

Elektrilise võimsuse mõõtühiku riigietaloni jälgitavusahel, mõõte- ja
abivahendeid ning etalone iseloomustavate metrooloogiliste parameetrite,
laboriruumi ja personali kirjeldus

Sisukord

1.	Sissejuhatus.....	2
2.	Mõisted	2
3.	Mõõte- ja abivahendid	3
4.	Jälgitavusahel.....	4
5.	Mõõtevõime	5
6.	Etaloni metrooloogilisi omadusi tõendavad dokumendid	5
7.	Laboriruum	6
8.	Riigietaloni säilitamisega ja kasutamisega seotud personal	7
9.	Riigietaloni säilitamise ja kasutamise tasuvusanalüüs	7

1. Sissejuhatus

Elektrilise võimsuse täpne ja usaldusväärne mõõtmine on muutunud üha olulisemaks olukorras, kus elektrivõrk koosneb erinevatest ja erinevatel tingimustel töötavatest tootmisüksustest nagu näiteks tuule- ja päikesepargid. Samuti on muutunud ja muutumas tarbimine, näiteks on lisandunud elektriautode laadimisvõrgustik. Elektrilise võimsuse riigietaloni toel on võimalik osutada või arendada järgnevaid teenuseid:

- Elektrilise võimsuse analüsaatorite ja mõõturite kontroll ja kalibreerimine ja elektrilise võimsuse kalibraatorite kalibreerimine – teenus on vajalik eelkõige elektroonikaettevõtetele, samuti elektrotehnika tootmise ja elektrienergia mõõtmisega seotud ettevõtetele
- Uute teenuste arendus: elektriautode laadimisjaamade taatlemine/kontroll
- Digitaalsetes alajaamades kasutatavate seadmete kalibreerimine

Samuti on elektrilise võimsuse riigietaloni toel võimalik ellu viia ettevõtteid toetavat teadus- ja arendustegevust, näiteks on elektrilise võimsuse etaloni mõõtevahendeid ja tarkvara kasutatud ühe transpordiettevõtte rongi rattapaari impedantsi (näivtakistuse) kontrolliks, mis tagab, et raudteeohutust kindlustavad tõkkepuud avanevad õigeaegselt. Samuti liigub arendustegevus suunas, mis võimaldab tegeleda meditsiiniseamete kontrolliga, täpsemalt bioelektrilise impedantsi analüüsiks kasutatavate seadmete puhul.

Riigi- ja tugietalonide nimistu kehtestab valdkonna eest vastutav minister määrusega. Hetkel kehtiva määruse alusel on elektriline võimsus alates 2019. aastast tugietalon.

2. Mõisted

Aktiivvõimsus (P), ühik W – vahelduvvoolu hetkvõimsuse keskväärtus ühe perioodi kestel.

Siinuselise voolu I ja pingel U võimsus väljendatuna $P = U \cdot I \cdot \cos \phi$.

Mittesiinuselise perioodilise voolu I ja pingel U võimsus väljendatakse järgmiselt:

$$P = \sum_n P_n = \sum_n U_n I_n \cos \phi_n,$$

kus U_n ja I_n on pingel ning voolu harmooniliste RMS väärtused, ϕ_n – faasierinevused pingel ja voolu harmooniliste vahel.

Näivvõimsus (S), ühik VA – pingel efektiivväärtuse U ja voolu efektiivväärtuse I korrutis: $S = U \cdot I$.

Mittesiinuselise perioodilise voolu I ja pingel U korral näivvõimsust väljendatakse järgmiselt:

$$S = \sqrt{\sum_n U_n^2 \cdot \sum_n I_n^2}.$$

Reaktiivvõimsus (Q), ühik var – siinuselise voolu I ja pingel U korral reaktiivvõimsust väljendatakse järgmiselt: $Q = U \cdot I \cdot \sin \phi$.

Reaktiivvõimsus (Budeanu definitsioon Q_B), ühik var – mittesiinuselise perioodilise voolu I ja pingel U korral reaktiivvõimsust väljendatakse järgmiselt: $Q_B = \sum_n Q_n = \sum_n U_n I_n \sin \phi_n$.

Reaktiivvõimsus (Fryze definitsioon Q_F), ühik var – mittesiinuselise perioodilise voolu I ja pingel U korral reaktiivvõimsust väljendatakse järgmiselt: $Q_F = \sqrt{S^2 - P^2}$.

Siinuselise signaali puhul $Q_B = Q_F$.

Moонutusvõimsus (D_B), ühik VA – mittesiinuselise perioodilise voolu I ja pingel U korral moонutusvõimsust väljendatakse järgmiselt: $D_B = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2} = \sqrt{Q_F^2 - Q_B^2}$. Siinuselise signaali puhul $D_B = 0$.

Harmooniliste kogumoonutused (THD), pingeharmooniliste kogumoonutused väljendatakse järgmiselt: $THD_u = \sqrt{\frac{\sum_{n>1} U_n^2}{U_1^2}}$. Vooluharmooniliste kogumoonutused väljendatakse järgmiselt:

$$THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{n>1} I_n^2}{I_1^2}}$$

Efektiivväärtused mittesiinuselise perioodilise signaali korral: $U_{trms} = \sqrt{\sum_n U_n^2}$;

$$I_{trms} = \sqrt{\sum_n I_n^2}$$

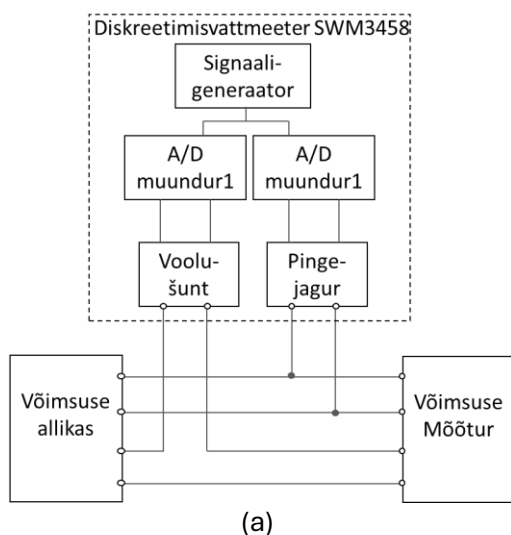
Diskreetimisvattmeeter – diskreetimis põhimõttel toimiv etalonvattmeeter elektrivõimsuse mõõtmiseks.

3. Mõõte- ja abivahendid

Elektrilise võimsuse riigietalon põhineb diskreetimisvattmeetril, mis koosneb neljast põhikomponendist:

- **Analoog-digitaalmuundurid (A/D muundurid):** kaks diskreetimisfunktsiooniga multimeetrit, mida kasutatakse A/D-muunduritena.
- **Pingejagurid:** üheksa etalonlaboris projekteeritud ja valmistatud pingejagurit, millel on väike AC–DC erinevus ja minimaalne faasinihe nimipingetel kuni 1000 V.
- **Voolušundid:** üheksa koaksiaalse ehitusega voolušunti, mille nimivool on kuni 20 A.
- **Andmehõive- ja töötlustarkvara:** etalonlaboris arendatud tarkvara PowerLF 1.2 kasutab mitmeharmoonilist vähimruutude ajadomeeni algoritmi.

Pingejagurite ja voolušuntide konstruktsioon ning hoolikalt valitud komponendid võimaldavad vähendada muundurite AC–DC erinevust, faasinihet, temperatuurimõjusid ja võimsusteguritest tulenevat mõõtemääramatust. Diskreetimisvattmeetri SWM3458 rakendust elektrilise võimsuse mõõturite kalibreerimisel on näidatud joonisel 1.



Joonis 1. Diskreetimisvattmeetri kasutamine elektrilise võimsuse mõõturi kalibreerimisel: (a) mõõteskeem ja (b) mõõtesüsteemi foto.

Tabel 1. Mõõtevahendid elektrilise võimsuse ühiku säilitamisel

Mõõtevahend	Tüüp	Number	Mõõtepiirkond	Laiendmääramatus ($k=2$)
Multimeeter	Keysight 3458A	MY45047495	(0,01...1,2) V $\pm 180^\circ$ (0,04...20) kHz	(25...60) $\mu\text{V/V}$ (0,1..6,0) m°
Multimeeter	Keysight 3458A	MY45047490	(0,01...1,2) V $\pm 180^\circ$ (0,04...10) kHz	(25...60) $\mu\text{V/V}$ (0,1..6,0) m°
Signaali- generaator	Keysight 33210A	MY48007984	(2,5...100) kHz	10 $\mu\text{Hz/Hz}$
Pingejagurite komplekt	RVD1, RVD2, RVD3, RVD4, RVD5, RVD6, RVD7, RVD8, RVD9	VD01, VD02, VD03, VD04, VD05, VD06, VD07, VD08, VD09	(1...1000) V $\pm 180^\circ$ (0,04...10) kHz	(20...160) $\mu\text{V/V}$ (0,2..18,3) m°
Voolušuntide komplekt	MU	SIQ18059, SIQ18060, SIQ17056, SIQ17057, SIQ17058, SIQ17059, SIQ17060, SIQ17061, SIQ17062, SIQ17063, SIQ21030	(0,01...20) A $\pm 180^\circ$ (0,04...10) kHz	(20...50) $\mu\text{A/A}$ (0,2..18,3) m°

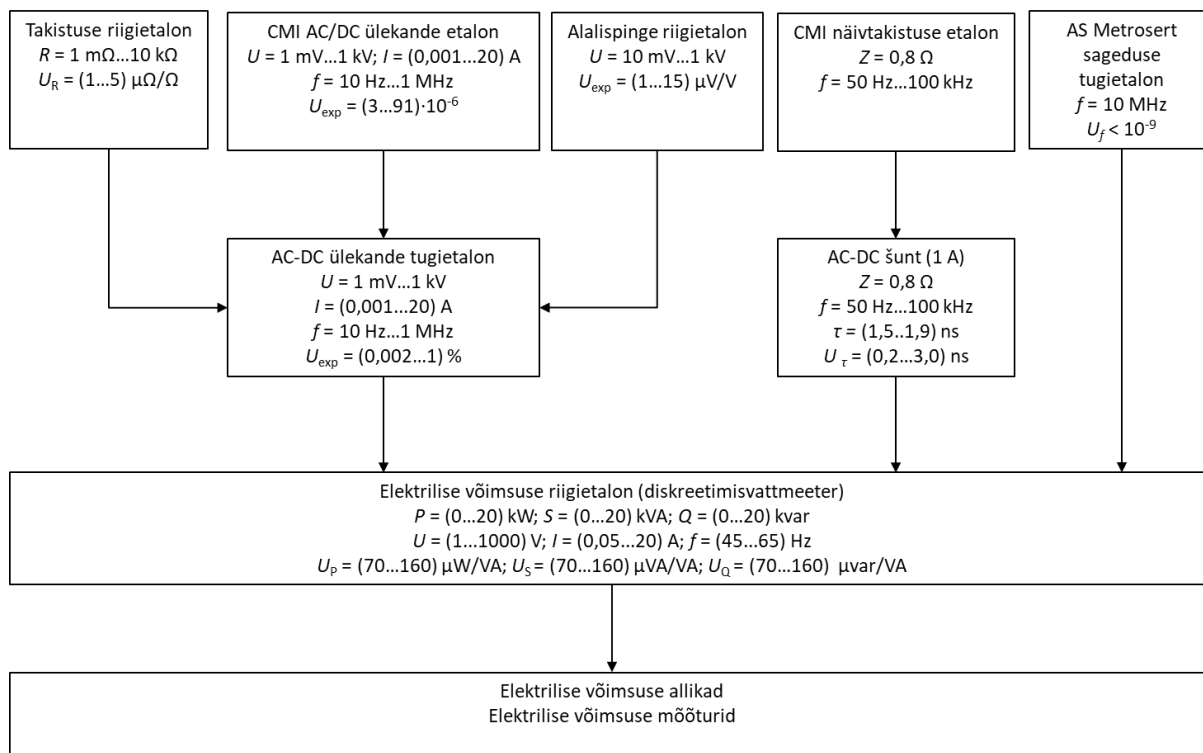
Tabel 2. Abivahendid elektrilise võimsuse ühiku säilitamisel

Mõõtevahend	Tüüp	Number	Mõõtepiirkond
Kalibraator	Fluke 5730A	4191501	22 μV ...1100V 10 Hz...1 MHz 9 μA ...2,2A 10 Hz...10 kHz
Vooluvõimendi	Fluke 52120A	5676703	50 mA...120 A DC...10 kHz
Võimsuse kalibraator	Calmet CP11B	26088	(0,5...560) V 1 mA...120 A (40...500) Hz

4. Jälgitavusahel

Diskreetimisvattmeetri komponendid on kalibreeritud vastavate etalonide suhtes, kasutades astmelist kalibreerimisprotseduuri ja diskreetimismeetodit. Lihtsustatud elektrilise võimsuse mõõtmise jälgitavusahel on esitatud joonisel 2. Mõõtevahendid, mis on vajalikud mõõtmise jälgitavuse tagamiseks, on kalibreeritud Eesti metroloogia keskasutuses AS Metrosert ja Tšehhi metroloogiainstituudis CMI.

Elektrilise võimsuse mõõtmiste jälgitavus



Joonis 2. Elektrilise võimsuse mõõtmise jälgitavuse skeem

5. Mõõtevõime

Elektrilise võimsuse riigietaloni aparatuur võimaldab osutada kalibreerimisteenust tabelis 3 esitatud mõõteulatustes. Kalibreerimisel kasutatakse juhendit KJ/EE-5.1 „Elektrivõimsuse allikad ja mõõturid“.

Tabel 3. Elektrilise võimsuse riigietaloni kalibreerimis- ja mõõtevõime

Mõõdetav suurus	Mõõtepiirkond	Laiendmääramatus ($k = 2$)
Aktiivvõimsus, P^{**}	$(0 \dots 20) \text{ kW}$	$(70 \dots 160) \mu\text{W/VA}$
Näivvõimsus, S^{**}	$(0 \dots 20) \text{ kVA}^{***}$	$(70 \dots 160) \mu\text{VA/VA}$
Reaktiivvõimsus, Q^{**}	$(0 \dots 20) \text{ kvar}$	$(70 \dots 160) \mu\text{var/VA}$

**Elektrilist võimsust (aktiiv-, näiv- ja reaktiivvõimsust) mõõdetakse järgmistes parameetrite vahemikes: elektripinge $(1 \dots 1000) \text{ V}$, elektrivool $(0,05 \dots 20) \text{ A}$, sagedus $(45 \dots 65) \text{ Hz}$, võimsustegur $(1 \dots 0)$.

*** Vahelduvvoolu elektrilise võimsuse mõõtühikutena kasutatakse erinimetusega ühikuid voltamper (V·A) vahelduvvoolu näivvõimsuse ja varr (var) vahelduvvoolu reaktiivvõimsuse tähistamiseks.

6. Etaloni metrooloogilisi omadusi tõendavad dokumendid

Riigietaloni kalibreerimis- ja mõõtevõime on akrediteeritud Eesti Akrediteerimiskeskuse poolt (akrediteerimistunnistus nr K001), Tabel 3.

Mõõtetulemuste töepärasuse kindlustamiseks etalonlabor on edukalt osalenud aastatel 2018-2020 toimunud laboritevahelises võrdlusmõõtmises:

- EURAMET.EM-K5.2018 „KEY COMPARISON OF 50 / 60 Hz POWER“, 2019.

Elektrilise võimsuse riigietaloni aparatuuriga on osaletud järgmistes rahvusvahelistes projektides:

- 15RPT04 TracePQM „Traceability routes for electrical power quality measurements,“ 2016-2019.
- 17RPT03 DIG-AC „A digital traceability chain for AC voltage and current,“ 2018-2022.
- 21NRM02 Digital-IT „Metrology for digital substation instrumentation,“ 2022-2025 .

Elektrilise võimsuse riigietaloni aparatuuriga saadud uurimistöö tulemused on avaldatud eelretsenseeritud teadusajakirjades:

- A. Pokatilov, "A High-Precision and Low-Complexity Framework for Calibration of Stand-Alone Merging Units," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 74, pp. 1-6, 2025, Art no. 1013706, doi: 10.1109/TIM.2025.3590834.
- Ireland, Jane; Reuvekamp, Patrick G; Williams, Jonathan; Peral, David; Diaz de Aguilar, Javier; Sanmamed, Yolander; Šíra, Martin; Mašláň, Stanislav; Rzedkiewicz, Witold; Brzuszewski, Patryk; Sadkowski, G; Sosso, Andrea; Cabral, Vitor; Malmbeck, Helge; Pokatilov, Andrei; Herick, Jonas; Behr, Ralf; Ozturk, Tezgul; Arifovic, Mehedin; Ilić, Damir (2023). A method for using Josephson voltage standards for direct characterization of high performance digitizers to establish AC voltage and current traceability to SI. *Measurement Science and Technology*, 34 (1), 015003.
- A. Pokatilov, T. Kübarsepp and V. Vabson, "Effect of Keysight 3458A Jitter on Precision of Phase Difference Measurement," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 65, no. 11, pp. 2595-2600, Nov. 2016, doi: 10.1109/TIM.2016.2593965.

7. Laboriruum

Elektriliste suuruste mõõtühikute riigietalane säilitatakse ja kasutatakse ASi Metrosert poolt renditud laboris aadressiga Teaduspargi 8, Tallinn.

Allpool on kirjeldatud Teaduspargi 8 elektriliste suuruste mõõtühikute riigietalonide laboriruumi tingimusi.

Üldkirjeldus



Laboriruum külgneb välisseinaga, koridoriga, ning aja ja sageduse laboriga. Laboril on ainult üks sissepääs, selle uks on lukustatav ja juurdepääs on piiratud arvul ASi Metroserdi töötajatel.

Labor on ekraneeritud elektromagnetkiirguse häiringute suhtes vaskplekiga, sumbuvus sageduse piirkonnas 100 MHz-2 GHz on 60 dB.

Labor on jaotatud vaheseinaga kaheks: alalispinge ja elektrilise takistuse etalonide ruum (21,8 m²) ning elektrilise võimsuse etaloni ruum (22,8 m²). Labor on varustatud piisava elektrivõimsusega.

Aknad: Ruumi kõrgus: Juurdepääs laborile:	Laboril aknad puuduvad Laboriruumi kõrgus on 2,4 m Juurdepääsu koridoride laius kitsaimas kohas on 1,6 m
Paiknemine:	2. korrus
Konditsioneerimine	On rakendatud eraldi konditsioneerimine
Temperatuuri seadepunkt/stabiilsus:	Vahemik: 22,0 °C...24,0 °C Stabiilsus: ±1 °C
Suhtelise õhuniiskuse seadepunkt/stabiilsus:	Vahemik: 40 %...50 % Stabiilsus: ±5 %
Labori kogupindala:	44,6 m ²

8. Riigietaloni säilitamise ja kasutamise seotud personal

Elektrilise võimsuse mõõtühiku riigietaloni säilitamisega ja kasutamisega tegeleb Andrei Pokatilov, kes on ASi Metrosert töötaja olnud aastast 2002 (*Curriculum Vitae* vt https://www.etis.ee/CV/Andrei_Pokatilov/est/). A. Pokatilov on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli elektroonika ja biomeditsiinitehnika erialal ning kaitses samas valdkonnas tehnikamagistri kraadi 2003. a. ning filosoofiadoktori (elektroonika) kraadi 2008. a.

A. Pokatilov töötab ASis Metrosert elektriliste suuruste valdkonna vanemteadurina. Ta on läbi katsetanud ja töösse juurutanud kõik elektrilise võimsuse mõõtühiku etaloni koosseisu kuuluvad mõõte- ja abivahendid, erilist rõhku on ta pööranud seadmete töö automatiseerimisele. A. Pokatilov on osalenud lektorina elektriliste mõõtmiste alal mitmel siseriiklikul seminaril ja koolitusel. A. Pokatilov on EURAMETi elektriliste suuruste ning magnetismi tehnilise komitee Eesti esindaja.

9. Riigietaloni säilitamise ja kasutamise tasuvusanalüüs

Aastatel 2023-2025 on Metrosert investeerinud elektrilise võimsuse riigietaloni arendusprojekti raames põhivara ehk seadmete soetamiseks 12 000 eurot ja väikevahendite soetamiseks ca 20 000 eurot, investeerimiseks vajalikud vahendid pärinevad peamiselt majandus- ja kommunikatsiooniministeeriumi teadus- ja arendusrahastusest. Tasuvusanalüüs ei võta arvesse seadmete amortisatsioonikulu, sest investeringuteks vajalikud vahendid on Metroserdile laekunud investeringu tegemise aastal sihtfinantseeringuga.

Elektrilise võimsuse riigietaloniga teenitav tulu koosneb kahest komponendist. Müügitulu hõlmab teenuseid nagu kalibreerimine ja mõõtmine, samuti elektrilise võimsusega seotud konsultatsiooniteenuseid ja ettevõtetele teostatavaid TA-projekte. Tulu teadus- ja arendusprojektidest on rahvusvahelistest taotlusvoorudest laekuv granditulu teadus- ja arendustegevusteks. Prognoosid on tehtud 2025. aasta reaalsete andmete alusel.

Elektrilise võimsuse riigietaloni kulude peamise osa moodustavad tööjõukulud, arvestatud kolmandik teaduri palgakulust, võttes arvesse iga-aastast võimalikku korrektuuri. Teise kulukomponendi moodustavad investeeringud, mis on vajalikud valdkonna edasiseks arendustegevuses. Otsekulude hulgas on erinevad väikevahendid ja materjalid igapäevase töö elluviimiseks. Üldkuludes on lisaks pindade ja administratiivkuludele ka kõik muud kulud, nt tarkvara, side, laborite koristus, elekter ja soojus jne. Üldkulude määraks on arvestatud 25% kuludest. Kulude ja tulude prognoos on esitatud tabelis 4.

Kulude ja tulude prognoos puudutab ainult otseselt AS Metroserdi tegevusega seotud kulusid ja tulusid, kuid ei hõlma tulu, mida saavad AS Metroserdi teenuseid kasutavad ettevõtted paranenud täpsusega kalibreerimisteenuse, TA-nõustamise vms teenuse osutamise tulemusena. See tulu ületab tõenäoliselt oluliselt AS Metroserdi poolt teenitavat otsest tulu teenustest.

Tabel 4. Elektrilise võimsuse riigietaloni tulude ja kulude prognoos

	2026	2027	2028	2029	2030
Tulud	15000	31000	37100	43310	49641
Teenuste müük (konsultatsioon ja mõõteteeenused)	10000	11000	12100	13310	14641
Tulu rahvusvahelistest TA-projektidest	5000	20000	25000	30000	35000
Kulud	-51108	-55696	-60702	-66163	-72121
Valdkonna otsekulud	-8000	-8800	-9680	-10648	-11713
Personaliga seotud kulud	-20886	-22557	-24361	-26310	-28415
Valdkonna arendamiseks vajalikud investeeringud	-15000	-16500	-18150	-19965	-21962
Üldkulud 25% (sh pindadega seotud kulud, admin kulud)	-7222	-7839	-8510	-9240	-10032
Kokku	-36108	-24696	-23602	-22853	-22480