

Töö nr. 1

TERMOPAARIDE KALIBREERIMINE

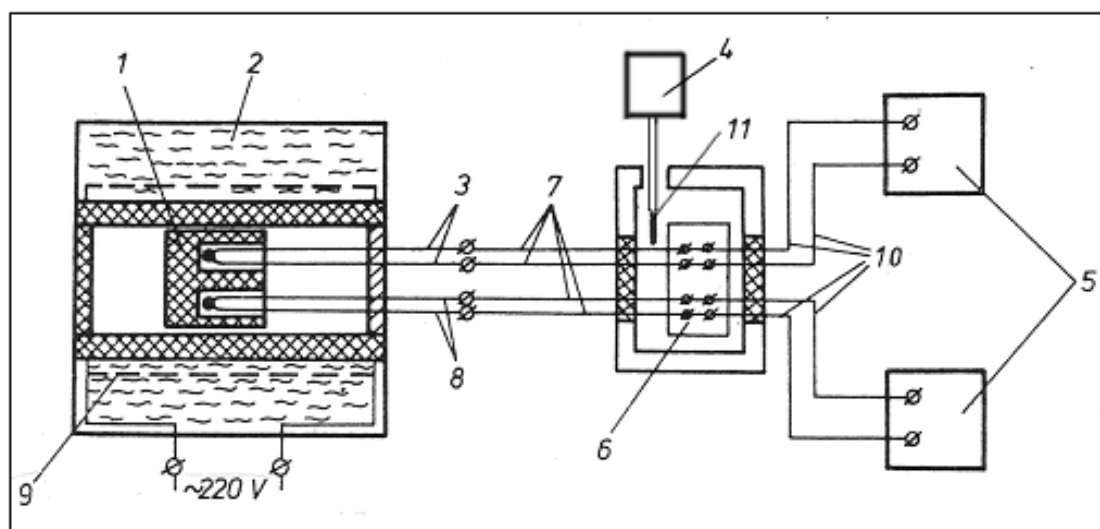
1. Töö eesmärk

Kalibreerida termopaar, määrata tema parand ja laiendmõõtemääramatus.

2. Tööks vajalikud vahendid

1. Elektriahi
2. Võrdlustermopaar (S-tüüpi plaatina-plaatinaroodium termopaar)
3. Kalibreeritav termopaar
4. Pinge mõõtmise riist
5. Takistustermomeeter Pt-100 anduriga
6. Termopikendusjuhtmed
7. Juhtmed termopaaride ühendamiseks termostaadis asuvate pikendusjuhtmete voltmeetrите vahel
8. Termostaat
9. Termopaaride gradueerimistabelid

3. Katseseadme skeem ja tööpõhimõtte kirjeldus



Joonis 1.1. Termopaaride katseseadme skeem: 1 – metallplokk; 2 – elektriahi;
3 – võrdlustermopaar; 4 – Pt-100 mõõteriist; 5 – voltmeeter; 6 – termostateeritud klemmlaud; 7 – termopikendusjuhtmed; 8 – kalibreeritav termopaar; 9 – küttemähis;
10 – ühendusjuhtmed; 11 - Pt-100 andur

Mõõtetulemuste jälgitavuse ja usaldusväarsuse saavutamiseks kontrollitakse mõõtevahendeid tüübikinnituse, taatlemise ja kalibreerimise teel. Kalibreerimine on kontrolli liik, millele allutatakse etalonid. Töömõõtevahendite kalibreerimine ei ole kohustuslik (Väljavõte Eesti mõõteseadusest).

Kalibreerimine on menetlus, mis fikseeritud tingimustel määrab seose mõõtevahendi näidu ja etaloni abil realiseeritud suuruse vastava väärtuse vahel. Antud laboratoorses töös püütakse kalibreerida tööstuslikult toodetud standardset termopaari.

Termopaaride tööstuslikul tootmisel peab tootja tagama termopaari vastavuse kindlale sõltuvusele mõõdetava temperatuuri ja termopaari termoelektromotoorjõu vahel (võimalike kõikumistega lubatud hälvete piires).

Standardtermopaaride sõltuvus termoelektromotoorjõu ja temperatuuri vahel antakse gradueerimistabelitena. Seeriaviisiliselt toodetavate termopaaride korral tootja termopaaride individuaalset kalibreerimist läbi ei vii, käesoleva töö käigus püütakse teha kindlaks konkreetse termopaari korral sõltuvust temperatuuri ja kalibreeritava termopaari termoelektromotoorjõu vahel. Loomulikult peab tulemus olema küllalt ligilähedane selle termopaari standardgradueeringuga. Katse võimaldab määrata sellise termopaari mõõtmisvead (mõõtehälbed) standardse gradueeringu suhtes ja selgitada kas konkreetse termopaari hälbed jäävad lubatud hälvete piiridesse või mitte.

Termopaaride kalibreerimisel määratakse katseliselt nende termo-elektromotoorjõu E sõltuvus temperatuurist. Tegelikku temperatuuri mõõdetakse suure täpsusega termomeetri vahendusel. Antud töös kasutatakse mõõdetava temperatuuri andurina suure täpsuse ja stabiilse karakteristikaga plaatina-plaatinaroodium (gr. S) termopaari. Gradueeritavaks termopaariks võib olla mis tahes gradueeringuga standardne või mittestandardne termopaar. Antud töös katsetatakse (kalibreeritakse) kromell-alumel termopaari (gr K). Töö käigus mõõdetakse temperatuuri ahju metallplokis, fikseerides samaaegselt nii plaatina-plaatinaroodium kui ka kalibreeritava termopaari elektromotoorjõud, kusjuures termopaaride külmiited hoitakse termostateeritud.

Kalibreeritava termopaari 8 (joonis 1.1) ja võrdlustermpaari 3 kaitsehülssist vabastatud kuumliited on asetatud elektriahjus 2 oleva metallplokki 1 kanalitesse. Metallplokki ülesanne on vältida temperatuurivälja ebaühtlust ahju ristlõikes termopaaride kuumliidete juures. Termopaaride ahjust väljaviigu ava on tihendatud. Termopaaride külmiited on viidud ahjust eemale termopikendusjuhtmete abil termostateeritud klemmlauale 6. Külmiidete temperatuuri mõõtmiseks on termostaadis Pt-100 takistustermomeeter 4. Termopaaride poolt genereeritud termoelektromotoorjõudu mõõdetakse voltmeetritega 5. Elektriahju temperatuuri reguleerimiseks kasutatakse firma OMRON elektroonilist automaatregulaatorit BS1200.

Ahju elektriline toide lülitatakse sisse ahju esipaneelil paikneva lüliti abil, süttib kontroll-lamp. Ahju toite sisselülitamisel antakse elektriline toide ka OMRON BS1200 tüüpi automaatregulaatorile, mis peale lühiajalise kontrolltesti (*selftest*) läbiviimist on valmis tööks. Ahju kütteelement saab elektrilise toite temperatuurireguleerimise süsteemi kaudu. Vajalik temperatuur ahjus antakse ette, vajutades nooltega nuppe. Peale etteande temperatuuri sisestamist tuleb see fikseerida ENTER nupuga. Regulaatori tablool on kuvatud kaks arvulist näitu, need on etteande temperatuur (kuvatatakse punasena) ja tegelik temperatuur anduri paigalduskohas (kuvatatakse rohelisena). Regulaatoriga ühendatud temperatuuriandur on paigaldatud mõõtmaks ahju keraamilise toru temperatuuri. Selle keraamilise toru ümber paikneb elektriline kütteelement, keraamilise toru sisse on aga paigaldatud metallplokk võrdlus- ja kalibreeritava termopaariga.

Temperatuuriregulaator töötab pulseerivas režiimis, s.o. korduvate sisse/välja lülitumistega. Ahju soojusliku inertsiga tõttu stabiliseerub temperatuur aeglaselt

etteantud väärtuse juures. Antud ahju lubatav maksimaalne töötemperatuur, mida ei tohi kalibreerimise käigus ületada, on 1000 °C.

4. Töö käik

Täpse töö läbiviimise käigu annab juhendajaga. On oluline, et ahju temperatuur fikseeritakse termilise tasakaalu olekus.

5. Katseandmete töötlemine

Mõõtmistulemused koondatakse tabelisse 1.1. Mõõdetud termoelektromotoorjõu järgi leitakse temperatuur termopaari gradueerimistabelist. Standardtermopaaride gradueerimistabelid on koostatud tingimusel, et termopaari külmlüüte temperatuur on 0 °C. Vastasel juhul saadakse voltmeetriga mõõtes termopaari kuumliites ja külmlüütes tekkivate kontaktpotentsiaalide vahe ($E' = E - \Delta E$, mV). Termopaari kuumliite tegeliku temperatuuri leidmiseks tuleb määrata külmlüüte temperatuuri parand (mV) sõltuvalt külmlüüte temperatuurist. Parand ΔE leitakse külmlüüte takistustermomeetri mõõdetud temperatuuri t_{kl} järgi termopaari gradueerimistabelist. Tegelikult temperatuuriks loetakse kontrolltermopaariga mõõdetud temperatuur t . Igal kalibreerimise temperatuuril saadud mõõtmistulemustest võetakse keskmine.

Katse tulemused võimaldavad määrata gradueeritava termopaari mõõtemääramatuse ja parandi. K-tüüpi termopaaride klassifitseeritakse järgnevalt:

Klass 1: 1,5°C või 0,4% näidust (kumb on suurem) vahemikus –40...1000 °C

Klass 2: 2,5°C või 0,75% näidust (kumb on suurem) vahemikus –40...1200 °C

Kalibreerimisel korralike seadmetega saadakse kalibreeritava temperatuurianduri mõõtemääramatus tavaliselt kuskil 3 korda suurem, kui kasutatud etalonil ehk antud juhul S-tüüpi termopaaril.

Kalibreeritava termopaari parand (°C) leitakse valemiga

$$\Delta t = t - t_1 \quad ^\circ\text{C} \quad (1.1)$$

kus t – võrdlustermopaari mõõdetav ahju tegelik temperatuur, °C;

t_1 – kalibreeritava termopaariga mõõdetav ahju temperatuur, °C,
ja parand millivoltides (mV) leitakse

$$\Delta E = E_0 - E_1 \quad \text{mV} \quad (1.2)$$

kus E_0 – kalibreeritava termopaari emj. ahju temperatuuril t (gradueerimistabeli järgi);

E_1 – kalibreeritava termopaari emj ahju temperatuuril t mõõdetuna võrdlustermopaariga.

Mõõtemääramatus saab arvutada kahel moel: statistiliselt ja kasutades mõõtmisel kasutatavate seadmete mõõtemääramatust.

Statistiliselt määraes eeldatakse, et katsetamise käigus ühel temperatuuril saadud väärtused hajuvad Studenti jaotuse järgi. Esiteks tuleb leida mõõtmiste standardhälve

$$\sigma_{st} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum (t_{li} - \bar{t}_1)^2} \quad ^\circ\text{C}, \quad (1.3)$$

kus N – ühel temperatuuril tehtud mõõtmiste arv;
 t_{li} – i -ndal mõõtmisel mõõdetud temperatuuri väärtus, $^\circ\text{C}$;
 \bar{t}_1 – mõõtmistel saadud keskmine temperatuur, $^\circ\text{C}$.

Tabelist üks leitakse Studenti tegur t vastavalt vabadusastmele ν ja 95% usaldatavustasemele, mida tavaliselt kasutatakse

$$\nu = N - 1 \quad (1.4)$$

Statistilise laiendmõõtemääramatus saab sel juhul arvuta

$$U_{st} = t_{st} \sigma_{st} \quad ^\circ\text{C} \quad (1.5)$$

Mõõtmisel kasutatavate etalonide ja mõõteriistade mõõtemääramatusi kasutades saab summaarse mõõtemääramatuse arvutada võttes arvesse kõik tekkivaid sõltumatuid mõõtemääramatusi järgnevalt

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \dots + \sigma_j^2}, \quad (1.6)$$

kus σ_j – erinevad mõõtemääramatuse komponendid.

Kalibreerimisel kasutatud seadmete mõõtemääramatused on toodud ära tabelis 1.2.

Mõõteriista resolutsioonist ehk lahutusvõimest tekkiv mõõtemääramatus

$$\sigma_{res} = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{N_{ja}}, \quad (1.7)$$

kus V_{\max} – mõõteriista maksimaalne mõõdetav suurus kasutatud mõõtepiirkonnas;
 V_{\min} – mõõteriista minimaalne mõõdetav suurus kasutatud mõõtepiirkonnas;
 N_{ja} – mitmeks osaks jagab mõõteriista analoog-digitaalmuunduri mõõtepiirkonna või pool jaotise väärtusest, kumb on suurem.

$$N_{ja} = 2^b \quad (1.8),$$

kus b – mõõteriista analoog-digitaalmuunduri bittide arv, bit.

Laiendmõõtemääramatus usaldatavusega 95% on

$$U_k = k\sigma \quad (1.9),$$

kus k – on kattetegur, 95% usaldatavuse juures on $k=2$.

Kõik valemissse 1.6 sisestatavate suuruste väärtused ja nende nimetused kanda aruandes tabelisse.

Kalibreerimistulemused kantakse tabelisse 1.4.

Joonestada graafik mõõtetulemuste sõltuvusest ajast $t, t_1=f(\tau)$.

Anda hinnang termopaari kalibreerimisele ja saadud tulemustele.

Tabel 1.1 Mõõtmistulemuste tabel

Aeg τ	Võrdlustermpaar (gr. S)			Kalibreeritav termopaar (gr. K)			Termopaari külmliid		Termopaari parand		
	Lugem E'	Tegelik termoemj. $E = E' + \Delta E$	Temperatuur t	Lugem E'_1	Tegelik termoemj. $E_1 = E'_1 + \Delta E_1$	Temperatuur t_1	Temperatuur t_{kl}	Parand		$\Delta t = t - t_1$	$\Delta E = E_0 - E_1$
								gr. S	gr. K		
								ΔE	ΔE_1		
s	mV	mV	°C	mV	mV	°C	°C	mV	mV	°C	mV

Tabel 1.2 Katsetes kasutatud seadmete laiendmõõtemääramatused

Suurus	Tähis	Ühik	Väärtus	Usaldatavustase
Voltmeetri mõõtemääramatus**	$k\sigma_{vm}$	%*	0,04	95%
Võrdlustermpaari mõõtemääramatus	$k\sigma_{vtp}$	%*	0,15	95%
Temperatuuri ebäühtlus kalibraatoris	$k\sigma_{ek}$	°C	0,3	95%
Temperatuuri ebäühtlus külmliid termostaadis	$k\sigma_{eklt}$	°C	0,2	95%
Külmliid temperatuuri mõõtmise anduri mõõtemääramatus	$k\sigma_{kla}$	%*	0,12	95%
Külmliid temperatuuri mõõtv mõõteriista mõõtemääramatus***	$k\sigma_{klm}$	%*	0,05	95%

*mõõtemääramatuse ühik on protsenti mõõtepiirkonnast

**Termoelektrimotoorjõudu mõõdab firma Omega WB-AAI-8 arvutiliides on 16bitine, kasutatav mõõtepiirkond on -5 kuni 50mV

***Nokeval 2021 mõõtepiirkond Pt-100 anduri korral -200 kuni 700°C, lahutusvõime 16bit, mõõdetava takistuse (Ω) teisendamisel temperatuuriks (°C) Pt-100 gradueeringu järgi tekkiv määramatus lineariseerimisest $\sigma_1 < 0,07^\circ\text{C}$,

Tabel 1.3 Studenti tegurid

v	Usaldustase					
	80%	90%	95%	98%	99%	99.8%
1	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	318,310
2	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	22,327
3	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	10,215
4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	7,173
5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	5,893
6	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,208
7	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,786
8	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	4,501
9	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,297
10	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,144
11	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,025
12	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,930
13	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,852
14	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,787
15	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,733
16	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,686
17	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,646
18	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,610
19	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,579
20	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,552
21	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,527
22	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,505
23	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,485
24	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,467
25	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,450
26	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,435
27	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,421
28	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,408
29	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,396
30	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,385
40	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,307
60	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,232
120	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	3,160
∞	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,090

Tabel 1.4 Kalibreerimistulemuste tabel

Meetod	Parand		Laiendmõõtemääramatus usaldatavusega 95%	
	°C	mV	°C	mV
Statistiline				
Mõõtmisel esinevaid mõõtemääramatusi kasutades				

Termopaaride gradueerimistabelite kasutamise näide

Millivoltmeeter näitab K-tüüpi termopaari termopinget 2,02 mV külmlite temperatuuril +24 °C

Lahendus:

- 1) tabelist Lisa 3 leiame, et +24 °C vastab termopinge 0,96 mV;

- 2) summeerime külm- ja kuumliite termopinged: $0,96 + 2,02 = 2,98$ mV;
- 3) tabelist Lisa 3 leiame, et $+73$ °C vastab termopinge $2,975$ mV ja 74 °C $3,016$ mV;
- 4) termopingele $2,98$ mV vastab seega temperatuur $73 + (2,98 - 2,975) / (3,016 - 2,975) = 73,1$ °C

6. Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Millistele põhinõuetele peavad vastama termopaaride materjalid?
2. Tutvuda tööstusliku termopaari konstruktsiooniga.
3. Mis on termoelektriliste termomeetrite (termopaaride) põhilised eelised ja puudused?
4. Selgitada külmiite parandi sisseviimise korda.
5. Milleks on vajalikud termopikendusjuhtmed? Millistele nõuetele need peavad vastama?
6. Nimetage mõned standardsed ja kasutatavamad mittestandardised termopaarid.
7. Millised tegurid vähendavad termoelektriliste termomeetrite (termopaaride) täpsust?
8. Mis on termopatarei ja diferentsiaaltermopaar?

7. Kirjandus

1. Kull, A. Soojustehnilised mõõtmised. Tallinn: Valgus, 1974.
2. Soojustehnika käsiraamat. Tallinn: Valgus, 1977.
3. Мурин Г. Теплотехнические измерения. Москва: Энергия, 1979.
4. Laaneots, R., Mathiesen O. Mõõtmise alused. TTÜ Kirjastus. Tallinn. 2002, 206 lk.