsioonifiltreid ühes ruumilises tasandis (näiteks  $y$ , vt Joonis 3.14). Arvestades, et valguse elektriväljade faasinihe on sõltuvuses kristallile rakendatud pingest, saab selliselt valguse intensiivsust amplituudmoduleerida (vt. Joonis 3.16).



Joonis 3.15. Erinevates telgedes olevate siinuslike komponentide liitmine (faasinihe 140° korral).



Joonis 3.16. Valguse intensiivsuse amplituudmoduleerimine pinge mõõtmisel.

Amplituudmodulatsiooni rakendamisel on valguse intensiivsuse ülekanne siinuse ruutsõltuvuses

$$I_{välj} = I_{sis} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{u_z}{U_{\pi}}\right),$$

kus  $I_{sis}$  on kristalli siseneva valguse intensiivsus ning  $U_{\pi}$  on pinge väärtus, mille puhul eri telgedes liikuva valguse faasinihe on  $\pi$ .


Sellise sõltuvuse rakendamisel on probleemiks tundetus nullise pinge juures ning mittelineaarne sõltuvus pingest. Optiliselt saab olukorda korrigeerida, lisades veel teise,  $x$ - ning  $y$ -telje suhtes  $\pi/2$  faasinihet tekitava kaksik-murdumisomadustega kristalli. Viimast pingega ei mõjutata, nii et selline faasinihe on konstantne. Samas saab täiendavalt  $\pi/2$  faasinihkega nihutada intensiivsuse ülekandekarakteristikul punkti lineaarsele vahemikule (vt. Joonis 3.16).


Pockels'i optilise efekti abil pinge hetkväärtuse mõõtmine toimub nõutud omadustega kristalli otpindade pingestamisega. Selleks ühendatakse kristalli otstele elektroodid, vt. Joonis 3.13.

#### Rakenduslik

Pockels'i efekti abil pinge mõõtmiseks oleks vaja kristall asetada ruumi, milles esineb mõõdetava pingega võrdeline elektriväli. Tavaline praktika on kristalli otpindadele elektroodide lisamine, mille vahele rakendatakse kõrgepinge. Kuna Pockels'i efektiga kristallid on tüüpiliselt head isolaatorid, ei ole elektroodide lisamine suuremaks takistuseks kõrgete pingete mõõtmisel.

### 3.9.2 Näiteid praktilistest optilise efektiga pingetrafodest

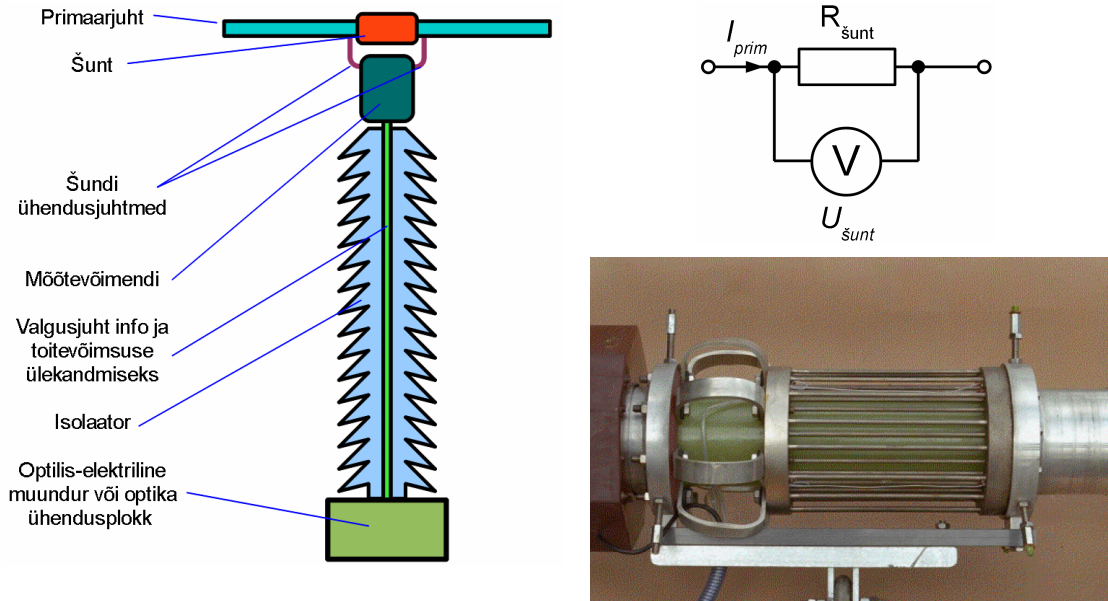
<b>Tootja</b>	ABB	 <p><a href="http://www.abb.com">http://www.abb.com</a></p>
<b>Tüüp</b>	OMU 362 [32]	
<b>Kirjeldus</b>	Optiline kombineeritud pinge- ja voolu-mõõtemuundur	
<b>Väljundi tüüp</b>	IEC60044-2	
<b>Kaal, kg</b>	179,7	
<b>Täpsusklass</b>	0,2S	
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.abb.com">http://www.abb.com</a>	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/f299f407c604c3048525755f006c7cfd/\$file/OMU_2GNM110052_new.pdf">http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/f299f407c604c3048525755f006c7cfd/\$file/OMU_2GNM110052_new.pdf</a>	
<b>Täiendav info</b>		

<b>Tootja</b>	Nextphase (endine)	 <p><a href="http://nxtphaseinc.com">http://nxtphaseinc.com</a></p>
<b>Tüüp</b>	NXVT362 [33]	
<b>Kirjeldus</b>	Optiline kombineeritud pinge- ja voolu-mõõtemuundur	
<b>Väljundi tüüp</b>	4 V (ef. väärtus)	
<b>Kaal, kg</b>	279	
<b>Täpsusklass</b>	0,2S	
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.nxtphase.com">www.nxtphase.com</a>	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://nxtphaseinc.com/pdfs/NXVT.pdf">http://nxtphaseinc.com/pdfs/NXVT.pdf</a>	
<b>Täiendav info</b>	Sagedusribalaius 0,5 Hz ... 6 kHz. Elektroonikamoodulite võimsustarve 60 W.	

### 3.10 Voolušundid

#### Tööpõhimõte

Voolušundi tööpõhimõtte aluseks on Ohmi seadus. Voolušunt konstruktsiooniliselt koosneb kindla takistusega juhtist, millest lastakse läbi koormusvool.



Joonis 3.17. Šundiga voolumõõtemuundur ning rakendatav šundi element [34].

Iga takistust  $R_{\text{šunt}}$  omav keha, mida läbib vool  $I_{\text{prim}}$ , omab vooluga proportsionaalset pingelangu

$$\Delta U_{\text{šunt}} = I_{\text{prim}} \cdot R_{\text{šunt}}$$

Tüüpilised voolušundid on ülikõrgepingetel ette nähtud voolude mõõtmiseks suurusjärgus 1000 A. Šuntide takistused on seejuures väga väikesed, kuna seda läbib vool ning pingelang annavad korrutisena šundil eralduva võimsuse

$$P_{\text{šunt}} = I_{\text{prim}} \cdot \Delta U_{\text{šunt}} = I_{\text{prim}}^2 \cdot R_{\text{šunt}}$$

Šuntide takistused jäävad reeglina väga väikesteks, vahemikus  $10 \mu\Omega \dots 10 \text{ m}\Omega$ , mis tagab väikese eralduva võimsuse, kuid samas ka väikese pingelangu.  $100 \mu\Omega$  takistuse puhul eraldub 200 A voolu korral 4 W soojust, kuid pingelang on ainult 0,02 V. Sellise pingelangu täpne mõõtmine võib kujuneda samuti probleemiks, kuna šundi füüsilised mõõtmised soosivad müra vastuvõtlikkust väliskeskkonnast. Samuti on šundid suhteliselt suures sõltuvuses temperatuurist, kuid viimane võib muutuda lisaks ümbritseva keskkonna temperatuurile ka tänu šunti ennast läbivale voolule.

Kõrge sagedusega siirdeprotsesside puhul on šuntidel probleemideks pinnaefektid ning induktiivsus, mistõttu rakendatakse erikujundust – tuntud on koaksiaal- ning puurikujulise (vt Joonis 3.17) struktuuriga šundid.

Voolušunte rakendatakse enamasti alalisvooluülekanal, kus tavapäraseid (magnetilise südamikuga) vahelduvvoolu trafosid rakendada ei ole võimalik. Šuntide takistuse ja ühtlasi mõõtetäpsuse tagamiseks valmistatakse šundid erisolamitest, mille hind on suhteliselt kõrge. Tänu kõrgele hinnale on šundid rohkem tuntud laboratoorsete mõõtevahenditena, millega on võimalik mõõta väga erinevaid siirdeprotsesse ja nende olemust.

## Eelised ja puudused

### Eelised


Lineaarsus. Voolušuntidel puuduvad küllastusnähtused ning nende lineaarne mõõtepiirkond on tüüpilises rakenduses väga lai. See tähendab, et ka töövoolust kordades kõrgemate rikkevoolude korral on siirdeprotsessid täpselt mõõdetavad ja jälgitavad.

Lai sagedusriba. Šundi töösagedusriba on väga lai ning sobiva mõõtemuunduri/võimendi abil ulatub see megahertsidesse. Laborites on rakendatud sageli koaksiaalšunte, mille puhul šundi omainduktiivsus on väga väike, mille tõttu sagedusriba on väga lai ning sobib ka osalahenduste voolude mõõtmisteks.

### Puudused

Stabiilsus. Šuntide puhul on määravaks ka materjali takistuse temperatuuritegur, mille tõttu laias temperatuurivahemikus šunti täpseteks mõõtmisteks kasutamiseks on vaja rakendada täpseid kompenseerivaid ahelaid või mõõtesildu.

### Näited praktilistest toodetest

<b>Tootja</b>	NRelect	
<b>Tüüp</b>	PCS-9250-EACD	
<b>Kirjeldus</b>	Alalisvoolu mõõtesünt	
<b>Mõõtepiirkond</b>	1000 ... 3000 A, ülekoormus lühiajaliselt kuni 8 kA	
<b>Väljundi tüüp</b>	IEC 60044-8	
<b>Tootja veebileht</b>	<a href="http://www.nrelect.com">http://www.nrelect.com</a>	
<b>Info teabeleht</b>	<a href="http://www.nrelect.com/upfiles/20101126145630873.pdf">http://www.nrelect.com/upfiles/20101126145630873.pdf</a>	
<b>Täiendav info</b>	Võendussagedus 32 kHz	

## 3.11 Kokkuvõte

Erinevate mittetavapäraste mõõtemuundurite tehnoloogiate rakendamise näidistena toodudtoodete nimiparameetrid on muljetavaldavad. Kõikidel mittetavapärastel mõõtemuunduritel on iseloomulik lühiajaline või pikemaajaline ülekoormusvõime, mille juures ei esine mõõtemuunduri ülekoormust. See tähendab, et ka ülekoormuse korral on selliste mõõtemuundurite väljundis suhteliselt täpne mõõtetulemus tagatud.

Tavapäraste mõõtemuundurite juures loetletud terve rida erinevaid puudusi, nagu küllastused ning piiratud töösagedusvahemik, mis tavapäraseid mõõtemuundureid nende töös oluliselt piirasid. Tavapäraste mõõtemuunduritega ei ole üldiselt võimalik täpselt läbi viia elektritoite kvaliteedi mõõtmisi tänu piiratud töösagedusvahemikule, siirdeprotsesside täpset jälgimist tänu küllastus- ning reosnantsinähtustele ning ka lineaarse tööpiirkonna ulatus on piiratud tänu erinevatele küllastusnähtustele.

Nimetatud tavapäraste mõõtemuundurite piirangud üldisemas mõttes mittetavapäraste tehnoloogiatega mõõtemuunduritel puuduvad. Samas on mittetavapärased mõõtemuundurid üldiselt varustatud täiendavate elektrooniliste seadmetega (filtrid, võimendid, liiteseadmed jpt), mis seavad omalt poolt piirangud.



Mittetavapäraste mõõtemuundurite tootjad esitavad infot oma toodete kohta suhteliselt napilt. Kõik tootjad, kes on esindatud ülal näidetega mittetavapäraste mõõtemuundurite reaalsete toodetega, vähemal või rohkemal määral ei omanud oma toodeteseeria kodulehtedel avalikku infot vastavate toodete kohta. Seejuures on kirjandusest võimalik leida mitmesugust infot erinevate pilootprojektide kohta ning ka firmade endi infomaterjalid annavad täpsed tootenimetused. Infonappuse põhjuseks võib olla kommertstoote masstootmisele ja müügile eelmeva katseperioodi jätkumine.

Optilised mõõtemuundurid on prameetrite poolest väga head, kuid nendega võib olla seotud mitmeid erinevaid täiendavaid kulutusi. Üheks selliseks näiteks on erinevate spetsiaalomadustega valguskaablite rakendamine alajaamade ulatuses, kui valgusallika ning -analüüsifunktsioonidega seade paikneb näiteks sadade meetrite kaugusel alajaama hoones. Valguskaablite komponentide liitmisega seotud eritehnika võib teha pikaks hooldus- ja remondiajad.

Lihtsamad on elektriliste tajuritega mõõtemuundurid – takistuslikud ning mahtuvuslikud pingejagurid, Rogowski voolutajurid. Nende ehitus on üldiselt lihtne, konstruktsioon kerge, mis peaks ka nende hinna tegema oluliselt odavamaks optiliste voolutajuritega mõõtemuunduritest. Oluliselt odavam on kindlasti gaasisoleeritud alajaama mittetavapäraste mõõtemuunduritega kombineeritud pinge- ja voolumõõtemuundur.

Eestis laiemalt levinud õhkisolatsiooniga alajaamadesse võiks kaaluda rakendamiseks kompenseeritud takistuslikke pingejagureid ning optilisi voolumõõtemuundureid. Hetkel ei pakuta tootjate poolt veel ametlikult Rogowski voolutajureid õhkisolatsiooniga alajaamadele, kuid nende turule tulekul oleks see alternatiiv optilistele voolumõõtemuunduritele. Kaaluda võiks uute gaasisoleeritud alajaamade projekteerimisel koosseisu lisada samuti kombineeritud pinge- ja voolumõõtemuundureid.

## 4. Näited mittetavapäraste mõõtemuundurite rakendamisest

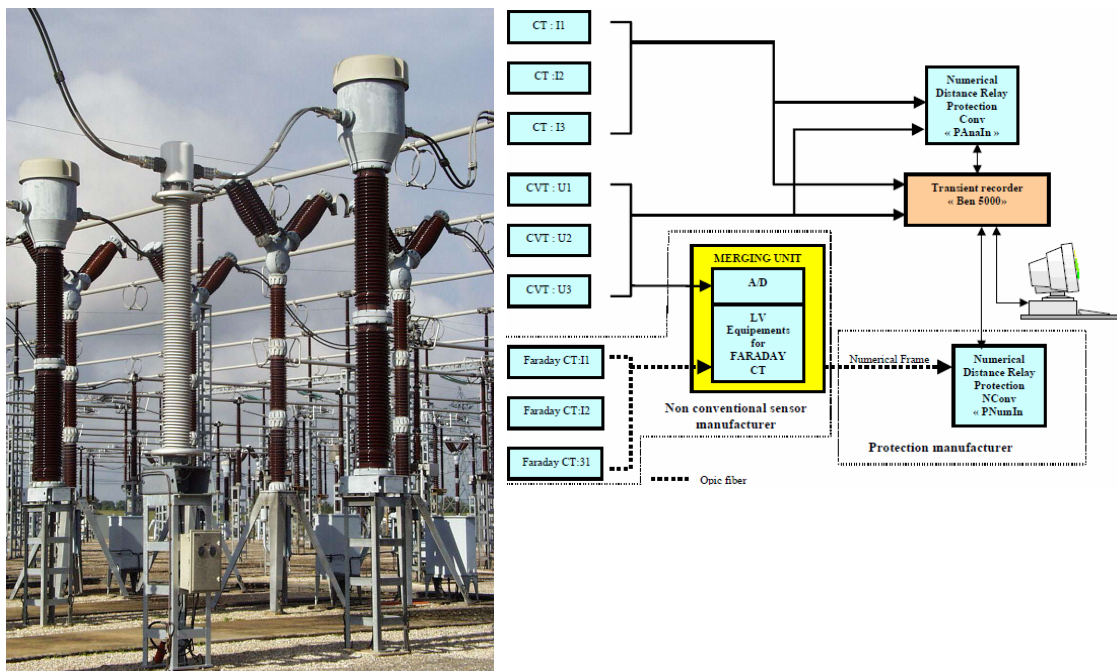
### 4.1 Pilootprojektid alajaamades

Esimesed katsed mittetavapäraste mõõtemuundurite rakendamisest algasid juba sajandivahetusel. Prantsusmaal, Kanadas ja Suurbritannias alustati esimeste „moodsate”, digitaalandmesidet rakendavate mittetavapäraste mõõtemuundurite praktilisi katseid ajavahemikus 2000 – 2003 [35]. Sellele järgnevalt on läbiviidud katsete arv kasvanud ning järjest enam katse- ja pilootpaigaldisi rajatud. Antud peatükis toodud pilootprojektide ülevaates on esindatud näited, kus on materjalide alusel võimalik osutada rakendatud seadme tüübi, tootja ning asukoha andmeid. Kirjandusallikatest [36][37] võib leida vihjeid ka mitmetele muudele pilootprojektidele, kuid viimaste puhul ei ole andmeid kuigi palju, mis antud uuringu raames annaksid uut või kaulikumat infot.

#### 4.1.1 Prantsusmaa

##### Vielmoulin

Vielmoulin alajaamas rakendatakse Alstomi optilisi voolumõõtemuundureid (Areva varasem tooteseeria CTO) ja see on üks pikema aegselt mittetavapäraste mõõtemuundurite katseplatvorme [38]. Alajaam on õhksisolatsiooniga ning nimipinge 400 kV. Alajaama valiku põhjus oli selle rikete arv, tegemist oli ilma piksekaitsetrossita liiniga. Katseks üles seatud seadmed ei juhtinud releekaitset ega näiteks kaitselüliti [39].



Joonis 4.1. Optilised mõõtetrafod Vielmoulin' alajaamas (esiplaanil), paralleeltöös magnetsüdamikuga voolutrafodega (esiplaanil paremal) [38] ning ülevaade katsest skeemina [39]

Alajaamas on rakendatud optilised voolumuundurid paralleelis tavapäraste trafodega (vt Joonis 4.1). Esimese prioriteedina oli ülesandeks uurida digitaalse andmevahetusprotokolli ning tavapärase analoogliini mõõtetulemuste kooskõla. Digitaalandmevahetuseks rakendati liiteseadet (Merging Unit). Sellesse juhti erinevad mõõtesuurused nii pinge- kui

vooltrafodest ning optilistest voolumuunduritest, kokku 3 faasi mõõtetulemused. Mõõtemuundurite ning liiteseadme vahel rakendati punktist-punkti ühendust ning optilist digitaalset andmesidet. Esimesteks katseteks ei olnud veel standardiseeritud andmevahetusprotokoll spetsifitseeritud, seepärast erines rakendatud andmevahetusprotokollis erinevusi võrreldes standardis IEC61850 kirjeldatuga.

Enne rakendamist uuriti alajaama käitumist põhjalikult simulaatoril ARENE, millega mängiti läbi rängimad rikkeolukorrad. Riketena uuriti süsteemi käitumist nii faasidevaheliste, faaside ja maa vaheliste ning kolmefaasiliste lühistega. Simulatsioonitulemused näitasid, et nii analoog- kui digitaalkanalid käitusid identselt. Saadud kinnituste järel liiguti edasi katsetele reaalses keskkonnas.

Reaalse keskkonnaga seotud elektromagnetilise ühilduvuse (EMÜ) testidena oli ette nähtud

- 1) madalpingel töötavate seadmete immuunsus ning emissioon, mida katsetati enne seadmete tööleseedmist;
- 2) seadmed katsetati laboritingimustes, rakendades neile kõikvõimalikud mõjutused, mis elektrivõrkudes võivad aset leida;
- 3) defineeriti EMÜ katsestsenaariumid, mis taolistele uutele seadmetele tuleks läbi viia.

EMÜ nõuded nii emissioonile kui ka immuunsusele on loetletud ka elektroonsete voolutajurite standardis IEC 60044-8.

Katsete käigus vaadeldi neutraalselt kahe mõõteahela olekut ning samaaegselt registreeriti pinge ning voolu väärtused. Kokku salvestati 9 sündmust ning kõigi puhul reageerisid nii analoog- kui digitaalkanalid samasuguselt.

Allikast [40] on teada, et antud alajaamas toimunud katsete kohta valmis 2003. aastal EDF-i raport „Synthèse de l'expérimentation des protections Alstom Micom P442 à Viemoulin”, mis võtab kokku 3 aasta katsete tulemused. Kokku registreeriti 36 sündmust, kõikide puhul optilise voolumõõtemuunduriga ning digitaalandmevahetust rakendav süsteem salvestas identsed tulemused võrreldes tavapärase süsteemiga.

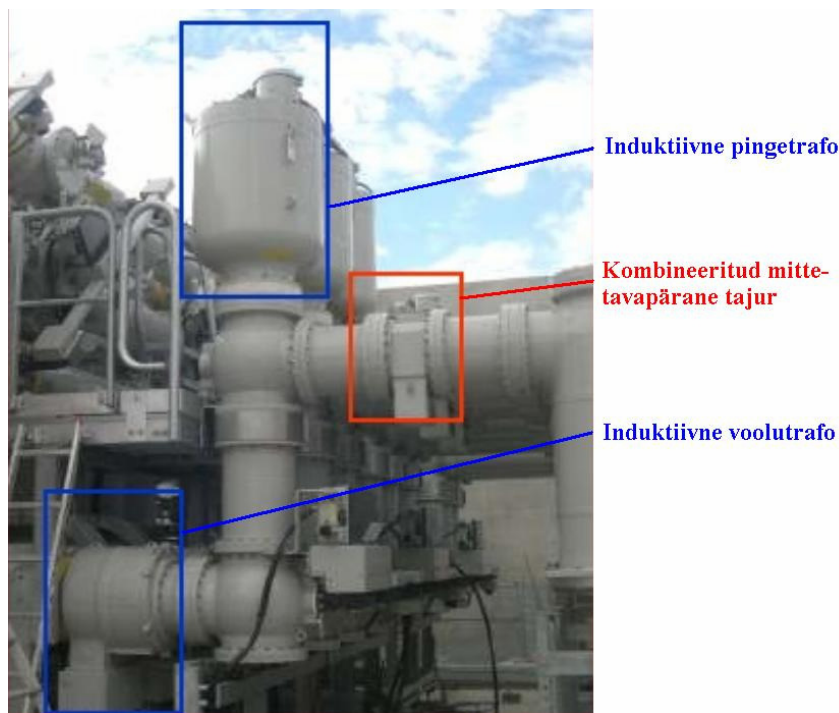
## Saumade

Saumade alajaam on gaasisoleeritud alajaam, mille nimipinge on 245 kV. Saumade alajaamas rakendatakse Alstom'i toodetud mittetraditsioonilisi mõõtemuundureid, milleks on Rogowski voolutajur ning mahtuvuslik pingejagur. [41]. Mittetavapärased muundurid on gaasisoleeritud alajaamades olulised ruumi kokkuhoiu mõttes, kuna iga pikkusühik gaasisoleeritud konstruktsiooni maksab palju.

Saumade alajaamas läbi viidud katsetest on teada, et sarnaselt Viemoulin' alajaamaga rakendati uusi mõõtemuundureid paralleelselt tavapäraste induktiivsete pinge- ja voolutrafodega [42], vt Joonis 4.2.

Katsetel rakendati ka IEC 61850-9-1 ning IEC 61850-9-1 standardile vastavat andmevahetust, millega ühendati ka [19]

- 2tk Landis+Gyr arvesti täpsusklassiga 0,2;
- 2tk distantkaitseseadet MICOM P442, tootja Areva;
- 2tk sistantskaitseseadet 7SA522, tootja Siemens.



**Joonis 4.2. Saumade 245 kV alajaamas rakendatud mittetavapärased mõõtemuundurid.**

Saumade alajaama katsed algasid 2005. aasta lõpus ning esmaseks eesmärgiks oli selgitada, kas digitaalandmevahetust kasutavad seadmed on sama täpsed, kui analoogandmevahetust rakendav süsteem. Katsete käigus registreeriti[42]:

- 1) 7 erinevat sündmust, poole aasta jooksul;
- 2) energiamõõtmised 10 kuu jooksul aastal 2006 näitasid „väikest” erinevust [42] tavapäraste mõõtemuundurite ja analoogsüsteemi ning mittetavapäraste mõõtemuundurite ja digitaalandmevahetussüsteemi vahel. Analüüs, mis seda põhjustas ning kas erinevuse põhjuseks on mõõtemuundurite täpsuste erinevus, pole tulemustes esitatud.

Üldise kokkuvõttena on mainitud, et uuemad mittetavapärased mõõtemuundurid ning neid rakendav süsteem on vähemalt sama usaldusväärne ning täpne, kui tavapärane süsteem.



**Joonis 4.3. Saumade alajaamas olevad kombineeritud gaasalajaama mõõtemuundurid lähivaates. Allikas: <http://www.scribd.com/doc/37662127/1>; [40].**

## 4.1.2 Kanada

### La Prairie

La Prairie alajaam on õhksolatsiooniga ning alajaama nimipinge on 315 kV. Alajaama omanik on Hydro Quebec [41], kes viib läbi katseid koostöös Alstom'i firmaga.



**Joonis 4.4. La Prairie alajaama paigaldatud optilised voolutrafad [41] (ilmselt enne paigalduse lõppu, näha on nendega mitteühendatud juhid).**

Alajaamas on üles seatud optilised voolumõõtemuundurid (vt. Joonis 4.4), mis töötavad paralleelselt varasemate, tavapäraste voolu- ja pingemuunduritega [35]. Lisaks mittetavapäraste mõõtemuundurite katsetele on alajaamas rakendatud rida erinevate tootjate poolt pakutavatest IEC 61850 andmevahetust kasutavaid seadmeid. Katsete eesmärk on uurida muuhulgas erinevate tootjate poolt valmistatud seadmete kokkusobivust ning riskasutust.

Mõõtemuundurite katsepaigana on alajaama eeliseks tema asukoht, mis on aasta lõikes suure temperatuuri kõikumisega ( $-35 \dots +55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). See võimaldab saada ülevaadet mõõtemuundurite tööst karmimates ilmastikuoludes [41].

Katsete tulemuste kohta on ainult napp infokilde, kuid need kinnitavad, et saavutatud tulemused on igati rahuldavad [35].

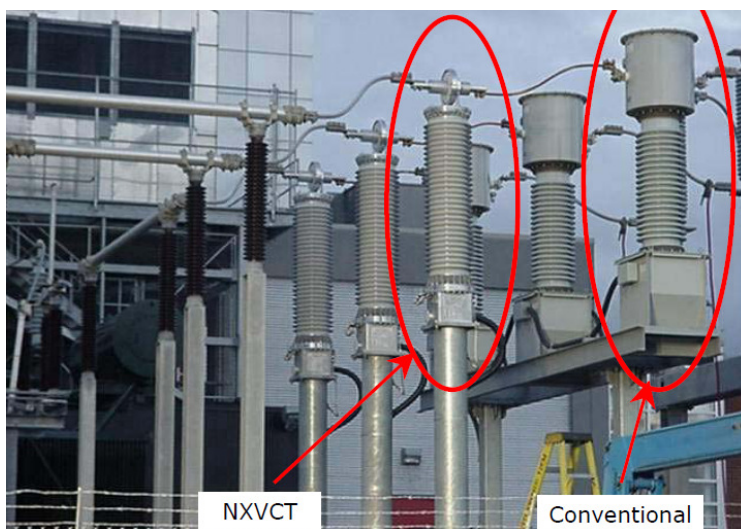
### Montreal

Montrealis olid dubleerivalt alajaama paigaldatud 145 kV maksimaalse lubatud pingega firma NxtPhase kombineeritud optilised pinge- ja voolumõõtemuundurid NXVCT (vt. Joonis 4.5). Iga selline kombineeritud mõõtemuundur koosnes kaks optilist voolumõõtemuundurit (üks mõõtefunktsioonides, ulatusega kuni 900 A ning teine kaitseotstarbeline mõõteulatusega kuni 40 kA) ning üks optiline pingemõõtemuundur. Süsteem paigaldati alajaama oktoobris 2001 [43].

Alajaamas läbi viidud eksperimendi käigus vaadeldi kommertsarvestusmõõtmisi, mittetavapäraste mõõtemuunduritega saadud tulemusi võrreldi tavapäraste mõõtemuundurite poolt mõõdetud tulemustega. Projekti eesmärgiks oli pikema aja jooksul (2-3 aastat) saada kinnitust

- mõõtemuundurite tööst ja standardi nõuetele vastavusest, erinevate töötingimuste ning ka väikeste primaarvoolude korral;
- mõõtesüsteemide stabiilsuse, töökindluse ja hooldatavuse küsimustes.

Lisaks oli väikemaks eesmärgiks saada kogemusi taolise süsteemi tööst, kuna see oli esimesi omataolisi, s.h leida omadusi ja funktsioone, mis aitaksid kaasa töökindlusele ja kasutusmugavusele.



**Joonis 4.5. NXCTV tüüpi optilised mõõtemuundurid Montrealis.**

Katsetele eelnevalt oli sooritatud terve rida laboratoorseid mõõtmisi, mis kinnitasid voolumõõtemuundurite täpsuseks 0,3%, seda temperatuurivahemikus  $-40^{\circ}\text{C}$  kuni  $+50^{\circ}\text{C}$ . Pingemõõtemuundurite täpsus peale paigaldust hinnati ümber, kuna olemasolevad tavapäraseid mõõtemuundurid näitasid 0,4% süstemaatilist erinevust võrreldes optiliste pingemõõtemuunduritega, uueks hinnanguliseks täpsuseks määrati  $-0,4 \pm 0,3\%$ . Pingemuundurid töötasid stabiilselt ja sama täpsusega pikema perioodi ning erinevate välistemperatuuride korral.

Testide käigus mõõdeti madala koormusega fiidrit, milles primaarvool oli enamasti alla 3 A, vahel harva 12 A. Optilistel voolumõõtemuunduritel oli väljundis pidevalt müra, mis vastas umbes samale, 3A väärtusele. Müra mõju hinnati kommertsarvestuses väikeseks, kuna müra on juhuslik ning selle summa on pikema aja jooksul 0. Samas põhjustab see kõrvalekaldeid ef. väärtuste võrdlemisel.

Võttes arvesse erinevaid mõõtesüsteemide komponentide täpsusi, oli oodatud kõrvalekalle kommertsarvestustulemustes mittetavapäraste ja tavapäraste lahenduste võrdluses  $\pm 1,9\%$ , kui mõõdetavad voolud jäid alla 30 A. Üldiselt olid tulemused oodatust paremad, alla 3 A voolude korral olid erinevused maksimaalselt 1,4% ning ligikaudu 12 A voolude mõõtmisel oli erinevus väikesem, kui 0,35%. Et mõõtmiste käigus fiidri vool ei ületanud kordagi 12 A, ei saa nende tulemuste alusel teha järeldusi nimisuurustele lähedasema talitluse kohta.

Katsete käigus ilmnunud probleemide hulka kuulusid ühe optilise tajuri riknemine ning samuti gaasileke (lämmastik) ühes muunduris. Optiline tajur riknes tänu selle mehaanilisele pakendamisele, mis osutus liialt temperatuuritundlikuks. Teiste voolumõõtemuundurite puhul kasutati erinevat pakendamist ja need töötasid edukalt.

## **Vancouver**

Tegelik paigaldis asub Vancouverist väljaspool, kuid allikas [43] ei täpsusta alajaama nime. Alajaam kuulub süsteemioperaatorile BC Hydro ja selle suurim lubatud pinge on 550 kV. Aprillis 2003 paigaldati alajaama kombineeritud optilised pinge- ja voolumõõtemuundurid NXVCT (vt. Joonis . Nimimõõtepinge oli 297,3 kV (faas-maa) ning nimivool 1500 A, täpsusklass 0,3 (piirkonnas 3...75 A 0,6).



**Joonis 4.6. NXVCT 550 kV paigaldises Kanadas, Vancouveri lähistel.**

Katsete käigus jälgiti süsteemi tööd kommertsarvestusmõõtmiste läbiviimisel. Võrreldi tavapäraste ja optiliste mõõtemuundurite tulemusi, tavapärasteks mõõtemuunduriteks selles ülesandes olid SF6-isolatsiooniga voolutrafod ning mahtvuslikud pingetrafod. Vool fiidris oli keskmiselt 450 A.

Pooleaastase mõõtmise järel (juuni – nov. 2003) saadud tulemused näitasid, et tavapäraste ja optiliste mõõtemuundurite abil saadud tulemused langesid kokku väga hästi. Optilised mõõtemuundurid näitasid üles ka suurt stabiilsust. Lisaks sellele kinnitasid tulemused, et mõõtmisetulemused langevad kokku ka suhteliselt väikeste voolude korral, kuigi mõõtetulemuste hajuvus väikeste voolude mõõtmisel on suurem.

### **4.1.3 Suurbritannia**

#### **Osboldwick**

Osboldwick'i alajaamas rakendatakse Alstom'i mõõtemuundureid mahtvuslikke pingejagureid ning Rogowski voolumuundureid selle alajaama gaasisoleeritud osas [41].

Osboldwick'i alajaama nimipinge on 400 kV ning uudse elemendina kasutatakse selles gaasisoleeritud ülekandeliini. Rogowski voolumuundurid RECT on paigaldatud kummagisse kõnealuse liini otspunkti (vt. Joonis 4.7). Kasutuses on ka üks mahtvusliku pingejaguriga mittetavapärane pingemõõtemuundur CEVT.

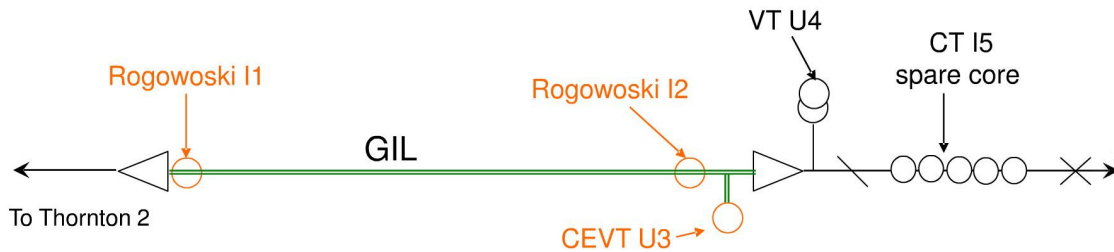
Katsetel oli kaks peamist ülesannet [44]:

- 1) uurida mittetavapäraste mõõtemuundurite tööd reaalses talitusolukorras, s.h jälgida täpsust, töökindlust ning tööd pikema aja jooksul;

- 2) uurida liini diferentsiaalkaitse tööd, milles osalevad kahe alajaama mõõtemuundurid, s.h ühes alajaamas mittetavapärased ning teises alajaamas tavapärased mõõtemuundurid [41]. Alajaamade liiteseadmete mõõtetulemuste omavaheliseks sünkroniseerimiseks kasutati GPS-seadmeid [19];
- 3) demonstreerida erinevate tootjate poolt pakutavate distantskaitseadmete koostööd ja ristkasutust.

Sekundaarseadmetena olid rakendatud [19]

- 2tk Landis+Gyr arvesteid, täpsusklassiga 0,2;
- 2tk liini diferentsiaalkaitseadmeid MICOM P545, tootja Areva;
- 2tk distantskaitseadmeid (täpne tüüp ja tootja spetsifitseerimata).



Joonis 4.7. Osbaldwicki alajaamas üles seatud katse mittetavapäraste mõõtemuundurite katsetamiseks [44]. GIL – ingl. k. gaasisoleeritud liin.



Joonis 4.8. Osbaldwick'i alajaama installeeritud katseadmed [44], Alstom COSI-CEVT ning COSI-RECT.

Täpsemate katsetulemuste kohta Osbaldwicki alajaamas info puudub.

#### 4.1.4 Itaalia

##### Rondissone

Rondissone alajaamas on katsed läbi viidud aastal 2005 – 2006 [26] rakendades voolu mõõtmiseks lahtikäivat Rogowski voolutajurit. Rogowski voolutajuri valmistajaks on Saksa firma Schniewindt.



Rondissone alajaama nimipinge on 380 kV (teistel andmetel 400 kV) ning see on üks tähtsamaid sõlmajaamu Põhja-Itaalias. Selle tajuri paigaldamine toimus osana suuremast eksperimentist [45], mille raames uuriti, kuidas kalibreerida suurema alajaama pinge- ja voolutrafosid otse alajaamas. Rogowski tajur ei olnud selles rakenduses alajaamas mitte liini parameetrite tajur operatiivjuhtimisel, vaid kalibreeritud täppismõõteriist.

Mõõtetulemuste ülekanne, samuti toitevõimsuse andmine tajuriga koos töötavale süsteemile toimub läbi optilise toitega andmekanali (OPDL – Optically Powered Data Link) [27]. Optiliselt kantakse üle digitaalne info, mille on kvanteerinud 16-bitine analoog-digitaalmuundur, mis saab sisendi Rogowski tajuri väljundist. Võendussagedus on 32 kS/s (periood 31,25  $\mu$ s), kvanteerimisele eelnevalt läbib signaal madalpääsfiltri sagedusega 13,3 kHz.

Katsetamisele eelnevalt oli Rogowski tajurit põhjalikult uuritud ning näiteks temperatuurimõju teadasaamiseks paigaldati see temperatuurikambrisse [27]. Täpsemaks loeti temperatuuril 25°C saadud mõõtetulemusi. Temperatuuri mõju mõõtetulemustele vahemikus 5 ... 25°C jäi alla 0,05%. Samas oli Rogowski paigaldusest tulenevalt teisi olulisi vea-allikaid, mis täpsust vähendasid. Sellisteks asjaoludeks olid:

- lähedus teistele suure vooluga juhtidele, mille mõju täpsusele hinnati 0,05%-le;
- Rogowski tajuri suurim täpsus on tagatud, kui vooluga juhe on keskel ning tajur on risti juhtmega. Paigaldustäpsusest tingitud mõõtetulemuse viga hinnati 0,04%-le.

Üldiselt peeti tulemusi suhteliselt heaks, temperatuuril 15 ... 25°C oli koguviga piirides 0,08 ... 0,13%, mis võimaldab kalibreerida voolumõõtemuundureid klassiga kuni 0,2.



Joonis 4.9. Rogowski voolutajuri paigaldamine Rondissone alajaamas.

#### 4.1.5 Šveits

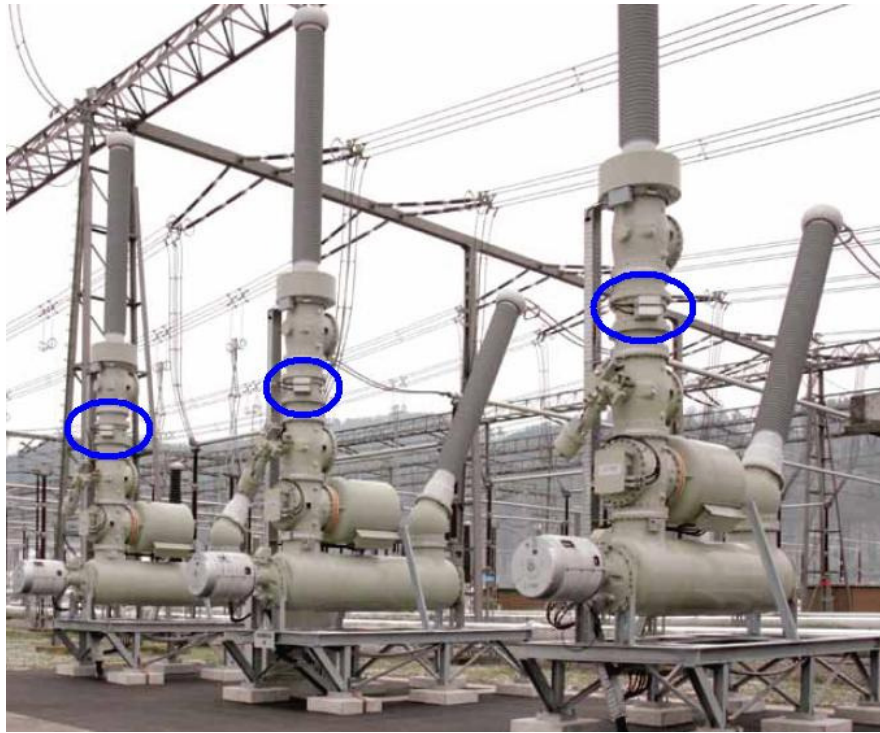
##### Laufenburg

Laufenburgi alajaamas on rakendatud katsetuseks firma ABB mittetavapärased mõõteseadmed gaasisoleeritud alajaamade tooteliinist. Alajaama nimipinge on 380 kV ning see on varustuskindluse seisukohast suhteliselt suure tähtsusega alajaam Euroopa elektrisüsteemis. Kokku oli alajaamas 17 fiidrit, millest 7 planeeriti ümber ehitada ja varustada uute seadmetega.

Projekt algas 2004.aasta veebruaris ning selle eesmärgiks oli järk-järguline alajaama uuendamine [46]. Tollel hetkel olid alajaamas töötavad seadmed paigaldatud enne 1998. aastat. Uute seadmete ülesseadmisel pidi seega olema tagatud kogu aeg nii uute kui vanade

süsteemide koostöö. Algusest peale võeti eesmärgiks rakendada alajaamas uut IEC61850 Process Bus protokolliga töötavat digitaalandmevahetust, kõigi uute seadmete, s.h mõõtemuundurite jaoks. IEC61850 puhul oli valiku kriteeriumiks ka asjaolu, et hiljem oleks võimalik rakendada erinevaid seadmeid, mis oleksid toodetud erinevate tootjate poolt. Eelnevalt oli alajaamas rakendatud samuti digitaalandmevahetus, seda varasema standardi IEC 60870-5-101 alusel töötava protokollil alusel.

ABB poolt paigaldati uute seadmetena võimsuslülitid, lahklülitid ning mõõtemuundurid ühe komplektis sektsioonina gaasisoleeritud alajaamast, moodustades hübriidse seadme (vt. Joonis 4.10).



**Joonis 4.10.** ABB toodetud sektsioon gaasisoleeritud alajaamast hübriidlahenduses õhkiolatsiooniga alajaamas, mis sisaldab võimsus- ning lahklüliteid, samuti mõõtemuundureid [21]. Sinisega on näidatud ABB ELK-CP3 kombineeritud Rogowski voolutajuri ning mahtvusliku pingejaguriga mittetavapärased mõõtemuundurid [28].



**Joonis 4.11. Laufenbergi alajaamas rakendatud ABB ELK-CP3 kombineeritud pinge- ja voolutajuri lähivaade.**

Laufenbergi alajaamas ülesseatud seadmed, lisaks mittetavapärastele mõõtemuunduritele, läbisid enne rakendamist nii tehasekatsed kui ka alajaamas rakendamise katsed. Viimaste raames

- kontrolliti primaarseadmete-vaheliste ühenduste korrektsust, mida lihtsustas IEC 61850 standardile vastavate seadmete kasutamine
- kontrollite andmevahetuse korrektset tööd alajaama eri osade vahel.

Uue tehnoloogia juurutamisega seoses on selles alajaamas raporteeritud ka kuuest väiksema tähtsusega veast [46], kuid nende mõju oli väike tänu projekti planeerimisel tehtud sammudele. Kõikide vigade lahendamiseks saadi hakkama mõistliku aja jooksul koostöös seadmete tootjatega ning alajaama omanikuga. Peale vigade likvideerimist on süsteem töötanud väga tõhusalt.

#### **4.1.6 Saksamaa**

##### **Wesel**

Wesel'i alajaama Saksamaal (süsteemioperaator RWE) on nimipingega 400 kV. Alajaama paigaldati detsembris 2003 firma Schniewindt mittetavapärased mõõtemuundurid. Mõõtemuundurid HECT/VT olid varustatud nii pinge- kui voolumõõtefunktsionaalsusega [24]. Katsete täpsemaid tulemusi avaldatud ei ole. Firma toodete profiili jälgides võib oletada, et tegemist on takistusliku pingejaguri ning Rogowski voolutajuriga mõõtemuunduriga.

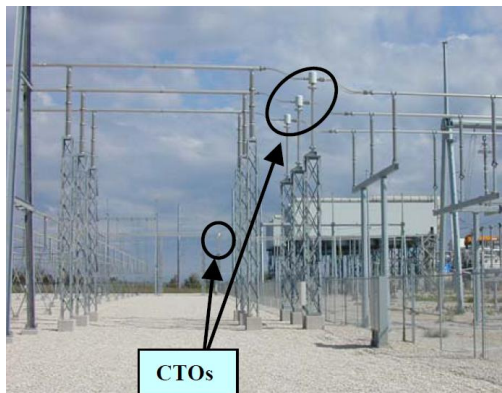


**Joonis 4.12.** Firma Schniewindt poolt toodetud HECT/VT kombineeritud mõõtemuundur (pildil paremalt teine) Saksamaal RWE Wesel'i alajaamas.

#### **4.1.7 USA**

##### **Hays**

Hays'i alajaamas USA-s on rakendatud Areva varasema tooteseeria CTO optilised pingetraford [47] [48]. Alajaama pingetase on 362 kV. Täpsem info katkest ja selle tulemustest puudub.



**Joonis 4.13.** Optilised voolumõõtemuundurid Hays'i alajaamas [47].

#### **4.1.8 India**

##### **Jambua**

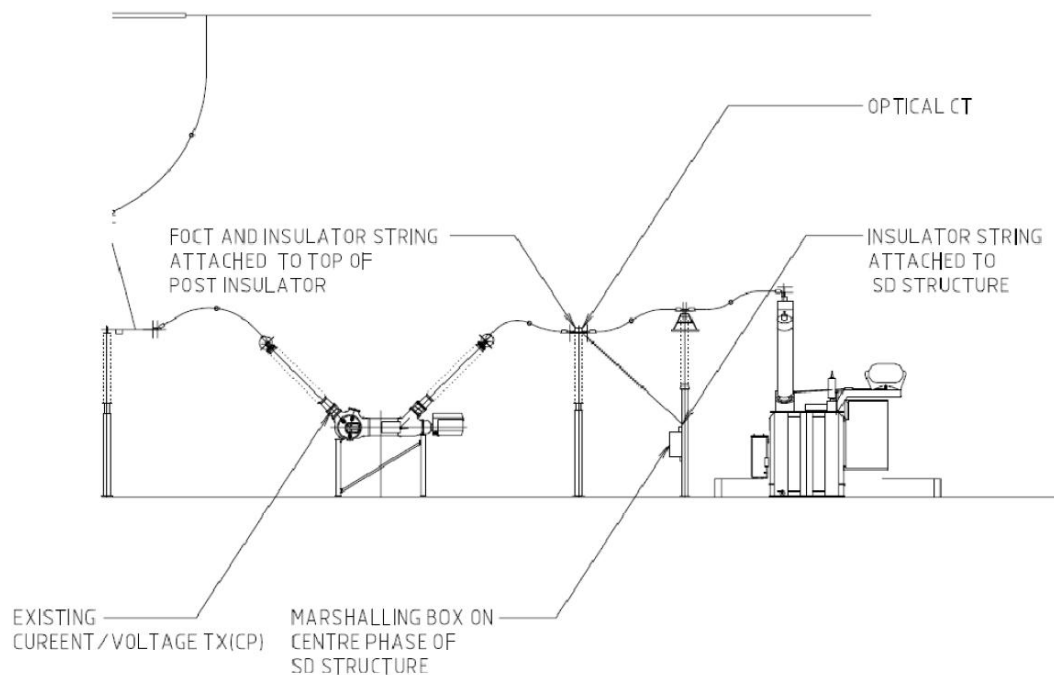
Jambua on India 220 kV ülekandevõrgu pilootalajaam, milles kasutatakse COSI-CT optilisi voolutajureid (tootja Alstom / Nxtphase). Pressiteade lepingu sõlmimisest alajaama varustamiseks antud mõõtemuunduritega ning ehitamiseks digitaalsele andmevahetusele on alles väga hiljutine (12. juuli 2012). Pressist selgub, et ümber ehitati üks lahter 220 kV alajaamast. [49] [50].

## 4.1.9 Austraalia

### Braemar

Katsesüsteem seati 2009. aastal üles Braemar'i alajaama reaktorilahtrisse, mittetavapärane mõõtesüsteem töötas seejuures paralleelselt olemasoleva releekaitsega, kuid ei juhtinud viimast [29].

Projekti eesmärgiks oli uurida mittetavapärase mõõtesüsteemi andmevahetust läbi Ethernet võrgu, rakendades IEC 61850-9-2LE standardile vastavat protokollit. Ühe mittetavapärase mõõtemuundurina rakendati ABB kombineeritud voolu- ja pingemuundurit CP, mis on tegelikult ühefaasiline gaasisoleeritud alajaamades rakendamiseks mõeldud komponent. Teiseks mittetavapäraseks mõõtemuunduriks oli firma SDO SA1T optiline voolutajur, millega oli ühendatud SD3TM tajuri signaalitöötlemine ning liiteüksus (vt. Joonis 4.14).



**Joonis 4.14. Braemar'i alajaamas üles seatud mittetavapärase mõõtemuundurite katsete skeem.**

Katsete läbiviimisel olid järgmised alamülesanded:

- katsetada kaitsesüsteemide tööd rakendades optilist voolutajurit, millel on IEC 61850 9-2LE liides (firmalt SDO);
- katsetada digitaalandmesidega optilise voolutajuri ning CP mõõtemuunduri koostööd rakendades digitaalse liidesega trafo kaitseseadet;
- katsetada tavapäraste mõõtemuundurite ning mittetavapäraste mõõtemuundurite segatööd trafo kaitsefunktsioonides;

Katsed viidi läbi eraldades uue süsteemi täielikult vanast. Selle eesmärgiks oli välistada, et uus süsteem mingil moel segaks varasema süsteemi tööd.

Ühe esimese ülesandena on katsete läbiviijad välja toonud, et tuleb kontrollida esmalt kas seadmed töötavad nii nagu ette nähtud, ilma koormuseta. Esimesena ilmnes katsetamisel ühes digitaalseadmes protokolliviga, mis seisnes ühe andmevahetuspaketi ühevälja vales väärtuses.

Korrektse andmevahetuse teostamiseks peavad kõik paketi väljad olema ettenähtud väärtusega.

Laborkatsetel ilmnis optilise voolumuunduri mürarikkus. Kuna katsetel kasutatud eksemplaril oli nimivool 2500 A, siis väikeste voolude mõõtmisel oli müra selgelt eristatav, võrreldes näiteks tavapärase magnetsüdamikuga voolutrafoga. Seevastu dünaamilistel katsetel, näiteks siirdeprotsesside mõõtmisel, oli voolutajuri väljundi vastavus tegelikule voolule väga hea ning täpsemgi kui näiteks tavapärasel voolumuunduril [29].

12-kuulise testperioodi jooksul toimus voolutajuriga ühendatud liinil 1 tõsisem sündmus, mis tõi kaasa ligi 36 kA voolu 2 perioodi jooksul. Optiline voolutajur mõõtis kirjeldatud protsessi väga täpselt. Väärtuslikuks hinnati ka kogu testajal personali poolt kogutud oskusteavet optiliste süsteemidega ümberkäimisel, s.h optiliste kaablite ja ühenduste puhtuse küsimused, ohutusküsimused, katsetsenariumid ning muud töövõtteid.

### **Loganlea**

Loganlea alajaamas on kasutusel ABB PASS-seeria seadmed. Mittetavapäraste mõõtemuundurite katsetamine toimus seal juba eelnevalt, kuid kasutuses oli ABB firmasisene andmevahetussüsteem. 2012 suveks oli see välja vahetatud IEC 61890-9-2 standardijärgse andmevahetussüsteemiga, s.h uute liiteseadmetega ning elektrooniliste releekaitseadmetega [51].



Joonis 4.15. ABB hübriidisolatsiooniga alajaamasektsioon Loganlea alajaamas. Näha on kaks kombineeritud ABB ELK-CP3 kombineeritud pinge- ning voolumõõtemuundurit. [52]

### **4.1.10 Hiina**

#### **Zhengzhou**

Zhengzhou alajaamas rakendatakse nimipinget 500 kV ning detsembris 2005 paigaldas firma Schniewindt sellesse voolumõõtemuundurid HECT [24].



Joonis 4.16. Firma Schniewindt mittetavapärased voolumõõtemuundurid Hiinas Zhengzhou alajaamas.

## 4.2 Ülekandevõrguoperaatorite kogemus

### 4.2.1 EDF/RTE

Ülekandevõrguoperaatori RTE poolt on mittetavapäraste mõõtemuundurite projektides huviks järgmised teemad [19]:

- 1) Kulutused. Mittetavapäraste mõõtemuunduritega võib kulutusi vähendada kahel suunal.
  - Ostukulud, näiteks mahtuvusliku pingejaguri ning Rogowski voolutajuriga kombineeritud mõõtemuundurid võivad osutada oluliselt odavamateks. Tootjad ennustavad, et mittetavapäraste mõõtemuunduritega on võimalik saavutada oluline kokkuhoid, eriti mis puudutab gaasisolatsiooniga alajaamu.
  - Kaudsed kulutused alajaamade alusele maale ja konstruktsioonidele, näiteks RTE on väga huvitatud kompaktestest ning kergetest seadmetest. Seepärast olid ka katsed Saumade alajaamas varajases faasis viidud läbi gaasisoleeritud alajaamade seadmetega.
- 2) Tehniline võimekus. Tavapärased mõõtemuundurid täidavad hetkel enamikke nõudeid, mis on seotud mõõtmiste, kaitsemõõtmiste ja kommertsarvestusega [19]. Kuigi mittetavapärastel mõõtemuunduritel on positiivseteks omadusteks mõõtepiirkonna suur lineaarsus ning täpsete toitevaliteedimõõtmiste läbiviimise võimalus, neid hetkel süsteemioperaator ära kasutada ei suuda [42]. Katsetega soovib RTE veenduda, et mittetavapärased lahendused töötavad sama hästi kui tavapärased [19].
- 3) Ohutus, töökindlus ja hooldus. RTE soovib testidega veenduda, et mittetavapärased lahendused on pikas plaanis vähemalt sama töökindlad ja ohutud ning piisava usaldusväärsusega. Sellest seisukohast soosib RTE tootjaid, et need arendaksid välja erinevaid töökindluse tagamise vahendeid (s.h dubleeritud tajurite rakendamine mõõtemuunduri sees jpm).

Mittetavapärased mõõtemuundurid ei tohi näidata üles suuremat hooldustööde hulka, hetkel kasutuses olevad tavapärased mõõtemuundurid on selles suhtes suhteliselt head ja vähe hooldust nõudvad.

Tootjad on teinud tööd ka paljude tavapäraste mõõtemuundurite ohutumaks muutmisega, näiteks on tehtud konstruktsioon selliseks, et näiteks sisemise lühise tekkimisel isolatsioonirikke tõttu oleksid kahjustused minimaalsed. Ohutuse poolest siiski on mittetavapärased mõõtemuundurid peajagu üle varasematest toodetest.

4) Liidestamine madalpingeliste seadmetega. Kui vähegi võimalik, üritab RTE tagada suurima paindlikkuse, et saaks rakendada erinevate tootjate poolt pakutud juhtseadmeid. Siin on oluline IEC 61850 standardi kasutamisel arendatav tootjatevaheline seadmete ristkasutus, mis garanteerib universaalse erinevate seadmete rakendamise.

RTE on üks laialdasema kogemusega süsteemioperaator, kes on mittetavapäraseid mõõtemuundureid reaalses alajaamas katsetanud. Praktiliste tulemuste seisukohast pakub kindlasti huvitavat materjali Vielmoulin'i alajaamas toimunud katsete kohta EDF-i raport „Synthèse de l'expérimentation des protections Alstom Micom P442 à Vielmoulin” 2003. aastast [40], mis võtab kokku selles alajaamas 3 aasta jooksul läbi viidud katsete tulemused.

#### 4.2.2 Powerlink

Powerlink (Austraalia süsteemioperaator) on viimastel aastatel ette võtnud laialdased katsed, millega hankida kogemusi, et liikuda puhtalt IEC 61850 standardi põhisele alajaamade sisesele infovahetusele. Üheks eemärgiks on juurutada nn. standardkomplekt, millega varustada erinevad alajaamad. Sellise standardkomplekti koostamisega ja käivitamisega on Powerlinki ühes sihiks proovida järgi turul pakutavate seadmete valmidus töötada IEC 61850 võrgus. Powerlink teeb aktiivset koostööd erinevate ülikoolide uurimisgruppidega ning osaleb rahvusvahelistes töögruppides, et omandada oskusteave IEC 61850 käsitsemisest.

Hetkel on paigaldatud vähemalt kaks töötavat mittetavapäraste mõõtemuundurite komplekti, mõlemad neist on toodetud ABB poolt (Braemad, Loganlea alajaamad). Kasutatav komplekt hõlmab sektsiooni gaasisoleeritud alajaamast, mis on rakendatud töösse õhkisolatsiooniga alajaamas.

Powerlink on aktiivselt osalenud uute tehnoloogiate juurutamisel aastast 1999 ning selle ajaga on kogutud hulgaliselt praktilist oskusteavet. Seda oa ka vaja, kuna uus andmevahetuse, s.h käskude edastusstruktuur alajaamas muutub ning vaja on senisega hoopis erinevaid teadmisi. Personalil, kes selles valdkonnas töötab on vaja - teadmisi alajaamade kaitse- ja juhtfunktsioonidest, - süsteemidest ja põhimõtetest, - teadmisi andmesidevõrkude põhimõtetest ja tööst. Firma jaoks tähendab see seniste rollide ja kohustuste ümberjaotamist ning personali täiendkoolitamist, samuti ka projekteerimisülesannetele teistsugust, tsentraliseeritud lähenemist. [53]

Mittetavapäraste mõõtemuundurite laialdasemat kasutuselevõttu eelduseks on mõningate tehniliste asjaolude lahendamine. Esmalt oleks vaja leida lahendused, mis võimaldavad trakendada segamini nii tavapäraseid kui mitte-tavapäraseid mõõtemuundureid. Teise asjaoluna on märgitud talitluse küsimused siirdeprotsesside korral ning liiteseadme (merging unit) roll sel juhul.

Olulise plussina on märgitud, et sama seadet saaks kasutada nii kaitsemõõtmiste, kommertsarvestusmõõtmiste ning toitekvaliteedi mõõtmiste läbiviimiseks [29].

Projekti käigus hinnati väärtuslikult erinevaid kogemusi töövõtete ja ohutuse kohta. Näiteks on võimsate laservalgusallikatega ohutusega seotud terve rida küsimusi. Laserkiirgus on eriti ohtlik, kui see ei satu inimese silmale nähtavasse valgusspektri ossa. Inimesed, kes teevad



selliseid allikaid rakendavate seadmete hooldus-ja paigaldustöid, peavad olema spetsiaalselt koolitatud ning omama vajalikke töövahendeid.

### **4.3 Projektijuhtimiskogemused**

#### **4.3.1 National Grid**

Suurbritannia süsteemioperaator National Grid aruannetest selgub, et 2010/2011 finantsplaanides [54] on kolme eelnevalt rakendatud mittetavapärase mõõtemuundursüsteemi pilootprojekti lõpetamine. Kõnealused 3 pilootprojekti käivitati 1990-ndate lõpul ning 2000-ndate alguses ning mittetavapärased mõõtemuundurid paigaldati alajaamadesse „varjudena”. Eesmärgiks oli saada esimesi teadmisi mittetavapärase mõõtemuundurite uute tehnoloogiate kohta. Kuna viimasel ajal on tähelepanu nendele vaibunud, on otsustatud nimetatud projektid lõpetada. Projekti lõpetamisel on plaanitud koostada raport, milles oleksid fikseeritud projektide käigus kogutud väärtuslikud teadmised. Katseobjektid demonteeritakse.

Pilootprojektide väärtuslikumate kogemuste hulka kuuluvad:

- paigalduse küsimused;
- süsteemide töö;
- süsteemide töökindlus ja stabiilsus;
- hooldusküsimused;
- tervisekaitse, ohtuse ja keskkonna küsimused;
- süsteemide degradeerumismehhanismid;
- demonteerimise ja käitlemise küsimused.

Kõik nimetatud teemad dokumenteeritakse ja antakse edasi uute strateegiatega ja põhimõtete arendamiseks.

Eelarve kogu projektide lõpetamiseks on planeeritud 2010 / 2011 aastaks 18000 GBP. Selle summa alusel võib oletada, et tegemist on peamiselt seadmete tootjate poolt toetatud projektidega, kus tootja ise sooritab enamiku vajalikest töödest oma kuludega. Projekti R&D partnerid on Alstom ja ABB.

### **4.4 Laboratoorsed sõltumatud katsed**

Mittetavapärase mõõtemuundurite laboratoorsete sõltumatute katsete läbi viimisest on tuua näiteks USAs Power Systems Engineering Research Center (PSERC) pool läbi viidud uuring, mille katsed sooritati Arizona Osariigi Ülikooli laborites [55].

Antud katsete käigus uuriti optiliste voolu- ja pingemõõtemuundurite tööd. Katsete tulemuste võrdlemiseks olid optiliste mõõtemuunduritega samadesse ahelatesse ühendatud ka tavapärased mõõtemuundurid.

#### *Katsed optilise voolumõõtemuunduriga*

Voolumõõtemuunduritega läbi viidud võrdluskatsetel oli kasutada NxtPhase NXCT-138-tüüpi voolumõõtemuundur (suurim süsteemi lubatud pinge 145 kV), mille omapära seisnes ka tema tundlikkuse muutmise viisis. Nimelt oli seda võimalik varieerida läbi kiudoptilise kaabli keerdu arvu, mis oli ümber mõõdetava juhtme, muutmisega. Magnetüsdamikuga tavapärase mõõtemuundur omas täpsusklassi 0,1, mis tegi selle väga sobivaks antud laboratoorsete katsete läbiviimiseks. Katses kasutati koormusskeemi, mis võimaldas saavutada kuni 2400 A tugevusega voolu (ülevaade katsest vt. Joonis 4.17).

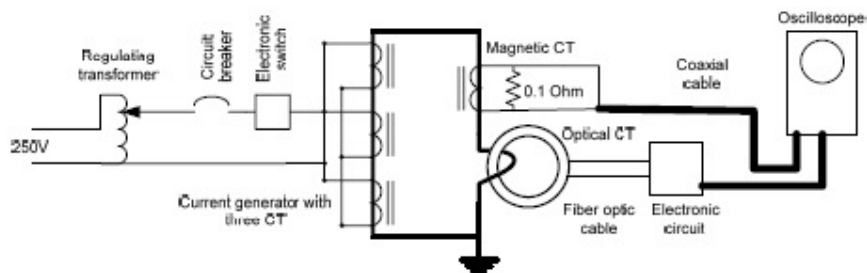
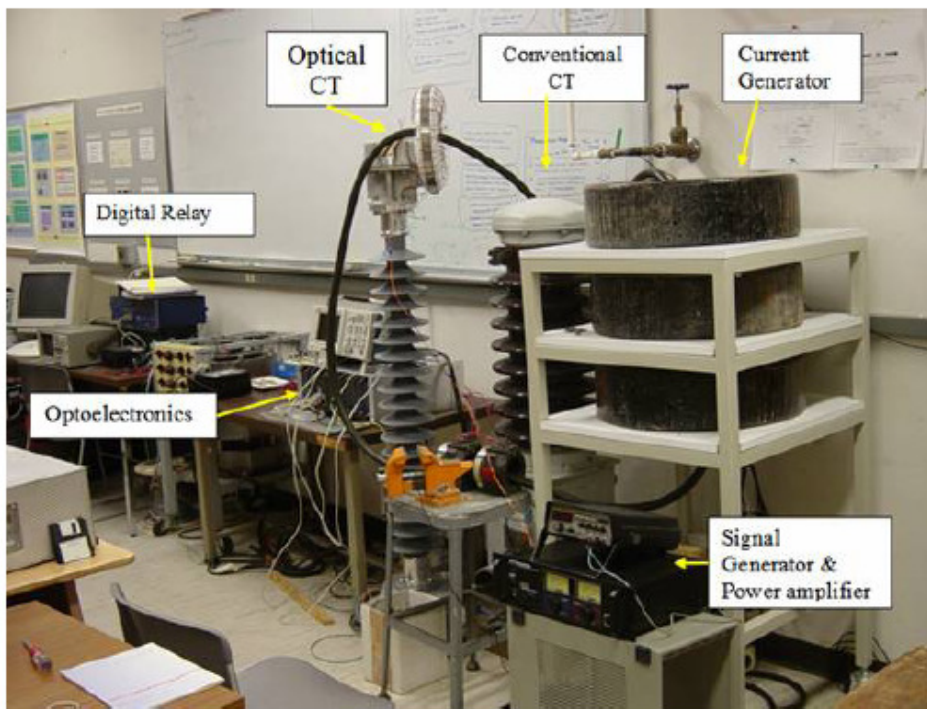


Figure 3.3 Experimental test setup connections diagram



Joonis 4.17. Ülevaade optilise voolumõõtemuunduri uurimiseks läbi viidud laboratoorsetest katsetest [55].

Üheks esimeseks katses selgunud aspektiks oli optilise voolumõõtemuunduri väljundi mürarohkus alla 5 A voolude mõõtmise korral.

Katsetel prooviti ka mõjutada mõõtetulemust erinevate väliste magnetväljade kaudu. Selleks paigaldati mõõtepea juurde, milles oli voolumõõtemuunduri tajuri tundlik osa, välise välja allikana täiendav juhe. Tuntavat välise välja mõju mõõtetulemustele ei täheldatud.

Mõõtetäpsuse katsete käigus viidi läbi erinevaid mõõtmisi voolude väärtustel 145...756 A. Katsetel kalibreeritud mõõteriistadega veenduti, et optilise mõõtemuunduri täpsus vastab tootja poolt spetsifitseeritud täpsusklass 0,2 nõuetele.

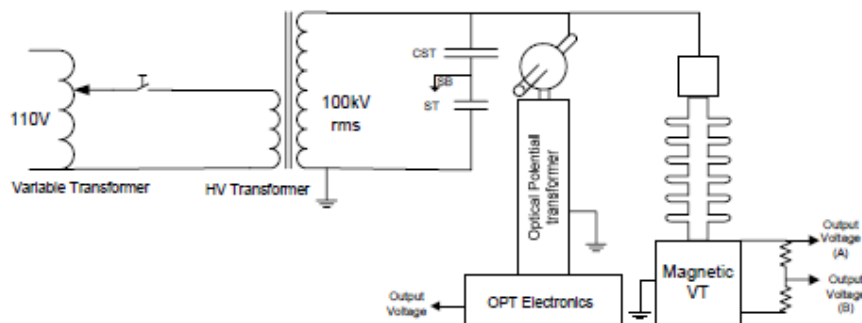
Läbi viidi ka sagedusarakteristukute uuringud. Voolumõõtemuunduri puhul varieeriti mõõdetava voolu sagedust vahemikus 60 ... 16,8 kHz. Leitud sagedusülekandekarakteristik on ühtlaselt kahanev sageduse tõustes, kuid selline ajaolu ei ole kõrgemate sagedustega komponentide või suuruste mõõtmisel suuremks probleemiks. Samuti oli faasisagedusarakteristiku trend lineaarne sõltuvalt sageduse kasvust.

Siirdeprotsesside mõõtmisel ilmnes, et suuremate lühisvoolude tippude erinevus oli tasemel 2,3% (voolutrafo vs. optiline muundur). Teistes katsetssenaariumides (esimeste kolme

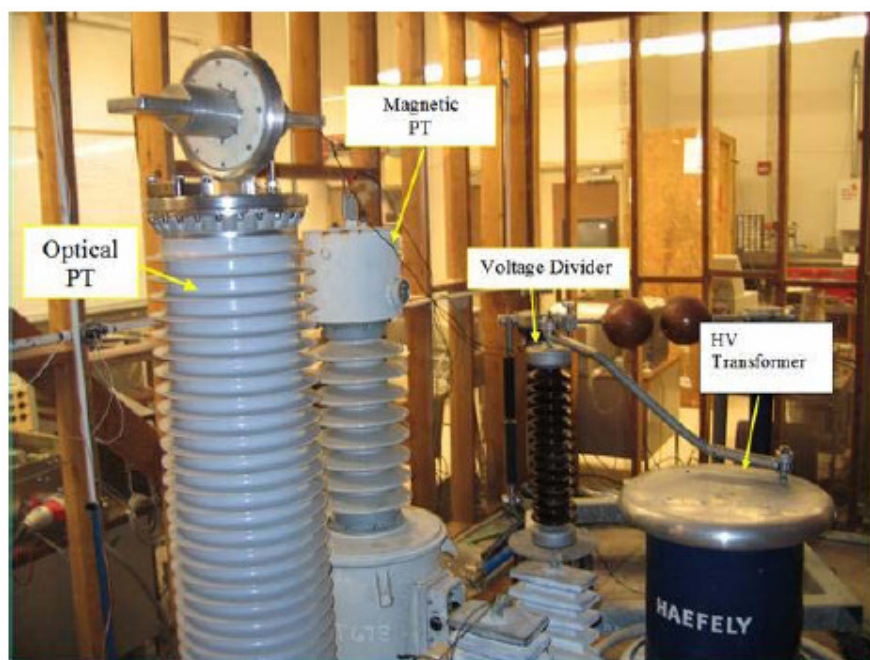
rikkevooluperioodi mõõtmine, rikkevoolu hetkväärtused) jäi samuti voolutrafo ja optilise mõõtemuunduri tulemuste vaheks kuni 2,8%.

#### *Katsed optilise pingemõõtemuunduriga*

Optilise pingemõõtemuundurina oli katsetel rakendatud NxtPhase NXVCT kombineeritud pinge- ja voolumõõtemuundur, millest kasutati vaid pingemõõtemuunduri osa. Tavapärase pingemõõtemuunduri rollis oli täpsusklassiga 0,3 pingetrafo, mille suurim lubatud pingetase oli 69 kV. Seetõttu ei olnud ka optilist pingemõõtemuundurit täies ulatuses katsetada, tavapärase pingetrafo kadus võrdlusmoment peale 60 kV pinge rakendamist, kui pingetrafo magnetsüdamik sellel pingel hakkas küllastuma.



**Figure 3.16 Connection diagram for the AC test of optical and magnetic PT**



**Figure 3.17. Experimental test setup**

**Joonis 4.18. Optilise pingemõõtemuunduriga läbi viidud katsed [55].**

Katsete käigus uuriti ka seda, kas optilise mõõtemuunduri kõrval asuva pingestatud komponendi tõttu võib muutuda ka pingemõõtemuunduri näit. Nimetatud katse kirjeldus uuringus on kummaline, viidatud on maast isoleeritud mõõtemuundurile avaldatava mõju hindamisele. Kuigi järeldatakse, et mõõtemuunduri väljund osutus sellisel viisil mõjutatavaks välise elektrivälja poolt, on selle katse kirjelduse nappuse tõttu raske veenduda selle

paikapidavuses. Märgitud on ka seda, et taolisteks lõplikeks järeldusteks oleks vaja teada ka täpseid andmeid elektrivälja kohta, mida antud juhul ei mõõdetud.

Nagu voolumõõtemuunduri puhul, ka pingemõõtemuunduriga viidi läbi katsed selle sageduskarakteristiku väljaselgitamiseks. Sageduskarakteristik on ühtlane kuni sageduseni u. 3000 Hz, peale seda hakkab ülekandetegur ühtlaselt vähenema. Selline efekt on lihtsalt korrigeeritav ning seega sobib ka katsetatud pingemõõtemuundur edukalt erinevate kõrgemate sagedustega pingete mõõtmiseks.

Erinevate pingetrafo ja optilise pingemõõtemuunduri vaheliste tulemuste erinevus jäi 1% piiridesse, analüüsitud pingevahemikku piiras oluliselt magnetsüdamikuga pingetrafo küllastumine.

Viidi läbi ka välguliigpingeimpulsikatsed, kui pingemõõtemuunduritele anti ette välguimpulsiga sarnanev pingekuju. Optiline pingemõõtemuundur suutis selle teatavate moonutustega ka mõõta ja taastada, samas kui magnetsüdamikuga pingetrafo võrreldavat tulemust üles ei näidanud.

Kokkuvõttena võib mainida, et katsed näitasid taaskord mittetavapäraste mõõtemuundurite tööd võrdluses tavapäraste mõõtemuunduritega igati heal tasemel. Läbiviidud katsed annavad ka hea pildi sellest, millised laboratoorseid katseid läbi viia ning milliseid meetodeid selleks rakendada, juhul kui ilmneb vajadus taolisi mõõtemuundureid on laboratoorselt kalibreerida või kontrollida. Katsete peamised puudujäägid olid:

- 1) katsetes viidi läbi mõõtmised vähendatud parameetritega, mis jäid alla mõõtemuundurite nimiaandmete.
- 2) katseadmed piiratud väljundiga, mis ei võimaldanud läbi proovida erinevaid mõõtestsenaariume suuremas ulatuses
- 3) võrdluseks seatud seadmed (tavapärased ja mittetavapärased mõõtemuundurid) ei omanud samu nimiparameetreid.

Seepärast on ka laboris läbiviidud katseid kirjeldatud üldiselt, tulemuseks saab kokkuvõtvalt küll öelda, et mittetavapärased ja tavapärased mõõtemuundurid annavad suhteliselt sama mõõtetulemuse.

## **4.5 Kokkuvõtte ja järeldused**

2012 aastaks on erinevaid mittetavapäraseid mõõtemuundureid katsetatud reaalsetes töötingimustes juba pikalt, s.h Alstom/NxtPhase firma toodangut juba vähemalt 10 aastat. Valminud on terve rida erinevaid aruandeid katsete kohta, seda nii seadmete tootjate kui ka süsteemioperaatorite poolelt.

Toodete poolelt tuleb kinnitada mõõtemuundurite erinevate optiliste tehnoloogiate küpsust ning näidatud häid tulemusi. Samas on vähe leida täielikke analüüse, mis avaldaksid nende kasutuselevõtu kohta küllalt detaile, s.h projektijuhtimise vigade ja õppetundide kohta. Sellist oskusteavet valdavad süsteemioperaatorid kirjeldavad küll üldiseid näpunäiteid ning kinnitavad, et neil on valdkonnas kõrge tase.

Süsteemioperaatorite poolelt tuleks välja tuua järgmised aspektid:

- 1) Mittetavapäraste mõõtemuundurite edukas kasutuselevõtt eeldab erinevaid oskusi, mis tavapäraseid mõõtemuundureid rakendavates alajaamades töötamiseks välja koolitatud tehnikutel üldiselt puuduvad. Esimesed sammud puudutavad siiski tehnoloogia ja selle eripärade tundmaõppimist, s.h töö- ja ohutusvõtete-alast koolitust jne.

- 2) Paljud pilootprojektid on rakendanud mittetavapäraseid mõõtemuunureid „varjufunktsioonis”, mis tähendab nende rakendamist dubleerivalt ning ilma vastutusrikaste kaitse- ja lülitusfunktsioonideta. Mõõtemuundurite poolt edastatud mõõtetulemus võib seejuures kasutust leida ka reaalsete releekaitsekontrollerite juures, kuid viimased sel juhul on väljundiks mitte lüliti juhtimine, vaid pigem indikatsioon tööst. Sellise esialgsete katsete läbiviimise viisi oluliseks eeliseks on järk-järgulise seadmete ülesseadmise võimalus. See annab võimaluse inseneridele ning tehnikutele oskusteabe omandamiseks ning erinevate probleemide ilmnemisel ei peata tähtsamate alajaama funktsioonide tööd. Ka Eestis esimese projekti raames, kus mittetavapäraseid mõõtemuundurid rakendatakse, on otstarbekas minna sama teed ning enne vastutusrikas sõlmes uute mõõtemuundurite rakendamist seada üles kopeeriv „vari”-süsteem.
- 3) Süsteemioperaatorid ei rakenda oma praeguste vahendite juures kõiki võimalusi, mida pakuvad mittetavapärased mõõtemuundurid. Sellisteks täiendavateks võimalusteks on näiteks toite kvaliteedimõõtmised, laiem lineaarne mõõtepiirkond, siirdeprotsesside täiendav täpne mõõtmine. Selle põhjusena võib näha ka asjaolu, et neid mõõtmisi ei saa hetkel laiemalt rakendatud tavapäraste mõõtemuunduritega kvaliteetselt sooritada. Mõõtemuundurite laiema leviku korral võivad ilmneda uued soovitud ja nõuded nii alajaamades toetatavatele mõõtmistele.
- 4) Mõõtemuundurite valik sõltub neile seatavatest ülesannetest. Hetkel on alajaamades olema tavapärased mõõtemuundurid, mis sooritavad alajaama talitluse juhtimiseks ning kommertsarvestuseks piisavad mõõtmised. Eesti tingimustes ei ole esinevad lühisvoolud sedavõrd suured, et oleks olulist ohtu näiteks paigaldatud voolutrafode sügavaks küllastumiseks.

Perspektiivseim võimalus uut tüüpi mõõtemuundurite rakendamiseks Eestis uutes ülesannetes on elektritoite kvaliteedi mõõtmised, s.h pinge- ja vooluharmonikute mõõtmised. Selleks peaks olema ka tagatud funktsionaalsus alajaamades esiteks selliste mõõtmise ülesannetes kontrollerite ning teiseks andmehõivesüsteemi läbi.

## 5. Mittetavapäraste mõõtemuundurite kasutuselevõtt – esmase projekti kavand

Antud peatükk esitab näite esmase projekti kavandist, mis oleks üheks võimaluseks liikumiseks mittetavapäraste mõõtemuundurite kasutuselevõtu suunas Eleringile kuuluvates ülekandealajaamades. Selle juures on arvesse võetud eespool toodud praktilisi näiteid ning asjaolu, et tänasel päeval spetsiifiline oskusteave mittetavapäraste mõõtemuundurite kasutuselevõtuks Eestis puudub.

### 5.1 Ettevalmistavad tööd

#### 1. Uutele mõõtemuunduritele esitatavate mõõteülesannete ning parameetrite spetsifitseerimine

Kommertsmõõtmised, s.h nimiandmed – suurim lubatav kestevpinge, nimivool, nimipinge jpt. vastavalt fiidri nimipingele ja nimivoolule.

Rikketalitluse mõõtmised, s.h ülekoormus-taluvus kriteeriumid, s.h suurim termiline taluvusvool jpt., vastavalt fiidri arvutatud lühisvooludele ning võimalikele nimipingetele.

Muud või uued mõõteülesanded, millest selguvad täiendavad nõuded, elektritoite kvaliteedi mõõtmiste läbiviimiseks on oluline töösageduriba. Et mõõta standardi IEC 61000-3-6 järgselt vajalikud parameetrid, tuleks nii pinge- kui voolumõõtmised sooritada sagedusribas 50 Hz kuni 50. või ka 100. kõrgema harmoonilise sageduseni, s.o 2500 või 5000 Hz. Sellises sagedusribas täpseid mõõtmisi sooritava mõõtemuunduri sagedusriba peaks ulatuma vähemalt kahekordse maksimaalse sageduseni, s.o 10000 Hz-ni.

#### 2. Mõõtemuundurite valik ja hankimine

Turu-uuring – nõutele vastavate, turul saadaolevate mõõtemuundurite kaardistamine ning hinnapäringud.

Hanke läbiviimine – väljavalitud tüüpi mõõtemuundurite ost.

#### 3. Andmevahetus- ja andmehõivesüsteemi spetsifitseerimine

Andmevahetussüsteemi tüüp – soovitatav on rakendada andmevahetuseks IEC 61850 standardi põhiseid süsteeme, kuid sel juhul tuleb spetsifitseerida ka liiteseadmed ning mõõtemuundurite ühendused nendega.

Põhlised rakendatavad juht- ning mõõteseadmed – arvestid, releekaitsekontrollerid, rikkesalvestid jpt., mis mittetavapärastelt mõõtemuundurilt saadud mõõtetulemusi oma töös rakendavad.

#### 4. Koolituskava planeerimine

Inseneride väljaõpe – vastavalt mõõtemuundurite tüübile ning andmevahetussüsteemi ülesehitusele, seadmete häälestamise ning käidu-alane koolitus.

Tehnikute väljaõpe – vastavalt valitud mõõtemuundurite eripäradele töövõtete kasutamisest mõõtemuunduri paigaldamisel, käidul ja hooldusel. Optiliste voolumõõtemuundurite korral on vajalik ka lasertehnika ohutustehnika koolitus, samuti eriotstarbeliste kiudoptiliste kaablite ning nendega teostatavate tööde koolitused.

### 5.2 Laboratoorsed katsed

#### 1. Mõõtesüsteemi esmane koostamine –

Abiseadmete spetsifitseerimine ning varustamine – katsete läbiviimiseks laboritingimustes on soovitatav komplekteerida mõõtemuundur abiseadmetega, mis võimaldavad lõpp-paigaldises kasutatavaga sarnast ühendamist.

Mõõtesüsteemi üles seadmine – seadmete ühendamine, mõõtemuunduri ettevalmistamine katseskeemis. Vajadusel mõõtemuunduri ülesseadmine koostöös tootjaga. Sellise ülesseadmise käigus saavad esmase paigalduskoolituse ka tehnikud ning insenerid.

## 2. Esmaste mõõtmiste läbiviimine laboritingimustes

Ühenduste ja seadmete kontroll – kontrollitakse, kas erinevad seadmete omavahelised ühendused töötavad nõuetekohaselt ning kas kõik seadmed abiseadmed töötavad nõuetekohaselt.

Mõõtepiirkonna kontroll ning parameetritele vastavus – katsete läbiviimisel rakendatakse mõõtemuundurile järk-järgult kõrgem pinget ja/või suurem vool, millega veendutakse mõõtemuunduri töös spetsifitseeritud piirkonnas.

## 3. Täpsuskontrollimõõtmised

Pikaajaline stabiilsus – pikema ajaperioodi jooksul katsete läbiviimine, kas sama või erineva väärtusega suuruse (pinge, vool) tagamisega mõõtemuundurile.

Täpsuskontroll – läbi viiakse võrdlus mõõtemuunduri mõõtetulemuste ning kalibreeritud mõõteriistade mõõtetulemuste vahel ning selgitatakse mõõtemuunduri absoluutne täpsusklass.

Elektromagnetilise ühilduvuse mõõtmised – nende mõõtmiste eesmärgiks on kontrollida, kuidas mõjuvad välised või kõrvalised väljad mõõtemuunduri poolt väljastatavatele mõõtetulemustele ning samuti kuidas vajaduse korral neid mõjusid vähendada.

## 5.3 Paigaldus alajaamas

### 1. Alajaama valik ja ettevalmistused

Alajaama valimine – Eesmärk on leida alajaam, kus uut tüüpi mõõtemuundurite pakutavad lisavõimalused olulisemini välja tuleksid. Näiteks elektritoite kvaliteedi mõõtmise stsenaariumi arvestades on sobilik alajaam, milles on oodatult kõrgem mittelineaarmoonutuse tase.

Ettevalmistavad tööd – vastavalt valitud mõõtemuunduri tüübile ning selle mehhaanilistele parameetritele vajalike tarindite ning vundamentide ehitamine.

### 2. Seadmete valik ja ülesseadmine

Mõõtemuundurite paigaldus – mõõtemuundurid paigaldatakse selleks ette valmistatud tarinditele. Primaarühendused fiirdiga ühendatakse sekundaarpaigaldise valmimise järel, kuna esimese sekundaarpaigaldise valmimine võib võtta rohkem aega ning seda tuleb teha ohutustingimusi täites.

Abitoiteahelate paigaldus – mittetavapärastele mõõtemuunduritele on vajalik tagada toitevõimsuse saadavus.

Andmevahetus- ning andmehõiveüsteemide paigaldus – liiteseadmete, andmesidekaablite, võrgukommutaatorite ning muude vajalike seadmete paigaldus ja käivitamine. Lisaks ka mõõtetulemusi rakendavate ja salvestavate seadmete ülesseadmine ja käivitamine.

### 3. Personali koolitus

Inseneride ja tehnikute koolitus - rakendatud mõõtemuundurite, abiseadmete ja andmekasutatavatele andmevahetuskanalite erikoolitus, mille tulemuseks oleks meeskonna valmisolek süsteemi esmaseks käivitamiseks ning sellele järgnevate katsete läbiviimine.

## 5.4 Käivitamine ning katsetamine

### 1. Esmased töökatsed ning

Süsteemi rakendamise kontroll – kontrollitakse, kas seadmed on üles seatud korrektselt vastavalt skeemile ning kas seadmetevahelised ühendused töötavad ja võimaldavad andmeid vahetada korrektselt.

Seadmete esmane käivitamine ning häälestamine – uute mõõtemuundurite katsetamisega seotud alajaama seadmete käivitamine ning nende tööparameeride häälestamine.

### 2. Mõõtemuunduri pingestamine

Mõõtemuunduri ülesseadmise kontroll – kontrollitakse, kas mõõtemuunduri primaarühendused on teostatud korrektselt.

Mõõtemuunduri primaarühenduste pingestamine – muunduri esimene rakendamine kõrgele pingele. Veendutakse, et mõõtemuundur töötab ning primaarmuunduri mõõtetulemus on lähedane mittetavapäraste mõõtemuundurite poolt edastatud mõõtetulemustega.

### 3. Katsete stsenaariumid

Fiidri koormamine väikese vooluga – nii tavapäraste kui ka mittetavapäraste mõõtemuundurite puhul on väga väikeste voolu suuruste mõõtmine tihti probleemiks, mittetavapärastel mõõtemuunduritel avaldub see tihti mürana. Väikese voolu mõõtmise võime suure nimivooluga mõõtemuunduriga võib osutada üheks kasulikuks aspektiks, milleks mittetavapärasteid mõõtemuundureid saab rakendada.

Fiidri koormamine keskmise talitlusvooluga – tavapäraste ja mittetavapäraste mõõtemuundurite mõõtetulemuste ja mõõtetäpsuse võrdlemiseks sobib kõige paremini keskmise talitlusvooluga (suurusjärg sadades amprites) koormamine.

Siirdeprotsesside registreerimine – lülitusprotsesside, erinevate rikete korral saab registreerida siirdeprotsessid, s.h liigpinged ning rikkevoolud. Digitaalsete sündmuste salvestitega saab võrrelda rikketalitlussuuruste mõõtetulemusi nii tavapäraste kui mittetavapäraste mõõtemuundurite korral.

## 5.5 Katseandmete kogumine ning süsteemi valideerimine

### 1. Pikaajalised katsed

Kommertsarvestusmõõtmised – kommertsarvestusmõõtmiste kohta saab täpsemat statistikat teha pikema aja jooksul ning seda tuleks kindlasti võrrelda tavapäraste mõõtemuundurite poolt saadud tulemustega. Olulised erinevused võivad esineda, kui mõõdetakse näiteks väikeseid voolutugevusi.

Stabiilsus – stabiilsuskatsed tähendavad pika aja jooksul mõõtemuunduri väljundi jälgimist ning võrdlemist tavapärase täpse mõõtemuunduri mõõtetulemustega. Oodatavalt peaksid mõlemad muundurid olema stabiilsed pikema aja jooksul, kuid võib esineda ka varieeruvust keskkonnatingimuste tõttu, s.h temperatuurimõjutuste tõttu.



Töökindlus – pikaajalike töökindlus ning rikete puudumine annavad selge märgi, et süsteem on sobilik tööks vastutusrikastes sõlmedes. Samuti võimaldab pikem katsete läbiviimise aeg välja töötada meetodid uute mõõtemuundurite remondiks ning hoolduseks, samuti saada ülevaade hooldustöodes vajalikust ressursist.

Tegelike kulude analüüs – tegelike kulude analüüs võimaldab ülevaadet uute mõõtemuundurite tehnoloogiate rakendamisega seotud kulutustest ning edasiste projektide planeerimiseks anda sisendi. Samuti on oluline aspekt tasuvusanalüüs võrreldes tavapäraste mõõtemuunduritega.

## Kasutatud kirjandus

- 1 - EVS 758:2009. Metroloogia. Terminid ja määratlused; Eesti Standardikeskus 2009.
- 2 - EVS-EN 61869-1:2009. Mõõtetrafod. Osa 1: Üldnõuded. Eesti Standardikeskus 2009.
- 3 - C57.13-2008 - IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers. Versiooni kuupäev 29 Juuli 2008. ISBN 978-0-7381-5411-4.
- 4 - CNC-CIGRE. CIGRÉ SC A3 - High-Voltage Equipment. Status Report 2011. <http://www.cigre-canada.org/upload/file/CNC%20Report%20SC%20A3-2011.pdf> (alla laetud 20.11.2012).
- 5 - 1601-2010 - IEEE Trial-Use Standard for Optical AC Current and Voltage Sensing Systems. Versiooni kuupäev 13 detsember 2010. ISBN 978-0-7381-6359-8.
- 6 - UCA® International Users Group, <http://www.ucaiug.org>
- 7 - Implementation Guideline for Digital Interface to Instrument Transformers using IEC 61850-9-2, UCA® International Users Group, [http://iec61850.ucaiug.org/implementation%20guidelines/digif\\_spec\\_9-2le\\_r2-1\\_040707-cb.pdf](http://iec61850.ucaiug.org/implementation%20guidelines/digif_spec_9-2le_r2-1_040707-cb.pdf) (alla laetud 20.11.2012).
- 8 - State of the Art of Instrument Transformers, CIGRE Study Committee A3 report, 2009; ISBN: 978-2-85873-081-0.
- 9 - EVS-EN 60044-2:2002+A2:2003, Mõõtetrafod. Osa 2: Induktiivpingetrafod. Eesti Standardikeskus 2003.
- 10 - C37.114-2004 - IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines. Versiooni kuupäev 20 juuni 2005. ISBN: 0-7381-4653-6-.
- 12 - Horak, J., Hrabliuk, J., Current Transformer Errors and Transformer Inrush as Measured by Magnetic, Optical and Other Unconventional CTs. [http://www.idc-online.com/technical\\_references/pdfs/electrical\\_engineering/Current\\_Transformer\\_Errors\\_and\\_Transformer\\_Inrush.pdf](http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/Current_Transformer_Errors_and_Transformer_Inrush.pdf) (alla laetud 20.11.2012).
- 13 - Resistive Capacitive Voltage Transformers For Power Quality Applications, Versioon 03 2012. Trench Group infobrosüür. <http://www.trenchgroup.com/en/content/download/1382/11376/file/AC%20Voltage%20Divider.pdf>
- 14 - IEC/TR 61000-3-6: 2008. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems. International Electrotechnical Commission Technical Report.
- 15 - FÜCHSLE, D., STANEK, M., Experiences with Non-Conventional Instrument Transformers (NCITs). CGG CIGRE, 2009.
- 16 - SCHLEMPER, H.-D., FÜCHSLE D., RAMM G., WIDMERTEST J., APPLICATION OF NON-CONVENTIONAL MULTI-PURPOSE VOLTAGE AND CURRENT TRANSDUCERS. CIGRÉ Session 2004, paper A3-108.
- 17 - ABB SpA Power Products. SF6 Instrument Transformers. ABB esitlusmaterjal. [http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/e2fce9d4975ed458c1257a9b004bbe86/\\$file/SF6%20instrument%20transformers%20presentation\\_base.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/e2fce9d4975ed458c1257a9b004bbe86/$file/SF6%20instrument%20transformers%20presentation_base.pdf) (alla laetud 20.11.2012)
- 18 - EVS-EN 60044-1:2002+A2:2003. Mõõtetrafod. Osa 1: Voolutrafod. Eesti Standardikeskus 2003.
- 19 - CHATREFOU, D., PONCHON, P., DUPLAN, D., OSBOURNE, M., PILOT APPLICATION WITH NON CONVENTIONAL INSTRUMENT TRANSFORMERS AND DIGITAL PROTECTIONS USING IEC PROTOCOL FOR COMMUNICATION. CIGRE session 2006, paper B3-203.
- 20 - NCIT Solutions. Alstom tootetutvustus. <http://www.alstom.com/Global/Grid/Resources/Documents/Automation/TNS/NCIT%20Brochure%20GB.pdf> (alla laetud 20.11.2012).

- 21 - Advanced GIS substations with IEC 61850-9-2LE process bus | Non-conventional instrument transformers. ABB infomaterjal. [http://www02.abb.com/global/gad/gad02181.nsf/0/972b57391b2140d0c1257a620046043b/\\$file/Non-conventional+instrument+transformers+-+Advanced+GIS+substations+with+IEC+61850-9-2+LE+process+bus.pdf](http://www02.abb.com/global/gad/gad02181.nsf/0/972b57391b2140d0c1257a620046043b/$file/Non-conventional+instrument+transformers+-+Advanced+GIS+substations+with+IEC+61850-9-2+LE+process+bus.pdf) (alla laetud 20.11.2012).
- 22 - HVDC Divider Compensated voltage divider for HVDC transmission systems. Trench Group infobrosüür. <http://www.trenchgroup.com/en/content/download/1342/11179/file/DC%20Voltage%20Divider.pdf> (alla laetud 20.11.2012).
- 23 - Minkner, R., Development Trends in Medium- and High Voltage Technologies for Measuring Systems, Filters and Bushings. 2005 IEEE Russia Power Tech, St. Petersburg. ISBN 978-5-93208-034-4, lk. 1 - 8.
- 24 - Hybrid Electronic Instrument Transformer with Optical-Digital Data Transfer. Schniewindt esitlusmaterjal. <http://www.schniewindt.cn/uploadfiles/200762123582339026.pdf> (alla laetud 20.11.2012).
- 25 - Shepard, D.E.; Yauch, D.W.; An overview of Rogowski coil current sensing technology; LEM DynAmp Inc.; available from [http://www.dynamp.com/dynamp/LDADocum.nsf/c2270fbdd892ac3e86256e75000ad88a/e710af6d3e0f6255862565d7004b19db/\\$FILE/Report.pdf](http://www.dynamp.com/dynamp/LDADocum.nsf/c2270fbdd892ac3e86256e75000ad88a/e710af6d3e0f6255862565d7004b19db/$FILE/Report.pdf) (alla laetud 20.11.2012).
- 26 - CHERBAUCICH, C.; MAZZA, P.; KULJACA, N.; DE DONA, G.; WEISS, S.; BRAND, U.; A NEW TOOL FOR LIVE, ON-SITE, HV INSTRUMENT TRANSFORMERS ACCURACY CHECK; 19th International Conference and Exhibition on Electricity distribution CIRED, Viin 2007.
- 27 - MAZZA, P.; KULJACA, N.; CROTTI, G.; SARDI, A.; BRAND, U.; GIRAUD, M.; ANDERSSON, A.; WEISS, S.; ON-SITE LIVE VERIFICATION OF HV INSTRUMENT TRANSFORMER ACCURACY; CIGRE session 2006, paper A3-204.
- 28 - Sekundärleittechnik. Neues aus den Gebiet der Schutz-und Stationsleittechnik; ABB esitlusmaterjal; [http://www05.abb.com/global/scot/scot320.nsf/veritydisplay/ba65ac55a25f2c97c12578a4005cac86/\\$file/Pra\\_0806-1430-Schutz-Stationsleittechnik\\_110523\\_ci\\_v1.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot320.nsf/veritydisplay/ba65ac55a25f2c97c12578a4005cac86/$file/Pra_0806-1430-Schutz-Stationsleittechnik_110523_ci_v1.pdf) (alla laetud 20.11.2012).
- 29 - Schaub, P.; Haywood, J.; Ingram, D.; Kenwick, A.; Dusha, G.; Test and Evaluation of Non Conventional Instrument Transformers and Sampled Value Process Bus on Powerlink's Transmission Network; CIGRE Australia Panel B5 SEAPAC 2009, paper 34.
- 30 - Kirkam, H.; OPTICAL CURRENT TRANSDUCERS FOR POWER SYSTEMS: A REVIEW; NASA 1993; <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/35760/1/93-1486.pdf> (alla laetud 20.11.2012).
- 31 - Bohnert, K.; Gabus, P.; Brändle, H.; Fiber-Optic Current and Voltage Sensors for High-Voltage Substations; 16th International Conference on Optical Fiber Sensors, Nara 2003; lk. 752-754.
- 32 - ABB SpA Power Products. SF6 Instrument Transformers; ABB esitlusmaterjal; [http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/e2fce9d4975ed458c1257a9b004bbe86/\\$file/SF6%20instrument%20transformers%20presentation\\_base.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/e2fce9d4975ed458c1257a9b004bbe86/$file/SF6%20instrument%20transformers%20presentation_base.pdf) (alla laetud 20.11.2012).
- 33 - NXVT Optical Voltage Sensor; NxtPhase tooteinfomaterjal; <http://nxtphaseinc.com/pdfs/NXVT.pdf> (alla laetud 20.11.2012).
- 34 - Measuring Instruments; Esitlusmaterjal; [http://www.sari-energy.org/PageFiles/What\\_We\\_Do/activities/HVDC\\_Training/Presentations/Day\\_3/2.MEASURING\\_INSTRUMENTS.pdf](http://www.sari-energy.org/PageFiles/What_We_Do/activities/HVDC_Training/Presentations/Day_3/2.MEASURING_INSTRUMENTS.pdf) (alla laetud 20.11.2012).
- 35 - Lellys, D.; Schmitt, M.; Alves do Carmo, U.; Process bus (Merging Unit): Conceito, arquitetura e impacto na automacao de subestacões; Labplan 2007, Brasilia; [http://www02.abb.com/global/gad/gad02465.nsf/59bddcf5e4536d06c125778c0028fa3c/0bccb6b99be39eda83257a8b0056716c/\\$FILE/Process+Bus.pdf](http://www02.abb.com/global/gad/gad02465.nsf/59bddcf5e4536d06c125778c0028fa3c/0bccb6b99be39eda83257a8b0056716c/$FILE/Process+Bus.pdf) (alla laetud 20.11.2012).

- 36 - Langford, E.; Swindlehurst, J.; Optical Current & Voltage Sensors; NxtPhase esitlusmaterjal; IESO Kanada 2007; [http://www.ieso.ca/imowebpub/200705/rm\\_pres-20070307-Ontario-IESO-Pres.pdf](http://www.ieso.ca/imowebpub/200705/rm_pres-20070307-Ontario-IESO-Pres.pdf) (alla laetud 20.11.2012).
- 37 - IEC 61850 Implementation experiences worldwide; International Conference IEC 61850 – The Future of Substation Protection and Automation, Rio de Janeiro 2005.
- 39 - POPIEL, L.; LEMAITRE, F.; TANTIN, P.; MOREAU, C.; CHATREFOU, D.; DUPRAZ, J.P.; MIRONNEAU, J.F.; WERNER-ERICHSEN, O.; PERNOT, J.; FIELD EXPERIMENTATION IN HV SUBSTATION OF NON CONVENTIONAL CURRENT TRANSFORMERS AND NUMERICAL PROTECTION DEVICE LINK BY A POINT TO POINT DIGITAL COMMUNICATION; Cigre session 2002, paper 34-210.
- 40 - <http://wenku.baidu.com/view/c12a120303d8ce2f006623a1.html> (alla laetud 20.11.2012).
- 41 - Tholomier D.; Chatrefou, D.; IEC 61850 Process Bus - It is Real; PAC WINTER 2008; lk 48-53.
- 42 - DUPLAN, D.; EXPERIMENTATION NCIT DANS LE POSTE RTE 225 KV DE SAUMADE. MatPost' 07, Lyon 2007.
- 43 - RAHMATIAN, F.; POLOVICK, G.; HUGHES, B; ARESTEANU, V.; FIELD EXPERIENCE WITH HIGH-VOLTAGE COMBINED OPTICAL VOLTAGE AND CURRENT TRANSDUCERS; Cigre sessions 2004, paper A3-111.
- 44 - Process Bus. Experience and Future Direction; Areva esitlusmaterjal; <http://wenku.baidu.com/view/49e0ea3767ec102de2bd89ba.html> (alla laetud 20.11.2012).
- 45 - De Donà, G.; Mazza, P.; Kuljaca, N.; Crotti, G.; Sardi, A.; Weiss, S.; Live Installation of HV Equipment for Instrument Transformers Accuracy Check
- 46 - LAEDERACH, S.; BAASS, W.; BRAND, K.P.; REINHARDT, P.; EXPERIENCE WITH IEC 61850 IN THE REFURBISHMENT OF AN IMPORTANT EUROPEAN 380 KV SUBSTATION; Cigre sessions 2006, paper B5-109.
- 47 - Chatrefou D.; Dupraz J.P.; Instruments de Mesure Non Conventionnels dans les Postes à Haute Tension; Matpost 2003, Lyon, Prantsusmaa.
- 48 - Chatrefou D.; Dupraz J.P.; Montillet, G.F.; Interoperability Between Non Conventional Instrument Transformers (NCIT) And Intelligent Electronic Devices (IDE)
- 49 - Alstom T&D India commissions India's first digital solution for substation in Guajat; Alsom pressiteade 12. juulil 2012.
- 50 - Alstom commissions 220kV digital substation in India; <http://utilitiesnetwork.energy-business-review.com/news/alstom-commissions-220kv-digital-substation-in-india-130712> (alla laetud 20.11.2012)
- 51 - ABB achieves another milestone in smart substation automation; ABB pressiteade; [http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/5201948f3dc6ca8dc1257a1c002f754f/\\$file/ABB+achieves+another+milestone+in+smart+substation+automation.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/5201948f3dc6ca8dc1257a1c002f754f/$file/ABB+achieves+another+milestone+in+smart+substation+automation.pdf) (alla laetud 20.11.2012).
- 52 -- Powerlink Aupic  
[http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/c71c66c1f02e6575c125711f004660e6/457783ff424c3356c1257a1c003ea51f/\\$FILE/PowerlinkAUpic2.jpg](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/c71c66c1f02e6575c125711f004660e6/457783ff424c3356c1257a1c003ea51f/$FILE/PowerlinkAUpic2.jpg)
- 53 - Schaub, P.; Kenwrick, A.; Australia Leads With Process Bus, <http://tdworld.com/go-grid-optimization/transmission/powerlink-queensland-process-bus-050112/>
- 54 - Innovation Funding Incentive; Electricity Transmission R&D Programme Detailed Reports; Annual Report 2010/11; NationalGrid, Suurbritannia.
- 55 - Karady, G.G.; Kucuksari, S.; Ma, Y.; Performance Assessment of Advanced Digital Measurement and Protection Systems; Final Project Report Part I; Power Systems Engineering Research Center, Arizona State University, 2006.