

# Laimõõtmised

Mati Meldorf  
Jako Kilter

1	Sissejuhatus	2
2	Sünkroniseeritud faasimõõtmised	2
2.1	Faasimõõtmiste põhimõtted	2
2.2	Faasimõõtmiste probleemid	3
2.3	Faasimõõturid ja kontsentraatorid	5
3	Laiseiresüsteem	7
3.1	Laiseiresüsteemi rakendused	7
3.2	Laiseiresüsteemide näiteid	11
4	Laijuhtimissüsteem	12
5	Laimõõtmised Eestis	15
	Lühendid	18
	Mõisted	19
	Kirjandus	20

# 1 Sissejuhatus

Elektrisüsteemi talitluse seire ja juhtimine on seni toimunud põhiliselt dispetšisüsteemi (SCADA) andmete alusel, diskreetimissammuga 10...20 s ja enam. Kuna protsessid elektrisüsteemis kulgevad kiiresti, oleks vaja mõõtmisi mõnekümne millisekundilise sammuga. Tõsi, kasutusel on rikkemeerikud, mis registreerivad ja talletavad talitlusparameetrite väärtusi mingi teatud häiringu korral piisava sagedusega, kuid need on lokaalse iseloomuga. Protsesside jälgimiseks ja juhtimiseks ühendalektrisüsteemis oleks vajalikud kooskõlastatud mõõtmisi vähemalt süsteemi teatud regiooni ulatuses.

Viimasel aastakümnel on maailmas hakanud levima sünkroniseeritud faasimõõteseadmed (*time synchronised phasor measurement unit, PMU*), mis mõõdavad pingeid ja voole elektrivõrgus sagedusega 10 kHz suurusjärgus. Faasimõõtmised varustatakse ajamärgenditega ja edastatakse tavaliste andmesidekanalite kaudu kontsentratoritesse, mis elektrivõrgu eri paikadest saabunud andmed kooskõlastavad. Täpne mõõteaeg saadakse globaalse positsioneerimissüsteemi (*global positioning system, GPS*) satelliitide kaudu saabuivate ajasignaalide abil. Faasimõõteseadmeid ei vajata elektrisüsteemis tingimata palju, eesmärgist olenevalt vaid mõni kuni mõnikümmend.

Sünkroniseeritud faasimõõtmisi võib rakendada elektrisüsteemi talitluse laiseiresüsteemi (*wide area monitoring system, WAMS*) moodustamiseks. Jälgitakse ennekõike talitlusparameetreid, mis iseloomustavad elektrisüsteemi pingestabiilsust ja elektriliinide ülekuumemist. Oluline on elektriülekanalide (*power corridors*) talitluse seire, kus märgatavaid võimsusi kantakse pikkade vahemaade taha. Üks esimesi laiseiresüsteeme toimibki juba kümme aastat elektri ülekanade jälgimisel USA läänerannikul. Huvi laiseire vastu on eriti tõusnud viimastel aastatel toimunud suurte süsteemiavariide tõttu Põhja-Ameerikas ja Euroopas. Laiseiresüsteemi võib vaadelda kui intelligentset alarmiprotsessorit (*intelligent alarm processor*) ning efektiivset vahendit otsustuste tegemiseks (*enhanced decision tool*).

Laimõõtmiste edasiarenemisel saab võimalikuks laijuhtimissüsteemide (*wide area control systems, WACS*) loomine, mis toimivad automaatselt elektrisüsteemi ülekanade võime tõstmiseks ja stabiilsuse säilitamiseks. Ohtliku olukorra tekkimisel võib juhtida näiteks generaatorite ergutust elektrisüsteemi stabilisaatorite (*power system stabilizer, PSS*) abil, võib sättida türistorjuhitavaid kompenseerimisseadmeid (*flexible ac transmission systems, FACTS*) ning teha vajalikke lülitusi. Teisisõnu, tegemist oleks elektrisüsteemi laikaitsega (*wide area protection, WAP*). Automaatselt võib reguleerida ka elektrisüsteemi püsitalitlust hoides ära avariiotlike olukordade tekkimise. Kuna laijuhtimissüsteemi tehnika võimaldaks ka laiseiret, siis neid süsteeme ühendades moodustub laiseire- ja juhtimissüsteem (*wide area monitoring and control system, WAMC*).

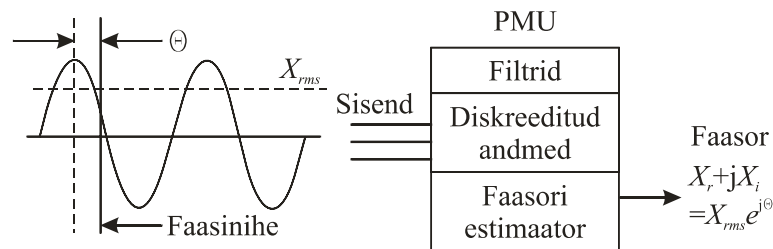
Kokku võttes võimaldavad laimõõtmised paremini ära kasutada elektriülekanade võimalusi ja ära hoida või piirata ülesüsteemilisi avariisid, suurendades seega elektrivarustuse töökindlust. Kuna laimõõtekohti on elektrisüsteemis esialgu ja ka lähemas tulevikus suhteliselt vähe, on vajalik traditsiooniliste SCADA-andmete (*slow-scan data*) ja WAMS-andmete (*high sample rate data*) sihipärane kombineerimine.

## 2 Sünkroniseeritud faasimõõtmised

### 2.1 Faasimõõtmiste põhimõtted

Faasimõõtmised tuginevad voolu ja pingele väärtuste mõõtmisele sagedusega näiteks 128 valimit põhisageduse ühe perioodi kohta (6400 Hz). Esmaste mõõteväärtuste alusel estimateeritakse voolu ja pingele faasid ning sagedus. Tulemuste täpsus võib olla suur, näiteks: pinge 0,2%, vool 0,5%, sagedus  $\pm 5$  mHz, nurk  $\pm 0,1^\circ$ .

Faasimõõduri (*PMU*) toimimispõhimõte on joonisel 2.1. Mõõdetakse kolmefaasilise süsteemi pingeid ja voole, millest estimeeritakse ajamärgendile vastav põhisageduse faasor. *PMU* väljastab faasori rist- või polaarkoordinaadistikus. Lisaks ka sagedus ja selle muutumiskiirus. Lokaalseks kasutamiseks võidakse mõõta (estimeerida) harmoonikuid, vastu- ja nulljärgnevuskomponente ja muid suurusi.



**Joonis 2.1 Faasimõõduri toimimispõhimõte**

Faasorite leidmine on seotud mõõtmiste ajahetkega, mis määratletakse *GPS* abil mikrosekundilise täpsusega. Andmed salvestatakse lokaalselt ringpuhvrisse (*circular buffer*), mis sisaldab näiteks 24 tunni andmeid. Pikemaajaliselt võidakse andmeid mõningal määral agregeerituna säilitada näiteks 30 päeva.

Mõõtesüsteemi põhinõudeks on, et kõik faasimõõtmised oleksid kooskõlas. Analoogseadmete erinevad filtreerimisviisid on üheks mittesobivuse põhjustajaks. Digitaal tehnoloogia võimaldab seda puudust leevendada, kuid paljud üksikasjad on seni lahendamata. Tavalised mõõtetrafod ja analoogsidekanalid võivad põhjustada viidet kuni 400 ms. Faasimõõdurite viga võib ulatuda  $\pm 15$  kraadini ja 1,4 hertsini. Vigu võivad põhjustada ka ajamärgendite vead, sagedusmõõduri vead, diskreetsushäired (*aliasing*) jm. Faasimõõtmise täpsust hinnatakse vektori koguveaga (*total vector error, TVE*)

$$TVE = \sqrt{\frac{(X_r(n) - X_r)^2 + (X_i(n) - X_i)^2}{(X_r + X_i)^2}}$$

kus  $X_r(n)$  ja  $X_i(n)$  on vektori mõõdetud reaali- ja imaginaarosa ning  $X_r$  ja  $X_i$  on vastavad täpsed väärtused. Koguviga arvestab niisiis nii mooduli kui nurga viga. Täpsusklasside 0 ja 1 korral peab olema  $TVE \leq 1\%$ .

Faasor on püsitalituse (*steady-state*) mõiste. Tegemist on kompleksuurusega, mis vastab puhtale, teatud sagedust omavale sinusoidile. Sünkroniseeritud faasimõõtmiste korral pakub huvi vaid nimisagedus või sellele lähedane sagedus. Tegelikult on nii pinge kui voolu väärtustes harmoonikuid, aga ka mitteharmoonilisi ja siirdekomponente. Neid komponente püütakse välja filtreerida analoog- ja digitaalfiltritega. Olukorras, kus see pole võimalik (nt siirdetalitluse ajal) märgitakse faasimõõtmised vealisteks.

## 2.2 Faasimõõtmiste probleemid

Pakutavate faasimõõdurite kvaliteet on erinev. Paljude mõõdurite täpsus väheneb oluliselt, kui võrgusagedus langeb alla nimisageduse. Erinev on ka mõõtetrafode kasutamine. Mõned rakendavad kaitse- teised mõõtemähiseid. Kuna laimõõtmistel pole andmeliigsust, avalduvad vead tulemustes otseselt. Faasimõõtmiste probleemideks on:

- sisendsignaali mittesiinuselisus
- diskreetsignaali spektrite kattumine (*aliasing*)
- puistenähtus (*leakage effect*) ja mürad
- sageduse hälve
- ebasümmeetria
- transiendid
- alaliskomponent
- sageduse estimeerimine

- mõõtetrafode ebalineaarsus
- täpse aja määramine
- sidekanalite suutlikkus ja vead.

Mõõdetavate suuruste hetkväärtused ei pruugi olla siinuselised vaid moonutatud kõrgematest harmoonikutest. Põhikomponendi saamiseks tuleb andmeid filtreerida, mida tehakse Fourier' teisendusega. Kasutusel on diskreetne Fourier' teisendus (*discrete Fourier transform, DFT*) või kiire Fourier' teisendus (*fast Fourier transform, FFT*).

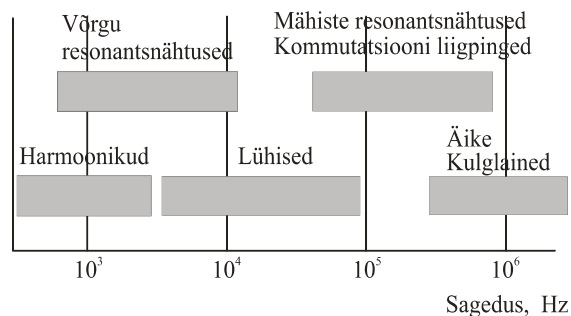
Diskreetsignaali spektrite kattumine (*aliasing*) tekib, kui diskreetimissagedus on liiga väike sisendsignaali sagedusriba laiusega võrreldes. Spektrite kattumine põhjustab tulemustes vea. Vea vältimiseks filtreeritakse liiga kõrged sagedused sisendsignaalist välja.

Faasoresitus nõuab, et signaal oleks muutumatu iseloomuga. Praktiliselt võib seda eeldada teatud ajavahemiku (*time span*) kohta, mida nimetatakse ka andmeaknaks (*data window*). Andmeakna osatähtsus on signaali kuju määramisel eriti suur. Aknast tingitud Fourier' teisenduse vigu nimetatakse puistenähtuseks (*leakage effect*). Vead tekivad eriti, kui kasutatav andmeaken ei ole kooskõlas signaali põhisagedusega, näiteks kui avariilukorras elektrisüsteemi sagedus tunduvalt muutub. Põhimõtteliselt võib andmeaken olla ka murdosa põhisagedusest. Sellised mõõtmised on vajalikud kiiretoimelise releekaitse tarvis. Mürasid, mis võivad olla tekkinud näiteks sidekanalites, iseloomustab mitteharmooniline sagedus ja juhuslikkus.

Sagedus on enamasti  $\pm 0,5$  Hz nimisagedusega võrreldes. Saartalitluses võib sageduse hälve ulatuda kuni  $\pm 10$  Hz. Kuigi faasori representatsioon ei sõltu sagedusest, on diskreetimisagedus kooskõlastatud põhisagedusega ja sageduse hälbed põhjustavad Fourier' teisenduses vigu. Üheks vigade allikaks on diskreetimissageduse ebaühtlus. Need vead tulevad eriti esile, kui diskreetimissagedus ei ole põhisageduse kordne. Sel juhul ei ole ka tavaline Fourier' teisendus alati kasutatav. Pakutakse vähemruutude meetodit, Kalmani filtrit jm.

Kolmefaasiline süsteem võib olla ebasümmeetriline. Faasorit võib estimateerida vaid pärijärgnevuskomponendi järgi.

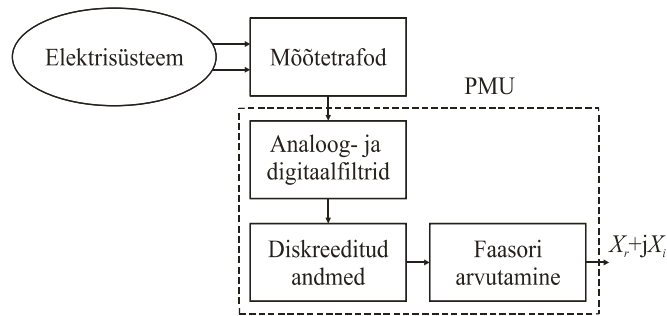
Probleemiks on ka transiendid, mida võib jagada elektromagnetilisteks ja elektromehaanilisteks. Elektromagnetilisi transiente tekitavad lülitused ja lühised. Elektromagnetilised transiendid peegelduvad ja paljunevad elektriliinides ja transformaatorites muuhulgas ka resonantsi tõttu. Harmoonikute allikaks on ennekõike jõuelektroonikaseadmed. Resonantsi tekitavad piki- ja põiklülituses kondensaatorid koos mitmesuguste induktiivsustega. Kiireid transiente põhjustab äike, aga ka elektrikaar lühise korral (joon 2.2). Elektromehaanilised transiendid on põhjustatud sellest, et generaatorite pöörlemiskiirused ei pruugi kokku langeda nimikiirusega. Seetõttu moodustub pinge elektrivõrgu mingis sõlmes erinevate sageduste superpositsioonina, tulemusena pulseeriv väärtus.



**Joonis 2.2 Elektromagnetilised transiendid**

Transientidele reageerivad vääralt ka mõõtetrafod. Kuigi transientkomponente püütakse filtreerida (joonis 2.3) satuvad siirdeprotsessidest tingitud lähtesignaali muutused mitmetesse

järjestikustesse andmeakendesse ja annavad vale ettekujutuse faasorist. Kasutuskõlblikud on vaid andmed, mis on saadud enne ja pärast häiringut (*pre- and post-fault data*).



**Joonis 2.3 Transientide kulgemine faasimõõturis**

Siirdeprotsessis tekib talitluses aperioidiline komponent, mis sisulisel on alaliskomponent (*DC offset*). Alaliskomponent võib tekkida ka pinge mõõtmisel siirdeprotsesside tõttu mahtuvuslikus pingejagajas. Enamasti sumbub alaliskomponent piisavalt kiiresti. Alaliskomponent, mis on seotud eelmainitud transientidega, pannakse tähele koos nendega.

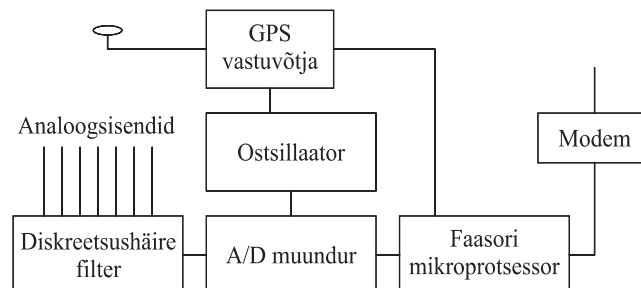
Sageduse estimateerimine toimub ajavahemike mõõtmise järgi, mil signaal läbib nulli. Probleemiks on harmoonikud ja ebasümmeetria. Kasutatakse filtreerimist. Oluline on ka andmeakna pikkus. Pikema akna korral on vead väiksemad. Sagedust on vaja mõõta ka näiteks sagedusejärgsel koormusvähendamisel (*load-shedding*). Vastavad releed hindavad sagedust 5...6 tsükli alusel. Samasuurt andmeakent võib kasutada ka sageduse estimateerimisel. Liiga suur andmeaken põhjustab vea sageduse kiire muutumise korral.

Laimõõtesüsteem on sõltuv *GPS*-süsteemi kaudu saadavatest täpse aja signaalidest. Ajasignaali saamine võib olla häiritud meteoroloogiliste tingimuste tõttu. Omaette probleem on *GPS*-süsteemi militaarne iseloom. Tulevikus rakendatakse laimõõtmisteks ka Euroopa Galilei süsteemi. Mingi aja toimivad laimõõtesüsteemid ka ilma satelliitide ajasignaalideta.

Sidesüsteem on laimõõtmiste hädavajalik tugi. Kui laiseiresüsteemi tarvis kõljab mistahes andmeedastussüsteem, siis laijuhtimissüsteem vajab piisavalt kiiret sidet. Sideaeg alla 200 ms on saavutatav protokolliga *TCP/IP* rakendamise, kuid alla 20 ms ei päästa ka erikanalite korral. Laijuhtimissüsteem vajab alati erikanaleid.

### 2.3 Faasimõõturid ja kontsentraatorid

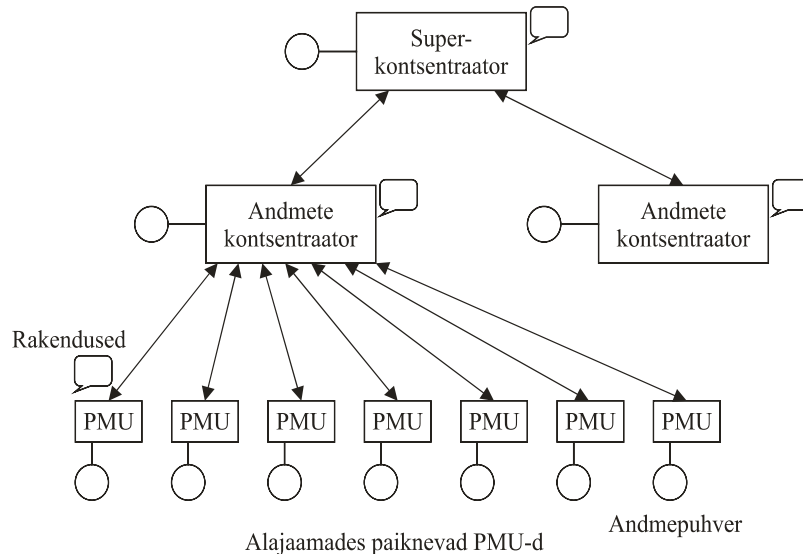
Faasimõõtuuri (*PMU*) võimalik plokk skeem on joonisel 2.4. Sisendsuurusteks on pinge ja voolu analoogväärtused, mis saadakse mõõtetrafodest. Järgnevalt muudetakse sisendsuurused diskreetseteks. Diskreetsignaali spektrite vältimiseks filtreeritakse eelnevalt välja signaalide ülemäära suure sagedusega komponendid. Diskreetimissageduse määrab *GPS*-kellaga kooskõlastatud ostsillaator. Tänapäeval on sageduseks enamasti 96 või 128 valimit põhisageduse ühe perioodi kohta (4800 või 6400 Hz). Pinge ja voolu pärijärgnevuskomponendi faasorite ja sageduse (sageduse väärtus ja muutumiskiirus) andmed leiab asjakohane mikroprotsessor. Andmed varustatakse ajamärgenditega ja saadetakse andmeedastussüsteemi.



**Joonis 2.4 Faasimõõtuuri plokk skeem**

GPS-süsteemi esimesed satelliidid lasti välja 1978 aastal USA Kaitseministeeriumi toimest. Aastaks 2007 oli neid üleval 30. Satelliitide orbiidid on sellised, et enamikes maakera punktides võib samaaegselt jälgida vähemalt kuut satelliiti. Faasimõõturiga GPS-vastuvõtja sisestab ühe impulsi sekundis 1  $\mu$ s täpsusega. Ka suurem, 100 ns täpsus on võimalik. GPS-aeg ei sõltu maa pöörlemisest. Tegemist on universaalajaga (*universal time coordinated, UTC*), mis on kogu maailmas sama.

Faasimõõturid paigutatakse alajaamadesse. Paigutuskohtade valik sõltub laimõõtesüsteemi rakendustest. Laimõõtesüsteemi (*WAMS*) põhimõtteline arhitektuur on joonisel 2.5.



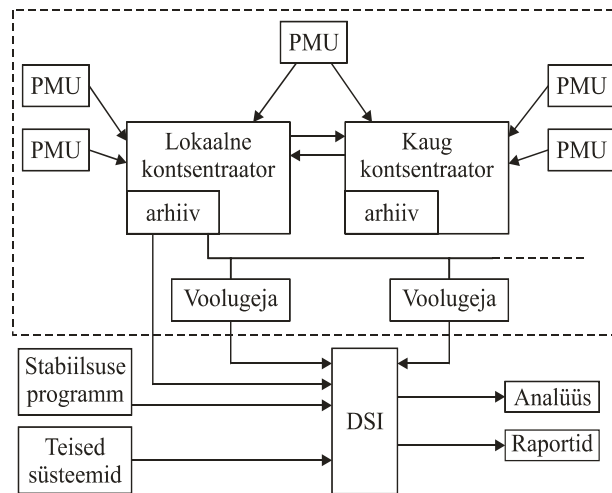
**Joonis 2.5 Laimõõtesüsteemi arhitektuur**

Kohalikud faasimõõtmised salvestatakse võimaliku hilisema (*post-mortem*) analüüsi tarvis. Salvestamine toimub ringskeemi alusel. Selleks, et mingi huvitavale sündmusele vastavad andmed ei läheks kaotsi, salvestatakse andmed püsivalt, samal põhimõttel, kui häiremeerikute puhul. Faasimõõteandmed koondatakse kontsentraatoritesse, kus detekteeritakse halvad andmed ja moodustatakse ajaliselt kooskõlastatud faasimõõtmised, mis on kasutatavad rakendustes. Nii või teisiti lahendatakse siin ka andmelatentsuse (*data latency*) küsimus, mis on seotud viitega andmeedastusel. Ühendsüsteemides on vajalik veel kontsentraatorite kõrgem tase (*super data concentrator*), mis ühendab erinevatest alamsüsteemidest saabuvaid andmeid. Joonisel on andmeedastus näidatud kahe-suunalisena. Põhiline andmevoog liigub pärisuunas. Tagasisuund on mõnikord vajalik näiteks faasimõõturite sättimiseks.

Suurema arvu faasimõõturite paigaldamisel, nii nagu USA lääneranniku ühendsüsteemis WECC, tuleb tähelepanu pöörata laimõõtmiste kooskõlastamisele nii omavahel kui muude mõõtmistega ning asjakohaste rakenduste loomisele. Joonisel 2.6 toodud näite kohaselt faasimõõturite (*PMU*) andmed suunatakse kontsentraatoritesse (*PDC*), mis leiavad faasinurgad ja muud rakendustes vajalikud suurused. *PDC*-andmeid võib ära kasutada otseselt või jätkata nende töötlemist voolugejas (*stream reader*), kus andmeid arhiveeritakse, tehakse spektraalanalüüsi ja detekteeritakse sündmusi. Järgneb elektrisüsteemi dünaamilise oleku identifitseerimine (*dynamic system identification, DSI*) ning andmed on valmis mitmesugusteks rakendusteks. Kokkuvõttes on tegemist sünkroniseeritud faasimõõtmiste (*synchronized phasor measurement, SPM*) või laiemalt sünkroniseeritud süsteemimõõtmiste (*synchronized system measurement, SSM*) võrguga.

Mõõteandmed kantakse üle kõigile süsteemioperaatoritele. Andmeedastusel on olulised kanali läbilaskevõime (kbit/s või Mbit/s) ja latentsus – aeg andmete moodustamisest nende kasutusvõimaluseni rakendustes. Edastatavad andmehulgad ei ole laimõõtmiste korral eriti suured. Küll aga võivad mõned rakendused, näiteks juhtimisülesanded, nõuda väikest

latentsusaega. Kasutatavad on põhimõtteliselt kõik sideliinid. Ülekaalukalt paremaks on siiski fiiberoptilised kaablid, kus pole probleeme läbilaskevõimega ega häiringutega.



**Joonis 2.6 Laimõttesüsteem**

Faasimõõturite andmevood esitavad andmeedastussüsteemile küllaltki suuri nõudeid. Seetõttu ei saa neid elektrisüsteemi paigutada palju. Paigutuskohad peavad olema hoolikalt kaalutletud ning vastama laiseiresüsteemi võimalikele rakendustele. Üks olulisi rakendusi võiks olla talitluse estimeerimine. Piisava ülevaate saamiseks võrgu talitlusest oleks vaja faasimõõtureid 20...25% sõlmedes. Vähemalt esialgu on sellise hulga mõõturite paigaldamine ebareaalne. Tunduvalt vähem on vaja mõõtureid paigaldada selleks, et avastada süsteemi võnkumist ja võimalikku pingekollapsit või jälgida piirkondadevahelisi võnkumisi. Kohalike võnkumiste ja dünaamilise stabiilsuse seireks tuleb mõõturid paigutada suurte elektri jaamade lähedale. Sageduse siirdeprotsesside avastamiseks tuleb mõõturid paigutada võrgu regioonidesse, mis võivad üksteisest eralduda (sattuda saartalitlusse). Pinge jälgimiseks tuleb mõõturid paigutada suurtesse tarbimiskeskuste lähedastesse kontrollsõlmedesse (*pilot node*), mida muuhulgas iseloomustavad suured lühisvõimsused. Sobivateks faasimõõturite paigutuskohtadeks on ka suurte ülekandeliinide lõpusõlmed ning *FACTS-* ja *HVDC*-seadmete terminalid ja sõlmed mis on varustatud erikaitsega (*special protection system, SPS*).

### 3 Laiseiresüsteem

#### 3.1 Laiseiresüsteemi rakendused

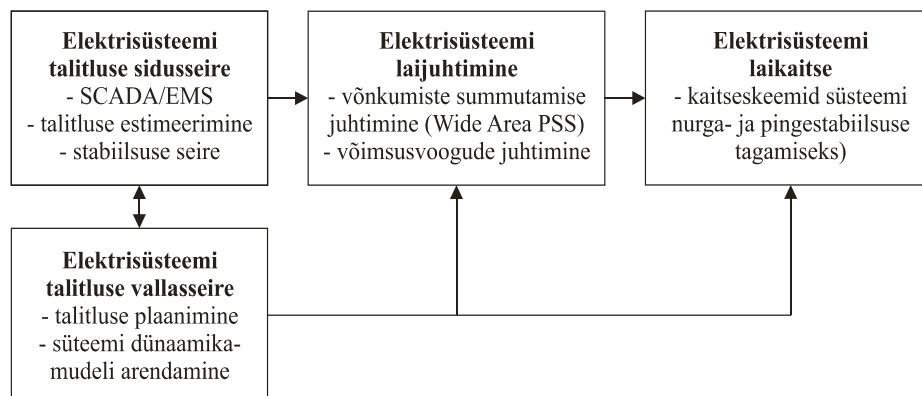
Laimõttesüsteemi võib kasutada elektrisüsteemi püsitalitluse seireks (*online monitoring*) ning talitluse juhtimiseks ja süsteemi kaitseks, vältimaks mittestabiilsust. Mõõtetulemusi on võimalik kasutada ka vallaskujul (*offline*) talitluse plaanimisel ja elektrisüsteemi dünaamikamudeli arendamisel (joonis 3.1).

Laimõttesüsteemi kasutuselevõtt püsitalitluse talitluse seirel lisab traditsiooniliste SCADA-andmetega võrreldes võimaluse jälgida ka elektrisüsteemi siirdeprotsesse. Laiseiresüsteemi moodustab laimõttesüsteem koos sellekohaste rakendustega. Rakenduste põhieesmärgiks on süsteemi suutlikkuse hindamine, ennekõike elektri edastusvõime hindamine reaalajas. Oluline on võimalike probleemide ennetamine. Võimalikeks rakendusteks on:

- faasinurkade ja nurgastabiilsuse jälgimine
- elektrikoridoride (*power corridors*) talitluse seire
- pingestabiilsuse näidustamine
- termiliste piirangute näidustamine
- sündmuste avastamine
- saartalitluse avastamine

- piirkondlike ja piirkondadevaheliste võnkumiste sumbumise seire
- talitluse estimeerimine
- häiringute vallasanalüüs
- elektrisüsteemi dünaamikamudelite adapteerimine
- talitluse optimaalne plaanimine
- dispetšisüsteemide taseme hindamine
- talitluse dünaamika teaduslikud uuringud.

Kokkuvõtlikult võib laiseiresüsteemi toiminguid nimetada süsteemi suutlikkuse seireks (*dynamic performance monitoring*), eriti koostöös elektrienergia juhtimise süsteemiga (*energy management system, EMS*).



**Joonis 3.1 Laimdõtesüsteemi rakendusvaldkonnad**

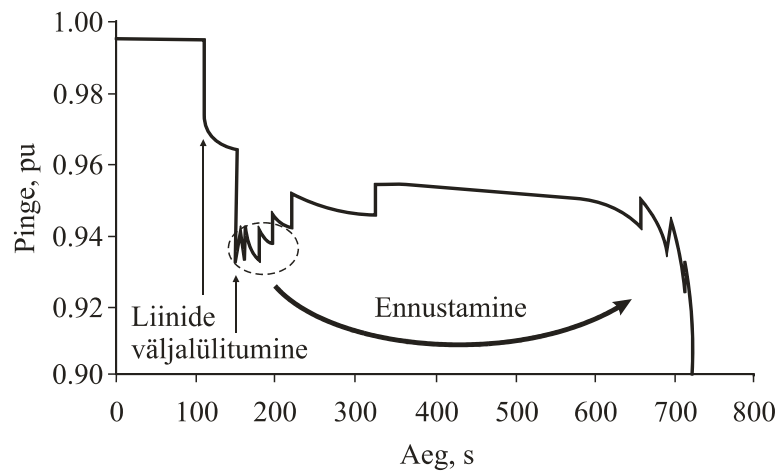
Faasinurkade jälgimine, mis SCADA-mõõtmiste alusel pole võimalik, tõstab tunduvalt usaldatavust talitluse lubatavuse hindamisel. Mõõteandmete töötlemine sellekohaste algoritmide alusel võimaldab väljastada alarme, mis hoiatavad operatiivpersonalit võimalike avariohtlike olukordade eest. Jälgitakse ennekõike võnkumiste sumbumust, mis tekivad talitluse väikeste häiringute tõttu ja on seega alati hinnatav (*continuous observation of damping*). Samad sumbumuse näitajad pädevad üldiselt ka suuremate häiringute korral.

Oluline on elektriülekandekoriidoride (*power corridors*) talitluse seire, kus märgatavaid võimsusi kantakse pikkade vahemaade taha. Esimesed laiseiresüsteemid moodustatigi elektrikoridoride talitluse seireks nii USA-s kui Euroopas. Juba tagasihoidlik arv faasimõõtureid (minimaalselt 2) võimaldavad jälgida pingete faase ülekande kummaski otsas. Jälgitakse ka liinide võimalikku ülekuumenemist.

Võimaliku pingestabiilsuse ohu avastamiseks ei piisa pingetase jälgimisest. Madal pingetase ei põhjusta tingimata pingestabiilsust. Pingestabiilsus võib lähtuda ka nimipingelähedasest olukorrast, näiteks kui reaktiivvõimsust kompenseeritakse suurel määral kondensaatoritega. Pingestabiilsuse ennustaja (*voltage instability predictor, VIP*) koormussõlme või elektrikoridori osas põhineb lihtsatel aseskeemidel, mille parameetreid estimeeritakse mõõteandmete alusel. Elektrikoridori korral on lähteandmeteks ka vastava võrgu parameetrid. Võimalik on pingestabiilsust hinnata ka laiemas ulatuses tuginedes talitluse *WAMS*-põhiselt estimeeritud andmetele. Arvestatakse ka *FACTS*-seadmete ja muude pingeregulaatorite mõju. Ühtlasi on võimalik leida ka nende seadmete optimaalsed sätted.

Pingestabiilsuse dünaamika tuleb päevakorda, kui trafod on varustatud astmelülititega. Pingestabiilsuse dünaamilist stabiilsust mõjutavad astmelülitite kõrval ka generaatorite ülekoormatavuse tingimused ja koormuse taastumise kiirus. Need karakteristikud võivad põhjustada aeglasi muutusi, mis lõpuks (nt 10 min pärast) viivad pingestabiilsuse kollapsini (joonis 3.2). Pingestabiilsust kontrollitakse sellekohaste diferentsiaalvõrrandite alusel, mis tuginevad pingestabiilsuse (trafoteguri) muutuse esimesele ja teisele tuletisele.





Joonis 3.2 Pinge kollapsi võimalik kulg

Õhuliini termiliste piirväärtuste (*thermal limit*) avastamisel võetakse arvesse kaod liinis, välisõhu temperatuur ja muid ilmastikufaktorid kaasa arvatud päikese radiatsioon. Õhuliini temperatuuri seire lähtub valemist

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{T_1 + T_0}{T_2 + T_0}$$

Otsitavaks on siin liini keskmine temperatuur  $T_1$ .  $R_1$  on liini takistus, mis leitakse faasimõõtmiste alusel (?). Suurused  $R_2$  ja  $T_2$  tulenevad liini konstruktsioonist ja  $T_0$  materjalist (nt alumiiniumile  $T_0 = 228$  °C).

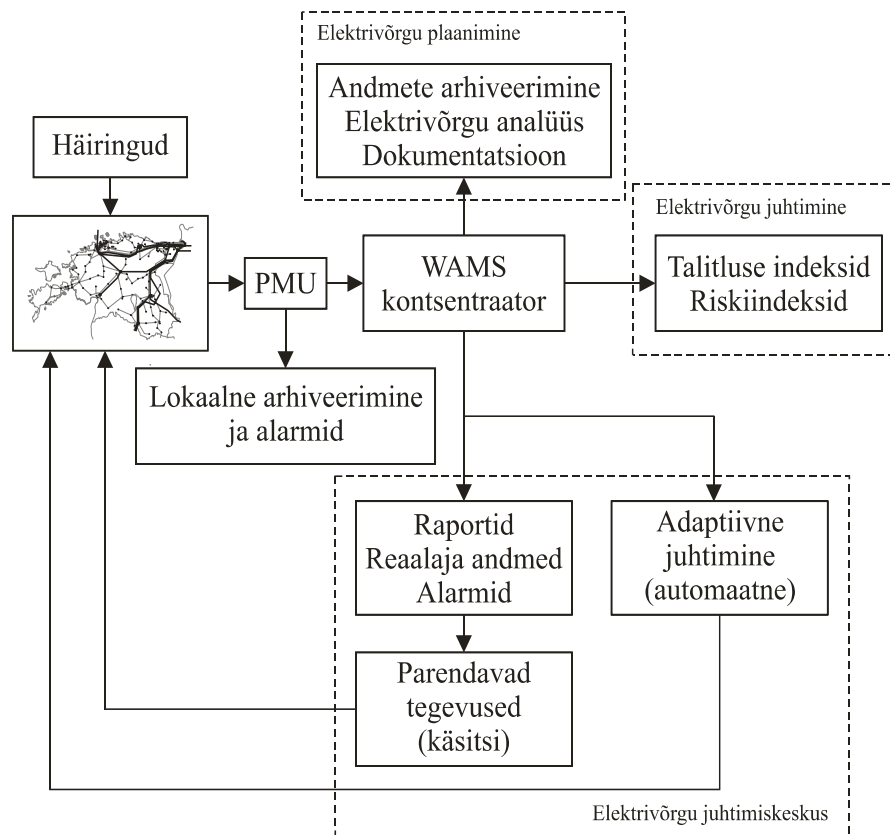
Sündmused, nagu lühised, liinide lülitused, injektsioonide muutumine, lähtuvad seni suurel määral lülitisignaalist. Sündmusi saab aga kontrollida ka faasimõõtmiste alusel, kasutades sobivat talitluse arvutamise algoritme. Kuna faasimõõtmisi on vähe, saab sel moel jälgida sündmusi vaid süsteemi olulisemates lõikudes. WAMS võimaldab avastada ohtlikke olukordi ning määrata kindlaks nende iseloomu, lähtekoha ja levimise ulatuse. Edaspidi rakendatakse selliseid andmeid laikaitse (*wide area protection, WAP*) ja erikaitse (*special protection systems, SPS*) rakendustes.

Saartalitluse tekkimine on oluline sündmus ühendsüsteemi töös. Saartalitluse avastamiseks sobib pingefaaside muutumise alusel määratud sagedus. Normaaltalitluse korral on sagedus kogu ühendsüsteemis sama, saartalitluses aga mitte. Sageduse kiireks määramiseks süsteemi eri osades sobivad faasimõõtmised hästi. Vaja oleks võimaliku saartalitluse tekkimist avastada juba varakult. Ohuks on siiski eksimise võimalus, sest tegemist võib olla võnkumisnähtusega.

Üks laimõõtmiste olulisemaid rakendusi on modaalanalüüsil põhinev elektrisüsteemi võnkumiste avastamine ja seire. Võnkumised võivad lähtuda talitluse suurematest häiringutest nagu generaatorite või ülekandeliinide lülitused, kuid ka juba väike ülekantava võimsuse juurdekasv võib viia mittestabiilse võnkumiseni. Elektri ülekanne suurtele kaugustele võib põhjustada piirkondadevahelise võnkumise. Generaatorite rootorite võnkumise sumbumine on oluline faktor elektrisüsteemi stabiilsuse säilitamisel. Sumbumist aitab tagada elektrisüsteemi stabilisaator (*power system stabilizer, PSS*). Võnkumise sumbumist väljendab elektrisüsteemi dünaamikamudel, mille parameetreid saab hinnata faasimõõtmiste alusel. Võimalik on ennetavate meetmete rakendamine vältimaks ebastabiilsust, kui sumbumus liigselt väheneb. Kui sumbuvus tase ületab etteantud piiri, väljastatakse SCADA-alarm. Võnkumiste sumbumise kiirendamisele aitab kaasa ülekantavate võimsuste vähenemine, stabilisaatorite õige sättimine jm. Võnkumiste iseloomu alusel võib kontrollida elektrisüsteemi dünaamikamudelit. Oluline on võnkumiste jälgimine süsteemi eri regioonide resünkroniseerimisel. Siin on võnkumiste sumbuvus otsustavaks näitajaks.

Süsteemi talitluse määramiseks on vaja teada võrgu konfiguratsiooni ning sõlme pingete väärtusi ja nurki. Kuna tavaliste SCADA-mõõtmised nurki ei haara, siis leitakse need arvutuslikul teel. Estimateerimisel püütakse andmeliigsusele toetudes leida kõige tõenäosem talitus. Vaja on mõõtmisi täpsustada ja detekteerida halbu andmeid. Ka topoloogiavead tuleb leida ning võrgu parameetreid täpsustada. Kuna faasimõõtmised tähendavad talitusparameetrite otseseid ja väga täpset mõõtmisi, siis võimaldavad need tunduvalt parandada talitluse estimateerimist. Faasimõõtmisi võib rakendada estimateeritud talitluse kontrollimiseks või lülitada need otseselt estimateerimisprotsessi. Probleemiks on faasimõõtmiste vähesus. Teisalt on need mõõtmised sagedasemad. Ära võib kasutada nurkade ja voolude väärtusi. Võimalikke algoritme sellise hübriidestimateerimise loomiseks on mitmeid. Uurimised näitavad, et juba 10% strateegiliselt olulise piirkonna katmine faasimõõtmistega tõstab oluliselt estimateerimise täpsust ja kiirust. Faasimõõtmise otsesel kasutamisel on tegemist hübriidestimateerimissüsteemiga (*hybrid state estimator*). Omaette probleem on ühendsüsteemi talitluse estimateerimine (*multi-area state estimation*). Siin püütakse ühendada piirkondlikult estimateeritud tulemusi.

Mitmeid võimalusi on laimõõtmiste vallasrakendustel. Talitluse parema staatika- ja dünaamikamudeli koostamine võimaldab paremini talitlust plaanida ning annab täpsemad lähteandmed juhtimis- ja kaitseseadmete sättimiseks. Talitluse plaanisel on olemas oht, et võimalikke avariilukordade vältimiseks rakendatakse liigseid meetmeid. Teisalt võib-olla, et ei nähta ette kõiki ohtlikke olukordi. WAMS olemasolul võib arvestada sellega, et operaatorid on kujunenud olukorrast paremini informeeritud. Joonisel 3.3 on illustreeritud laiseiresüsteemi rakendusi. Kokkuvõttes võib öelda, et WAMS on juba väljakujunenud tehnoloogia, mis oluliselt mõjutab elektrisüsteemi toimimise töökindlust ja efektiivsust.



Joonis 3.3 Laiseiresüsteemi rakendusi

### 3.2 Laiseiresüsteemide näiteid

Laimdõtmiste võimalusi talitluse seirel illustreerivad mitmesugused rakendused kogu maailmas. Kuigi allpool toodud mõne aasta tagused näited on ala kiire arenemise tõttu teatud määral juba vananenud, iseloomustavad need siiski laiseiresüsteemide võimalusi.

Šveitsi elektrisüsteemi kaudu, mis asetseb ühendüsteemi UCTE keskmes, toimub elektri ülekande põhja-lõuna suunas Itaaliasse. Üles on seatud 4 faasimõõturit (*PMU*), mis kontsentraatori (*PDC*) vahendusel võimaldavad jälgida pingete faase ülekande kummaski otsas. Jälgitakse ka liinide võimalikku ülekuumenemist. Laimdõtesüsteemi ajaeraldusvõime (*time resolution*) on 100 ms. Laimdõtmised on integreeritud *SCADA*-andmetega ühtsesse kasutajaliidesesse, mis võimaldab näiteks vajalikul viisil moodustada ja esile tuua alarme. Laimdõtteandmeid kasutatakse ära ka Šveitsi dünaamikamudeli kalibreerimiseks.

Analoogne näide on Horvaatia süsteemi kohta, kus jälgitakse elektri ülekannet 400 kV võrgu kaudu UCTE ja Balkani regiooni vahel. Jälgitakse ka pingestabiilsust.

Laiseiresüsteemi rakendused UCTE süsteemis

- süsteemi koormatavuse jälgimine pingefaaside võrdlemise teel
- piirkondadevaheliste võnkumiste (*inter-area oscillations*) tekkimise jälgimine
- seadmete forsseeritud väljalangemise avastamine sageduse muutumise jälgimise teel
- saartalitluse tekkimise jälgimine pingektorite roteerumise kaudu.

Mainitud jälgimised toimuvad dispetšisüsteemi kaudu, võimaliku tulemusena vastavad alarmid.

Kanada põhiliseks elektriettevoitteks on Hydro-Québec, kus elektrit genereeritakse põhjas asuvate suurte hüdrojaamadega ning kantaks üle lõuna poole sadade kilomeetrite taha 735 kV ülekandekoridori kaudu. Kasutusel on ka alalisvooluülekande. Nii pinge, sageduse kui nurgastabiilsuse probleemid on siin suured. Hydro-Québec'i paigutati esimesed faasimõõturid juba aastal 1976. Hiljem (2001) on nende arv tõusnud kaheksani. Põhilisteks rakendusteks koos muude mõõtesüsteemidega on

- talitluse analüüs
- süsteemi dünaamikamudeli täpsustamine
- talitluse estimeerimise toetamine
- sageduse jälgimine stabiilsuse tagamiseks
- geomagnetiliste tormide mõju jälgimine (harmoonmoondetegur)
- sageduse reguleerimissüsteemi (*load-frequency control*) toetamine.

Austraalias rakendatakse faasimõõtureid elektrisüsteemi võnkumiste kontrolliks. Loodud on sellekohane seiresüsteem (*oscillatory stability monitor, OSM*), mis võimaldab suure täpsusega hinnata modaalanalüüsi tegeva dünaamikamudeli parameetreid.

Ungaris jälgitakse *WAMSI* abil piirkondadevahelisi võnkumisi. Üles on seatud 6 faasimõõturit. Laimdõtmised võimaldavad paremini sättida süsteemi stabilisaatoreid (*PSS*) selleks, et kiirendada võnkumiste sumbumist.

Suurbritannias on laimdõtmisi kasutatud juba aastaid. Esmase rakenduse eesmärgiks oli Inglismaa ja Šotimaa vahelise elektrikoridoris võimalike 0,5 Hz võnkumiste jälgimine ja summutamine, mis võimaldas vahetusvõimsust tunduvalt tõsta. Võnkumiste summutamise põhiliseks vahendiks on siin *PSS*. Viimasel ajal jälgitakse elektrisüsteemi dünaamikat laiemalt. Dünaamiliste näitajate muutused on tingitud ennekõike muutustest elektriturul, generaatorite koosseisu muutustest hajatootmise tõttu ja turbiinide (eriti hüdroturbiinide) regulaatorite kulumisest.

Juba paigaldatud või plaanitavaid faasimõõtureid võib leida veel mitmel pool maailmas: USA idarannik (25), Itaalia (30), Hiina (133).

## 4 Laijuhtimissüsteem

Laijuhtimissüsteemid (*WACS*) toimivad automaatselt elektrisüsteemi ülekandvõime tõstmiseks ja stabiilsuse säilitamiseks. Laimõõtmised sobivad näiteks hästi kiirete juhtimis-seadmete (*network controller*) nagu *PSS* ja *FACTS*-seadmete sättimiseks. Juhtida võib elektrisüsteemi regulaatoreid ning teha vajalikke lülitusi. Teisisõnu, tegemist on elektrisüsteemi laikaitsega (*wide area protection, WAP*). Automaatselt võib reguleerida ka elektrisüsteemi püsitalitlust hoides ära avariiolulike olukordade tekkimist.

Üldiselt võib elektrisüsteemi regulaatoreid vaadelda kolmel tasemel:

- primaartase – kiired regulaatorid nagu *AVR* ja *SVC*
- sekundaartase – aeglasemad ja suurema ulatusega seadmed, primaartaseme regulaatorite koordineerimiseks, nagu *AGC*
- tertsiaartase – regulaatorid, mis sätivad sekundaarregulaatoreid, on suure (nt riigi) tegevusulatusega.

Seni toimub regulaatorite sättimine käsitsi operatiivpersonaliga toimest. Laijuhtimissüsteem võimaldab juhtimist kiirendada, arvestades protsesse laiemas ulatuses. Tingimuseks on siiski, et automaatsed toimingud oleks operaatoritele arusaadavad ja jälgitavad.

Laijuhtimissüsteemi rakendamise põhilised eesmärgid on

- võrgu ülekandevõime tõstmine
- stabiilsuse tagamine
- pingelaireguleerimine.

Elektrivõrgu ülekandevõimet on vaja tõsta elektrituru toimimise parendamiseks. Siin tekib küsimus optimeerimiskriteeriumist. Enam kui ühe ülekandvõimaluse korral on elektrituru seisukohalt eelistatum suurema kasufunktsiooniga (*benefit function*)

$$B(t) = \sum_b p_b t_b$$

ülekandeteede (*flowgate*). Siin  $p_b$  on hind ja  $t_b$  ülekande määr. Ülekandevõime tõstmine tähendab muuhulgas võimsusvoogude juhtimist (*coordinated power flow control*), mis muudab võimsuste loomulikkust jagunemisest. Muudatusi on vaja, et vähendada ülekoormatud liinide koormust, tõstes ülekannet mujal. See tähendaks aga, et süsteem ei toimi optimaalselt kadude ja muude näitajate suhtes. Avastada ja ära hoida tuleb soovimatuid tasandusvooge (*loop flow*). Traditsiooniliselt reguleeritakse võimsusvoogusid lisapingetrafodega (faasini-hutustrafodega, *phase shifting transformer, PST*). Kaasaegsemad on *FACTS*-põhised dünaamilised võimsusvoogude kontrollid (*dynamic flow controller, DFC*). *DFC*-seadmed võimaldavad talitlushäiringute korral kiiresti (sekundi jooksul) adapteruda olukorrale vajalikul viisil. *DFC*-seadmed võimaldavad vältida ka pingemittestabiilsust ja reageerida ülekuumenemisele. Muidugi peavad asjakohased juhtimistoimingud olema eelnevalt programmeeritud.

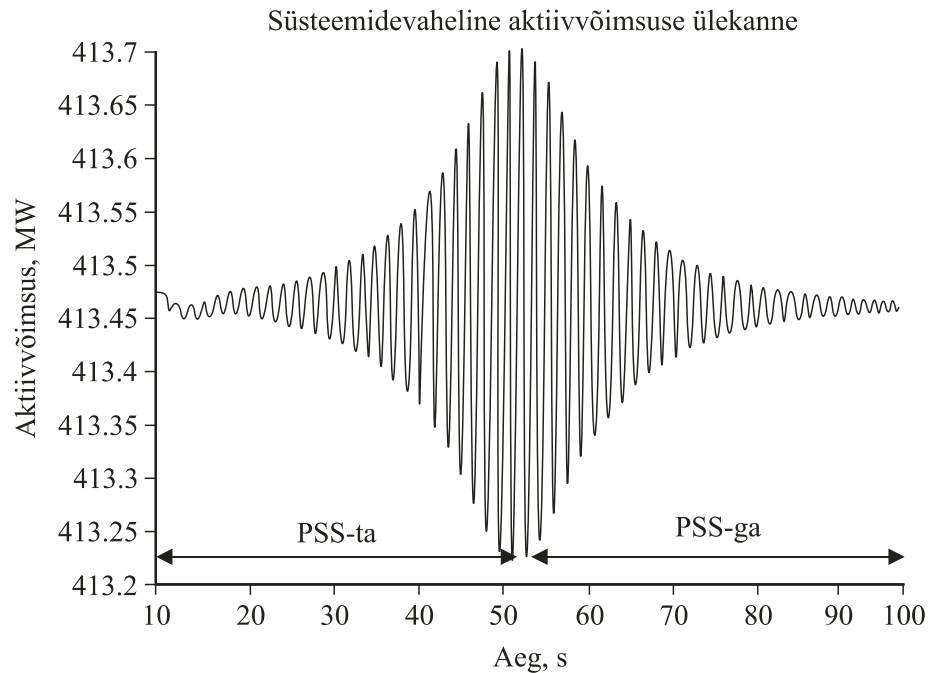
Traditsioonilisteks stabiilsuse tagamise võteteks on kiiretoimelise releekaitse (*reduction of fault-clearing time*) ning kiirete ergutusregulaatorite ja stabilisaatorite (*PSS*) rakendamine. Regulaatorid stabiilsuse tagamiseks võib jagada kohaliku ja laijuhtimise ning pideva ja mittepideva toime järgi. Pideva toimega on pingeregulaatorid, elektrisüsteemi stabilisaatorid ning turbiinide regulaatorid aga ka türistorjuhitavad reaktiivvõimsuse allikad. Mittepideva toimega on kondensaatorpatareid ja reaktorite lülitused ning koormuse avariiline vähendamine. Pingetõstmiseks avariiolekorras on kasutusel sünkroonkompensaatorid (*synchronous condenser, SC*). Kiirema toimega on staatilised kompensaatorid (*static var compensator, SVC*). Väga efektiivne on pikkade liinide pikikompenseerimine.

Ühendsüsteemis on elektri ülekande üheks oluliseks piirajaks piirkondadevahelise võnkumise võimalus. Tavalised stabilisaatorid (*PSS*) siin sageli ei aita, vaja on laimõõtmisi. Laimõõtmistel põhineva süsteemi loomisel on vaja välja selgitada reguleerimisvõimalused (*control loops*), õigesti paigaldada faasimõõturid ja reguleerimisseadmed, koostada asjakohased juhtimisseadused (*control laws*) ning toime tulla laimõõtmiste võimalike viidetega. Välja

töötatud on elektrisüsteemi laiatoimeline stabilisaator (*multi-band PSS, PSS4B*), mis reageerib nii generaatori rootori kiirusele kui pingele ja voolule. Stabilisaator on seatud reageerima kolmele võimalikule võnkumisviisile:

- kõrgsageduslik (0,8...4,0 Hz) võnkumine sama jaama või lähedaste jaamade generaatorite vahel
- kesksageduslik (0,1...1,0 Hz) piirkondlik võnkumine
- madalsageduslik (umbes 0,04 Hz) süsteemne (globaalne) võnkumine.

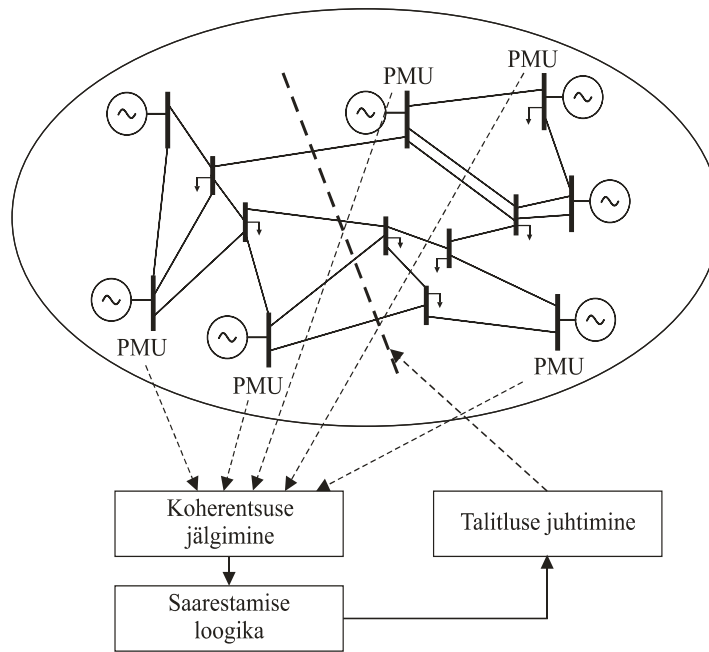
Joonisel 4.1 on näide *PSS* toimest piirkonnavaheliste võnkumiste (0,64 Hz) korral, kui *PSS* lülitati sisse 50 sekundi möödumisel võnkumiste algusest.



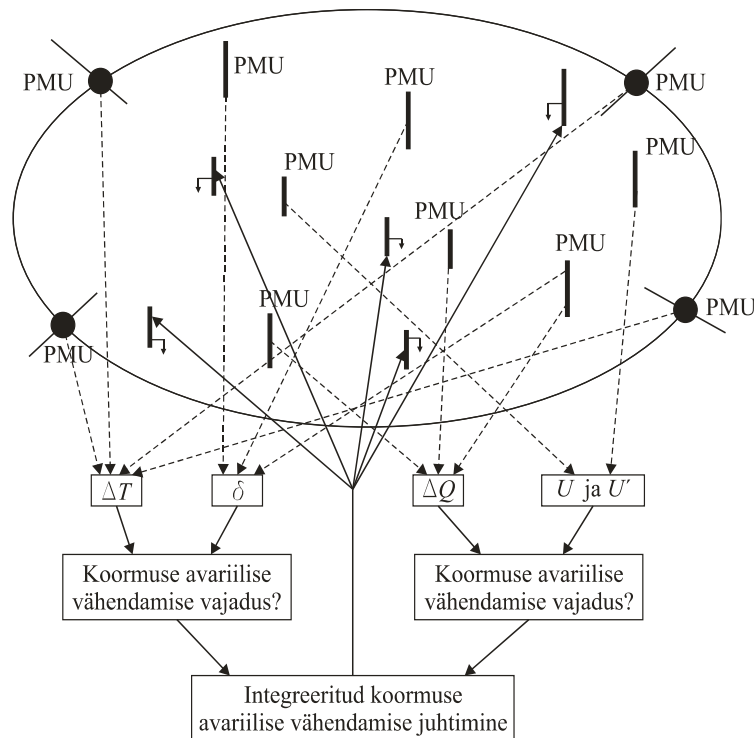
**Joonis 4.1 PSS toime võimsuste piirkonnavahelise võnkumise summutamisel**

Võnkumiste summutamiseks kasutatakse ka kiiretoimelisi reaktiivvõimsuse kompensaatoreid *SC* ja *SVC*. Laimdõtmised võimaldavad koordineerida erinevaid pingereguleerimisseadmeid. Kasutusel on nii lokaalmõõtmised (kaugmõõtmised) liinistete vahel, kui laimdõtmised. Võib näidata, et laimdõtmiste kasutamine tõstab ülekande läbilaskevõimet tunduvalt.

Stabiilsuse laikaitse võib olla kas erikaitse (*special protection system, SPS*) või korrektiivset (*remedial actions schemes, RAS*) tüüpi. Erikaitse reageerib eelnevalt valitud sündmustele (lülitustele). *RAS* on vastandina *SPS*le pideva toimega, jälgides süsteemi reageerimist häiringutele. Neid kahte toimet võib liita ühte *WACS*-süsteemi (*wide-area stability and voltage control system*) nii, et pidevalt toimiv talitluse korrigeerimine asendub vajaduse korral suuremate lülitustega. Allpool on illustreeritud laikaitse süsteeme, mis realiseerivad elektrisüsteemi saartalitluse vältimaks avariid laienemist (joonis 4.2) ning avariilist koormusvähendamist (joonis 4.3).



Joonis 4.2 WACS elektrisüsteemi viimiseks saartalitlusse



Joonis 4.3 WACS elektrisüsteemi koormuse avariiliseks vähendamiseks

Ülikõrgpingele mõeldud pinge laikaitesüsteem (*wide-area voltage protection, WAP*) toimib pingestabiilsuse ja süsteemi töökindluse tõstmiseks koostöös pinge laireguleerimisega (*wide area voltage regulation, WAR*). Mõlemad süsteemid peavad toimima koordineeritult, mis ei pruugi olla lihtne ülesanne.

Laikaitse ja ülekandvõrgu pingereguleerimise ühendamisel räägitakse pinge tavalise ehk primaarreguleerimise kõrval veel pinge sekundaar- ja tertsiarreguleerimisest (*secondary and tertiary voltage regulation, SVR and TVR*). Primaarreguleerimise aluseks on generaatorid. Sekundaarregulaatorid reguleerivad pinget juhtimispiirkondade (*control area*) kontroll-sõlmedes (*pilot node*). Tertsiarreguleerimine tähendab sekundaarregulaatorite sätete muutmist

üle kogu süsteemi. Nii *SVR* kui *TVR* rakenduvad ohuolukordades. Reguleeritakse ja lülitatakse kondensaatorpatareisid, reaktoreid, sünkroon- ja staatilisi kompensatoreid aga ka trafode astmelüliteid. Vajaduse korral astmelülidid blokeeritakse. Põhieesmärgiks on vältida pinge mittestabiilsust. Pinge mittestabiilsuse indikaatoriks (*proximity indicator*) on

$$VSI_j(t) = q_i(t) + \rho \frac{\partial q_i(t)}{\partial t} \Delta t$$

kus  $-1 \leq q_j \leq 1$  on  $j$ -nda piirkonna reaktiivvõimsuse tase reguleerimisseadme võimsuse suhtes,  $\rho$  – kaalutegur ning  $\Delta t$  – diskreetimissamm. Indikaator *VSI* ei iseloomusta õigupoolest pingestabiilsust, vaid *SVR* kaugust tema toimepiiridest. Tertsialreguleerimine algab, kui sekundaarreguleerimisest (*SVR*) ei piisa. Omakorda pinge laikaitesüsteem (*WAP*) hakkab toimima, kui ka *TVR* ei tule toime. Mõlemal juhul on aluseks mittestabiilsuse indeks (?) (*real-time voltage instability index*). Laikaitesüsteemi võimalusteks on sisse lülitada reaktiivvõimsuse reserve, kui neid on, ning vähendada  $j$ -nda piirkonna koormust, alustades reaktiivkoormusest. Koormuse vähendamine toimub seni, kuni *VSI*-indeks ning *SVR* ja *TVR* väärtused sisenevad oma normaalsesse piirkonda.

Kokku võttes tuleb *WAMS* ja *WAMC* toimet vaadelda püsitalitluse, siirdetalitluse (nt piirkondadevaheline võnkumine) ja avariitalitluse olukorras (tabel 4.1).

Tabel 4.1 *WAMS* ja *WAMC* toime talitluse erinevates olukordades

	Püsitalitus	Siirdetalitus	Avariitalitus
Seire ( <i>WAMS</i> )	Stabiilsuse jooksev hindamine ( <i>OSA</i> )	Süsteemi dünaamika, nt võnkumiste sumbumise seire	Talitluse avariijärgne seire
Juhtimine ( <i>WAMC</i> )	Valmistumine juhtimis- ja kaitseaktsioonideks ( <i>RAS/SPS</i> )	Võimsusvoogude reguleerimine ja regulaatorite sättimine	Juhtimis- ja kaitseaktsioonide ( <i>RAS/SPS</i> ) täitmine

Laijuhtimissüsteem võib olla suunatud kas süsteemi ülekandevõime või töökindluse tõstmisele. Kuna laiseire ja -juhtimine võimaldab töötada stabiilsuse piiridele lähemal, tekib oht, et süsteemi töökindlus väheneb. Asja tuleb hoolikalt kaaluda.

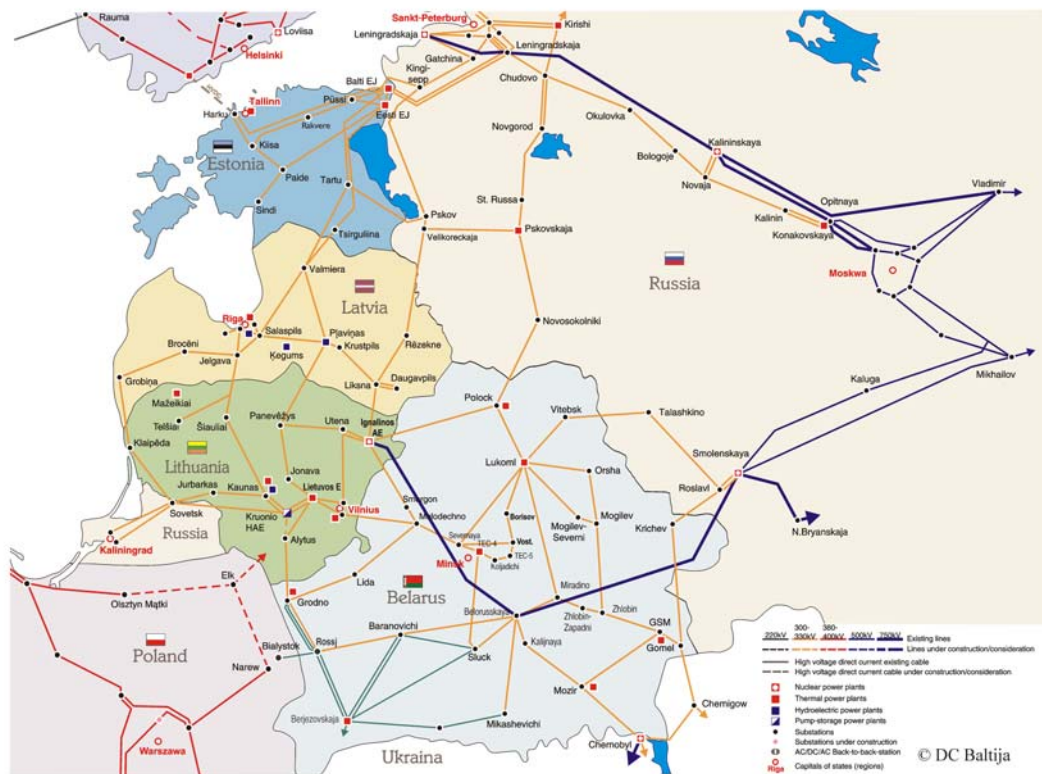
Automaatsüsteemid peavad toimima õigesti ka muutuste korral elektrisüsteemis. Vältida tuleb olukordi, kus laikaitse ise põhjustab avarisiid. Võimalike avariiolekordade mitmekesisuse tõttu on automaatse laikaitse seadmine keerukas.

## 5 Laimõõtmised Eestis

Laimõõte- ja juhtimissüsteemid toimivad suurtes ühendsüsteemides. Eesti oludes ei ole iseseisev laimõõte- või juhtimissüsteem mõttekas. Küll aga tuleks Eestisse paigutada mõned faasimõõturid, mis toimivad koostöös naabersüsteemide seadmetega. Kuna laimõõteandmed on üldkasutatavad, saab Eesti elektrisüsteemi operaator parema ülevaate nii Eesti süsteemi kui ühendsüsteemi talitlusest. Võimalikud on ka kaitseadmed, mis avariiohu tekkimisel ühendsüsteemis reguleerivad näiteks Eesti alalisvooluülekandeid.

Eesti elektrisüsteem on sünkroonselt ühendatud koos teiste Balti riikide elektrisüsteemidega ja Venemaaga ühendalektrisüsteemi *IPS/UPS* (*Interconnected Power Systems of Commonwealth of Independent States and Baltic Countries and Unified Power System of Russia*). Joonisel 5.1 on ühendsüsteemi meiepoolne regioon. Laiemas plaanis võib täheldada, et Eesti elektrisüsteem paikneb kolme suure ühendalektrisüsteemi ristumiskohas: põhjas Nordel, lõunas UCTE ja idas *IPS/UPS*. Eesti elektrisüsteemil on ümbritsevate elektrisüsteemidega viis vahelduvvoolu ja üks alalisvoolu ühendus: kolm Venemaaga, kaks Lätiga ja üks *HVDC*-ühendus Soomega. Hetkel on ettevalmistamisel teine *HVDC*-ühendus Soomega, mis peaks alustama toimimist

2014. aastal. UCTE-süsteemiga seni ühendus puudub. Plaanitud on nii vahelduv- kui alalisvooluülekandeid.



Joonis 5.1 Baltimaade asend ühendedektrisüsteemis IPS/UPS

Eesti elektrisüsteemi asukoha tõttu on võimalikud suured võimsusvood põhja-lõuna suunas. Toimub elektri transiit läbi Eesti elektrivõrgu Sankt Peterburist Leedusse, eriolukordades ka vastupidi. Lähitulevikus, kus suletakse Ignalina tuumajaam ja võetakse kasutusele alalisvooluülekande Estlink 2, suurenevad Eesti elektrisüsteemi läbivad võimsusvood veelgi. Alalisvooluülekande Estlink 1 transiit on seni peamiselt suunaga Balti elektrijaamadest Soome. Tuleb tähele panna ka Eestisest olukorda, kus elektri põhiline tarbimine on Tallinna piirkonnas, tootmine aga Narvas. Süsteemi olulisemad pudelikaelad asuvad Valgevene ja Leedu ning Eesti ja Läti vahelistel ühendustel. Ühendsüsteemi talitluse stabiilsust ja ühtlasi Eesti elektrisüsteemi ülekandevõimalusi mõjutab suurel määral Venemaa 750 kV elektrivõrgu talitus Sankt Peterburi ja Moskva vahel. Oma mõju on ka Venemaa süsteemi muude ühenduste talitlusel.

Kiire ja täpse informatsiooni saamiseks elektrisüsteemi talitluse kohta ühineb Eesti lähiaastatel laiseiresüsteemiga. Selleks paigaldatakse aastal 2010 PMU-seadmed kõikidele Eesti elektrisüsteemi välisühendustele ning olulisematele siseühendustele (joonis 5.2). Koostöös Läti ja Leedu ning ühendsüsteemi muude PMU-seadmetega tekib võimalus jälgida nii Eestisisesid võimsusvooge kui vahetusvõimsusi teiste süsteemidega. Põhiliseks eesmärgiks on nurga- ja pingestabiilsusega ning võimalike ülekoormustega seotud nähtuste jälgimine. Täiendavalt kasutatakse WAMS-süsteemi vahendusel saadud andmeid Eesti elektrisüsteemi dünaamikamudeli verifitseerimiseks ning talitluse estimeerimiseks. Tulevikus võib laimõõtmisi rakendada ka osana Eesti elektrisüsteemi avariitõrjeautomaatikast, mis juhib eelkõige HVDC-ülekannete talitlust võimalike häiringute tekkimisel.





**Joonis 5.2 PMU-seadmete asukohad Eesti, Läti ja Leedu elektrisüsteemides**

Laiseiresüsteemi moodustamiseks tuleb *PMU*-seadmete kõrval Eestisse paigaldada ka üks kontsentraator ning kindlustada vajalik andmeülekanne. Andmete ülekandmiseks sobib küll tavaline *TCP/IP*-põhine andmevõrk, kuid võib osutuda vajalikuks täiendavate sidekanalite rajamine.

## Lühendid

AGC	Automatic Generation Control
ASMS	Angle Shift Measurement System
ATC	Available Transmission Capability
CT	Current Transducer
DFC	Dynamic Flow Controller
DFR	Digital Fault Recorder
ELKRAFT	Danish ISO
EMS	Energy Management System
ETRANS	Swiss ISO
FACTS	Flexible AC Transmission System
FERC	Federal Energy Regulatory Commission
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphic User Interface
HMI	Human-Machine Interface
HVDC	High-Voltage Direct Current
IED	Intelligent Electronic Device
IPS/UPS	Interconnected Power Systems of Commonwealth of Independent States and Baltic Countries and Unified Power System of Russia
ISO	Independent System Operator
NERC	North American Electric Reliability Council
NPCC	Northeast Power Coordinating Council
NTC	Net Transfer Capability
OLTC	On-Load Tap Changer
OSA	Online Stability Assessment
OSM	Oscillatory Stability Monitor
PDC	Phasor Data Concentrator
PLL	Phase Lock Loop
PMU	Phasor Measurement Unit
POD	Power Oscillation Damper
PSS	Power System Stabilizer
PST	Phase Shifting Transformer
RAS	Remedial Action Schemes
RDM	Reference Dynamic Model
RTDMS	Real-time Dynamic Monitoring System
RTO	Regional Transmission System Operator
RTU	Remot Terminal Unit
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SE	State Estimation
SPDC	Super PDC
SPM	Synchronized Phasor Measurement (network)
SPS	Special Protection System
sps	samples per second
SSM	Synchronized System Measurement (network)
STATCOM	Static Compensator (IGBT or IGCT voltage source converter based design)
SVC	Static Var Compensator (thyristor based design)
SVR	Secondary Voltage Regulation
TERNA	Italian ISO
TTC	Total Transmission Capability
TVE	Total Vector Error
TVR	Tertiary Voltage Regulation

UCTE	Union for the Coordination of Transmission of Electricity
VIP	Voltage Instability Predictor
VT	Voltage Transducer
WAC	Wide Area Control
WACS	Wide Area stability and voltage Control System
WAMC	Wide Area Monitoring and Control System
WAMS	Wide Area Monitoring System
WAP	Wide Area Protection
WAPS	Wide Area Protection System
WAR	Wide Area voltage Regulation
WECC	Western Electricity Coordinating Council

## Mõisted

asset management	varade juhtimine
ante-disturbance steady state	häiringueelne püsialitus
benefit function	kasufunktsioon
data latency	andmelatentsus – aeg andmete loomisest nende kasutusvõimaluseni
damping ratio	sumbuvustegur
decay time constant	sumbumise ajakonstant
dynamics monitoring	dünaamika seire
dynamic performance	dünaamiline suutlikkus
halving time	sumbumisaeg? poolitusaeg?
equilibrium point	tasakaalupunkt
event detection	sündmuste avastamine
flowgate	ülekangetee
independent system operator (ISO)	sõltumatu süsteemioperaator
inter-area oscillation	piirkondadevaheline võnkumine
loop flow	tasandusvoog
modal analysis	modaalanalüüs
network controller	võrgu regulaator
net transfer capability (NTC)	võrgu läbilaskevõime
oscillatory stability	perioodiline stabiilsus?
phase shifting transformer (PST)	lisapingetrafo, faasinihutustrafo
pilot node	kontrollsõlm
power corridor	elektri(ülekande)koridor, ülekandekoridor
reference dynamic model (RDM)	dünaamika baasmudel
samples per second (sps)	valimeid (sampe, võendeid) sekundis = diskreetimissagedus
sampling rate (samples per cycle)	diskreetimisnorm
special protection süstem (SPS)	erikaitse(süsteem)
synchronized phasor measurement unit (PMU) = synchrophasor	sünkroniseeritud faasimõõtesead = sünkrofaasor
time-stamp	ajamärgend, ajatempel
total transmission capability	üldine (summaarne) edastusvõime
wide area control system (WACS)	laijuhtimissüsteem
wide area control (WAC)	laijuhtimine
wide area monitoring and control system (WAMC)	laisaire- ja juhtimissüsteem
wide area monitoring system (WAMS)	laisairesüsteem
wide area protection (WAP)	laikaitse
wide area voltage regulation (WAR)	pinge laireguleerimine

## **Kirjandus**

A.G. Phadke, J.S. Thorp. Synchronised Phasor Measurements and Their Applications. Springer, 2008. 248 pp.

Wide Area Monitoring and Control for Transmission Capability Enhancement. CIGRE Working Group of Study Committee C4. Final Report. January, 2007,