

HOMOGEENSE LIKUVUSSPEKTROMEETRI KONSTANDID JA SIGMA KALIIBRIMINE

1. TEOORIA

1.1. Tähistused ja standardmõõtühikud

\log – kümnendlogaritm,

n – ionide numberkontsentratsioon, e/cm^3 ,

Z , Z_m ja Z_0 – liikuvus, monomobiilsete ionide liikuvus ja spektromeetri ülekandefunktsiooni referentsliikuvus, $cm^2V^{-1}s^{-1}$,

$f_Z - dn/dZ$, $(e/cm^3) / (cm^2V^{-1}s^{-1})$,

$f_{\log Z} - dn/d\log Z$, e/cm^3 ,

y – signaal ehk elektromeetri sisendvool, e/s ,

U ja U_0 – ventilaatori toitepinge ja selle normaalväärtus,

Q ja Q_0 – totaalne õhukulu ja selle normaalväärtus (indeks $_0$ märgib väärtust ventilaatori normaaltoitepinge korral), cm^3/s ,

kQ – ionivoogu kandev ehk kasulik õhukulu (k on õhukulude suhe), cm^3/s ,

ADC – mõõteploki digitaalne väljund,

VF – liikuvuskalibratsiooni määrav pingetegur,

CF – kontsentratsioonitegur,

1.2. Liikuvus ja mõõtekondensaatori pinge

Referentsliikuvus Z_0 ja ADC ühikutes mõõdetud tõukeelektroodide pinge ADC_{HV} on teineteisega täpselt pöördvõrdelised:

$$ADC_{HV} = VF / Z_0.$$

Võrdetegur VF on võrdeline totaalse õhukuluga. Kui ventilaatorit toitepinget muuta, siis õhukulu muutub esimeses lähenduses võrdeliselt pingega ja

$$VF = VF_0 \times (Q / Q_0) \approx VF_0 \times (U / U_0)$$

kus pingetegur VF_0 on võrdeteguri VF väärtus normaalõhukulu puhul. Pingeteguri väärtust on võimalik mõõtekondensaatori geometriat ja õhukulu teades üsna täpselt arvutada.

1.3. Ülekandefunktsioon ja standardlahutusvõime

Allpool märgib lisaselgitusteta termin *ülekandefunktsioon* alati normeeritud aparaadifunktsiooni $g(Z_0, Z_m)$ mis näitab, kui suurt osa kasuliku õhuvoo poolt kantud monomobiilsetest ionidest kasutatakse signaali y tekitamiseks. Z_0 on aparaadi parameeter ja Z_m on monomobiilsete ionide liikuvus. Funktsiooni $g(Z_0, Z_m)$ võimalikud väärtused jäävad vahemikku (0...1). Argumendi Z_0 asemel võib esimese argumendina vaadelda ka mõõtekondensaatori pinget. Lineaarse spektromeetri ülekandefunktsioon on pinge ja ionide liikuvuse Z_m järgi lõiklineaarne, pingega pöördvõrdelise argumendi Z_0 järgi aga ebalineaarne. Ülekandefunktsiooni efektiivlaidus on

$$\Delta Z_g = \int g(Z_0, Z) dZ.$$

Referentsliikuvust on soovitatav defineerida nii, et see võrduks ülekandefunktsiooni keskmise liikuvusega $Z_0 = \int Z g(Z_0, Z) dZ / \Delta Z_g$. Ülekandefunktsiooni standardlahutusvõime on referentsliikuvuse ja ülekandefunktsiooni laiuse suhe

$$\mathcal{R}_g = Z_0 / \Delta Z_g.$$

Kirjandusest rohkem tuntud tavalahutusvõime $\mathcal{R}_{\text{tava}}$ on aga referentsliikuvuse suhe ülekandefunktsiooni laiusesse selle poolkõrgusel. Ristkülikülekandefunktsiooni ja kolmnurkülekandefunktsiooni $\mathcal{R}_{\text{tava}} = \mathcal{R}_g$, Gaussi ülekandefunktsiooni puhul aga $\mathcal{R}_{\text{tava}} \approx 0.94 \mathcal{R}_g$.

Spektromeetri tegelik lahutusvõime oleneb lisaks veel spektri skaneerimise ja signaali töötlemise meetoditest ning võib erineda eelpool defineeritud ja ainult ülekandefunktsiooni ise-loomustavast lahutusvõimest.

1.4. Fraktsioonikontsentratsioonide arvutamine

Kollektor püüab monomobiilsete ionide kontsentratsioonist n osa g (Z_0, Z_m) ja vastav signaal on y (Z_0) = kQ g (Z_0, Z_m) n . Polümobiilsete ionide liikuvusjaotust kirjeldab $f(Z) = dn / dZ$ ja

$$y(Z_0) = kQ \int g(Z_0, Z) f(Z) dZ.$$

Fiktiivse lamejaotuse $f(Z) = c$ korral on kollektorile püütud ionide kontsentratsioon $c\Delta Z_g$ ja $y = kQ c\Delta Z_g$. Siit järeldub $c = y / (kQ \Delta Z_g)$. Kitsa fraktsiooni sees võib eeldada lamejaotust $c = n(Z_1, Z_2) / \Delta Z$, kus $n(Z_1, Z_2)$ on fraktsioonikontsentratsioon ja $\Delta Z = Z_2 - Z_1$, ning avaldada

$$n(Z_1, Z_2) = c\Delta Z = \frac{\Delta Z}{kQ \Delta Z_g} y.$$

Ülekandefunktsiooniga kooskõlastatud fraktsiooniskeemi korral valitakse fraktsioonilaiused ülekandefunktsiooni laiusega võrdsed, mille puhul $n(Z_1, Z_2) = y / kQ$. Nii talitataksegi lihtsa geomeetriaga spektromeetri BSMA puhul. Üldjuhul võib aga esituslahutusvõimet määrava laiuse ΔZ valida suvaliselt. Esituslahutusvõime

$$\mathcal{R}_p = Z_0 / \Delta Z$$

võib olla ülekandefunktsiooni lahutusvõimest nii väiksem kui suurem. Kui fraktsioonilaius avaldada esituslahutusvõime kaudu, siis saame

$$n(Z_1, Z_2) = \frac{Z_0}{kQ \mathcal{R}_p \Delta Z_g} y = \frac{\mathcal{R}_g}{kQ \mathcal{R}_p} y$$

Mõõtmisprogrammis kasutamiseks on otstarbekas asendada signaal y elektromeetri lugemiga ADC_E ühikutes ja kirjutada

$$n(Z_1, Z_2) = CF_p \times ADC_E,$$

kus CF_p on esitusest olenev kalibratsioonikonstant

$$CF_p = \frac{\mathcal{R}_g}{kQ \mathcal{R}_p} C_{ADCE}.$$

Teisenduskordaja C_{ADCE} näitab, mitu elementaarlaengut sekundis vastab ühele ADC astmele.

1.5. Jaotusfunktsiooni arvutamine

Jaotusfunktsiooni keskmine väärtus fraktsiooni piirides on

$$f_Z(Z) = \frac{dn}{dZ} \approx \frac{n(Z_1, Z_2)}{\Delta Z} = \frac{y}{kQ \Delta Z_g} = \frac{\mathcal{R}_g}{kQZ} y$$

Logaritmilise jaotusfunktsiooni väärtuse hinnang on

$$f_{\log Z}(\log Z) = \frac{dn}{d \log Z} = Z \ln 10 \frac{dn}{dZ} = \ln 10 \frac{\mathcal{R}_g}{kQ} y$$

Tegur $\ln 10 \mathcal{R} / (kQ)$ on aparaadikonstant. Mõõtmisprogrammis on otstarbekas kirjutada

$$f_{\log Z} = CF_{\log Z} \times ADC_E.$$

kus kontsentratsiooniteguri arvutatakse järgmiselt

$$CF_{\log Z} = \ln 10 \frac{\mathcal{R}_g}{kQ} C_{ADCE}.$$

2. SIGMA projekteerimisaegne eelkalibratsioon

2.1. SIGMA mõõtekondensaatori projekteerimisparameetrid

- õhuvoolu kiirus elektroodivabas ristlõikes 145 cm/s,
- ristlõige $9 \times 24 = 216 \text{ cm}^2$,
- õhukulu 31.32 l/s,
- ioone kandva ja totaalõhukulu suhe ühtlase profiili korral sisendis 0.12,
- ülekandefunktsiooni standardlahutusvõime 4.

2.2. Liikuvusele vastav pinge

SIGMA arvutusmudel leiab mõõtekondensaatori elektrivälja Laplace'i võrrandi järgi ning arvutab õhuvoolu ühtlast profiili eeldades ioonitrajektorid ja ülekandefunktsiooni. Arvutuse *test2* tulemus on $Q = 31300 \text{ cm}^3/\text{s}$ ja $V = 90 \text{ V}$ puhul $Z_0 = 1.01 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. Pinge V antakse ADC sisendile üle $50 \text{ M}\Omega + 75 \text{ k}\Omega$ pingejagaja. 5 voldile $75 \text{ k}\Omega$ takistil vastab tõukeelektroodi pinge $5 \times 50075 / 75 = 3338 \text{ V}$ ja ADC lugem 32767. Tõukeelektroodi 1 V on 9.82 ADC_{HV} ja 90 V on 883 ADC_{HV} . Ühikliikuvusele vastab pingetegur $\text{VF}_0 \approx 890$.

2.3. Liikuvuskalibratsiooni kasutamine mõõtmisprogrammis

Eeltoodud mudelarvutus on tehtud staatilise režiimi jaoks. Õhu liikumiseks kallutamistsooni keskelt elektroodini kulub projektikohase õhuvoolu puhul ca 75 ms. Elektromeetri silumisahel lisab sellele viite ca 310 ms, mis teeb ühendatud viiteajaks ligi 0.4 s. Mõõtekondensaatori pinge relaksatsiooni ajategur on ca 3600 ms ja elektromeetri signaal vastab $\exp(0.11) \approx 1.11$ korda suuremale pingele, kui seda registreeriti koos elektromeetri signaaliga.

Mõõtekondensaatori pinge relaksatsiooniaeg võib kõrgepingekondensaatori vananedes muutuda. Sellepärast eeldab mõõtmisprogramm, et kalibratsioonifailis näidatakse eraldi kahte liikuvuskalibratsiooni parameetrit: viitevaba protsessi pingeteguri väärtust *volt_factor* ja kompleksviiteaega *delaytime*. Programm korrigeerib mõõtmispinget arvestades näidatud viiteaega ja mõõdetud toitepinge ning normaaltoitepinge suhet..

2.4. Arvutuslik kontsentratsioonikalibratsioon

Vool $1 \text{ e/s} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ A}$ tekitab SIGMA elektromeetri sisendis pinge $8.01 \times 10^{-10} \text{ V}$ ja väljundis $4.005 \times 10^{-8} \text{ V}$. Ühele ADC astmele vastab $5 / 32767 = 1.526 \times 10^{-4} \text{ V}$ ja siit SIGMA $C_{\text{ADCE}} = 3810$. SIGMA arvutuslik $R_g \approx 4$, $k = 0.12$ ja esituslahutusvõime 16 fraktsiooni dekaadis skeemi puhul on ca 7. Siit arvutuslik kontsentratsioonifaktor kuuteistmendikdekaadfraktsioonide jaoks $\text{CF}_p = (4 / (0.12 \times 31300 \times 7)) \times 3810 \approx 0.58$. Logaritmilise jaotusfunktsiooni kontsentratsioonitegur $\text{CF}_{\log Z} = 2.3 \times (4 / (0.12 \times 31300)) \times 3810 = 9.3$ on eelmisest ca 16 korda suurem.

Eeltoodud arutlustes ei vaadeldud õhukulu sõltuvust toitepingest ja ionide adsorptsioonikadu sisendvõre ja filtri läbimisel. Vastavad parandused teeb mõõtmisprogramm võttes arvesse toitepinge ja meteoparameetrite mõõtmistulemusi.

3. SIGMA eksperimentaalne kaliibrimine

3.1. Eksperimentaalne kontsentratsioonikalibratsioon

Arvutusliku kontsentratsioonikalibratsiooni jaoks tarvilike suuruste k ja ΔZ_g mõõtemääramatused on üle kümne protsendi ja selle tõttu ei ole tulemused täpsed. Kalibratsiooni täpsustamiseks oleks võrdlusriistaks tarvis täpselt kalibreeritud integraalset loendurit ja soovitatavalt ka vähemalt $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ homogeenelt ioniseeritud õhku tootvat allikat või elektriväljadest vaba ühtlaselt ioniseeritud ruumi. Allkirjeldatud katsed on tehtud tagasihoidlikes tingimustes.

3.2. Kahe SIGMA võrdlemine

Katse tehti 2–3. veebruaril auditooriumis 207 loomuliku ionisatsiooni tingimustes

Suurus	Tartu SIGMA	Soome SIGMA	Suhe
Programmiversioon	20101201	20110214	
Kalibratsiooniandmed	20101026	20110214	
volt_factor	885	900	
conc_factor +	11.5	6.1	
conc_factor –	11.5	6.3	
standardadsorption	0.051	0.049	
filtermobility	0.04	0.03	
n+	1777	1113	1.596
n–	1544	1019	1.515
Z+	1.398	1.362	1.026
Z–	1.653	1.724	0.959

3.3. SIGMA, BSMA ja loendurite võrdlemine

Kalibratsiooni saab täpsustada SIGMA ja teiste aparaatidega üheaegselt tehtud võrdlusmõõtmiste abil. Kirjeldatav katse tehti 9. märtsil ruumis 2010. Põhikatse ajal ioniseeriti õhku ruumi ühes nurgas beeta kiirgusega ja ioniseeritud õhk hajutati ruumi ventilaatori abil. Abikatse tehti ilma lisaionisatsioonita. Lõplikuks mõõtmistulemuseks loeti põhikatse ja abikatse tulemuste vahe. Kuna abikatse ioonikontsentratsioonid olid alla 10% põhikatse kontsentratsioonidest, siis lahutamise mõju mõõtmistäpsusele pole oluline.

SIGMA näit oli 12934. Teiste riistade näidud, nende keskmine ja SIGMA näidu suhe teise riista näitu

Riist	Näit	SIGMA suhe
Loendurite keskmine	6076	2.13
BSMA2	8794	1.47
BSMA3	7532	1.72
keskmine	7467	1.73

Järeldus: SIGMA kontsentratsioonitegur 11.5 oli ilmselt ca 1.7 korda üle hinnatud. Parandatud väärtus võiks olla 6.7 või 6.8.

3.4. Eksperimentaalne liikuvuskalibratsioon

Eksperimentaalseks kaliibrimiseks on tarvis kas usaldusväärset ja täpsemalt kaliibritud liikuvusmõõteriista või täpselt teada oleva liikuvusega ionide allikat. Täpne võrdlusinstrument puudub. Jaan Salmi konstrueeritud ja 70-ndate aastate alguses veel lammutamata aparaadi abil mõõdeti negatiivsete ionide liikuvuseks joodilisandiga õhus normaalarõhul ja 25°C juures $1.9 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ (1975. a. kogumikus nr. 348 publitseeritud väärtus 1.75 on Langevini meetodi abil standardtingimustele taandatud liikuvus).

Kahjuks sõltub ionide koostis joodilisandiga õhus oluliselt teistest lisanditest ja katse on halvasti korratav. SIGMA kalibratsioonikatsete tulemuste erinevus teoreetilisest kalibratsioonist on seni jäänud mõõtemääramatuse piiridesse.

Riist	Z+	Z–
SIGMA	1.39	1.68
BSMA2	1.44	1.78
BSMA3	1.28	1.66

Pingetegurit võib korrigeerida riistade võrdlusmõõtmiste alusel. Selle juures peab silmas pidama, et pingeteguri suurendamine suurendab keskmise liikuvuse mõõtmistulemust. 2012. aasta 9. märtsil tehtud kergete ionide mõõtmise võrdluskatse tulemused on kõrval tabelis. Need tulemused ei anna alust SIGMA liikuvuskalibratsiooni korrigeerimiseks.

4. SIGMA kronoloogia

2008 teine poolaasta – SIGMA projekteerimisarvutused.

2009 aprill ja mai – SIGMA valmistamine.

20090529 – Katsed reguleeritavate õhupiludega. Õhukulu mõõdetud 36600 ehk 6100 cm³/s pilumillimeetri kohta. BSMA kogemus oli 6060 pilumillimeetri kohta.

20090602 – $Q = 36600$ puhul kalibratsioonihinnang $w = 1.75$.

Kalibratsiooniparameetrid olid Q , $flowfraction_pos$, $_neg$.

20090621 – 20090715 mõõtmised Tammemäel. Kalibratsioon 35000, 0.15, 0.15.

Loenduriga võrdlemine Tammemäel.

20090726 – 20091001 mõõtmised Tammemäel. Kalibratsioon 36000, 0.177, 0.176.

20091207 – võeti kasutusele kuue 2 mm piluga vahesein.

20091214 – mõõdeti $Q = 39000$. Flowfraction hinnang loenduriga võrdlemise katsete järgi $pos = 0.122$, $neg = 0.108$, projektväärtus peaks olema 0.125.

20100315 – uus ja täpsem kuue piluga vahesein ning tõmberibide ploki korrektsioon.

20100323 – mõõdetud õhukulu 23.5 V toite puhul $Q = 34500$.

uus kalibratsioon ($volt_factor$, $conc_factor+$, $conc_factor-$) 985, 6.7, 6.6.

20100401 – 20100708 regulaarmõõtmised Tartus Kalibratsioon 985, 6.7, 6.6.

20100630 – augureaga vaheseina joonis.

20100809 – augureaga vaheseina katsed.

20100902 – õhukulu mõõdetud 31000.

20100902 – loenduriga võrdlemine (hiljem selgus, et loendur oli vigane).

Katseid alustati hüpoteetilise kalibratsiooniga 871, 8, 8.

Tulemus $Q = 31$, $CF+ = CF- = 11.5$, $VF = 885$.

20100924 – 20111108 regulaarmõõtmised Tartus Kalibratsioon 885, 11.5, 11.5.

20110121 – SIGMA2 esimene testmõõtmine.

Kalibratsioonid:

35000, 0.15, 0.15 kasutusel kuni 20090715.

36000, 0.177, 0.176 kasutusel 20090726–20091214.

985, 6.7, 6.6 kasutusel 20100401–20100708.

885, 11.5, 11.5 kasutusel 20100924–20111108.