

TARTU ÜLIKOOL
Füüsika-Keemiateaduskond
Keskkonnafüüsika instituut

JANEK UIN

**DIFERENTSIAALSE LIIKUVUSANALÜSAATORI
ÜLEKANDEFUNKTSIOONI MÄÄRAMINE KAHE
AEROSOLIANALÜSAATORI EKSPERIMENDIS**

Magistritöö
Rakendusfüüsika eriala

Juhendajad:
vanemteadur, f-m. kand. EDUARD TAMM
vanemteadur, PhD AADU MIRME

Tartu 2005

SISUKORD

SISSEJUHATUS	4
1 AEROSOLID. AEROSOLIOSAKESTE SUURUSJAOTUS JA SELLE MÕÕTMINE	6
1.1 Aerosooli liigitus	6
1.2 Aerosoolide kirjeldamine	7
1.3 Aerosooliosakeste jaotused	8
1.4 Aerosooliosakeste elektrilise liikuvuse analüüs	9
1.5 Diferentsiaalne liikuvusanalüsaator	12
2 DIFERENTSIAALSE LIIKUVUSANALÜSAATORI ÜLEKANDEFUNKTSIOON	15
2.1 Ideaalne ülekandefunktsioon	15
2.2 Reaalne ülekandefunktsioon	17
3 EKSPERIMENDI LÄBIVIIMISEL KASUTATUD SEADMETE JA TARKVARA KIRJELDUS	22
3.1 Katseskeem	22
3.2 Ülevaade koostatud tarkvarast	26
4 TULEMUSED	31
4.1 Eksperimendi teostamise ja andmeanalüüsi meetodika	31
4.2 Viini tüüpi DMA ülekandefunktsiooni määramine	32
4.3 TSI nanoDMA ülekandefunktsiooni määramine	34
4.4 Tulemuste analüüs	37
KOKKUVÕTE	40
KIRJANDUS	42
SUMMARY	44

LISA A Pöördsidumi leidmise algoritm	45
LISA B Millikani valemi pöördülesannet realiseeriv algoritm	47
LISA C Valminud tarkvara kasutusjuhend	48
LISA D Publikatsioon	55

SISSEJUHATUS

Aerosool on tahkete või vedelate osakeste hõljum gaasis, enamasti õhus. Antud terminiga kirjeldatakse kahefaasilist süsteemi, mis sisaldab nii osakesi kui ka gaasilist keskkonda. Aerosool on termodünaamiliselt ebastabiilne süsteem. Aerosooliosakeste suurused võivad olla vahemikus mõnest nanomeetrist mõnesaja mikromeetrini. Aerosoolide näideteks on tolm, suits, udu jms.

Aerosoolidel on suur praktiline tähtsus väga erinevates valdkondades. Nad on olulised keskkonna seisukohast – aerosoolid mõjutavad atmosfääri läbipaistvust ja sellega kogu planeedi kliimat, neil on oluline osa saasteainete transpordil ja väljasadestumisel ning pilvede moodustumisel. Sissehingatusena mõjuvad aerosoolid inimese tervisele. Samas kasutatakse aerosooli ka raviotstarbel (pihustatud ravimite inhaleerimine) ning tööstuses erinevate materjalide tootmisel.

Aerosooli käitumine ja mõju sõltub temast sisalduvatest osakestest. Üksiku osakese olulisim parameeter on tema suurus, millega on määratud paljud osakese omadused. Seetõttu on üheks tähtsamaks aerosoolide mõju ja käitumist kirjeldavaks parameetrikaks aerosooli osakeste suuruste jaotus. Selle teadmine võimaldab prognoosida aerosoolide käitumist erinevates tingimustes ning hinnata soovitud mõjusid või potentsiaalset ohtu.

Aerosooliosakeste suurusjaotuse mõõtmisel on üheks enamkasutatud seadmeks diferentsiaalne liikuvusanalüsaator, mis määrab osakeste suurusi nende elektrilise liikuvuse kaudu. Antud seadmel on lai mõõtepiirkond ning nanomeeterosakeste korral on liikuvusanalüsaatorist kujunenud praktiliselt ainuke vahend aerosooliosakeste suurusjaotuse mõõtmiseks, seda eelkõige seadme rakendamise lihtsuse tõttu. Osakeste suuruse määramine nende elektrilise liikuvuse kaudu on kaudne mõõtmine ja koosneb mitmest vaheetapist. Nende kõikide etappide efekte arvestab seadme aparaadi- ehk ülekandefunktsioon, mis määrab seose otseselt mõõdetud suuruse ning osakeste tegeliku jaotuse vahel. Seega mõõtmistulemuste korrektseks tõlgendamiseks on vaja teada liikuvusanalüsaatori ülekandefunktsiooni. Ideaalne, geomeetrilistel kaalutlustel ja režiimiparameetrite väärtusi arvestades tuletatud ülekandefunktsioon on kasutatav ainult osakeste suuruse juures, kus nende difusioonist tekitatud efektid on tühised. Väiksemate osakeste korral ei piisa ideaalse ülekandefunktsiooni täpsusest ning vaja on eksperimentaalselt määrata tegeliku ülekandefunktsiooni parameetreid. Katseliselt määratud ülekandefunktsioon arvestab ka seadme mehaanilisi ebatäpsusi ja režiimiparameetrite väärtuste määramatusi.

Diferentsiaalset liikuvusanalüsaatorit kasutatakse ka osakeste kitsa mõõtmejaotusega aerosoolide (standard- ehk kalibratsiooniosoolide) genereerimiseks. Siin on mõõtmejaotuse parameetrid määratud analüsaatori ülekandefunktsiooniga – ka siit tuleneb vajadus tegeliku ülekandefunktsiooni tundmiseks.

Tartu Ülikooli Keskkonnafüüsika instituudis on kasutusel kolm diferentsiaalset liikuvusanalüsaatorit. Nende reaalsed ülekandefunktsioonid ei olnud seni teada ning arvutustes kasutati ideaaljuhule vastavaid lähendusi. Lisaks toimus katsete käigus liikuvusanalüsaatorite juhtimine ja mõõtmistulemuste kogumine seni praktiliselt käsitsi, mistõttu olid mõõtmised aeglased ja vigade esinemise tõenäosus suur.

Käesoleva töö eesmärgid on järgmised. Esiteks, asendada senine osaliselt automatiseeritud mõõtmiste süsteem täielikult arvutijuhitavaga, lisades võimaluse eksperimentideks kahe liikuvusanalüsaatoriga, ning töötada välja selleks vajalikud riist- ja tarkvaralised lahendused. Ning teiseks, määrata olemasolevate liikuvusanalüsaatorite ülekandefunktsioonid erinevatel osakeste suurustel ning võrrelda erinevate seadmete suutlikkust.

1 AEROSOLID. AEROSOLIOSAKESTE SUURUSJAOTUS JA SELLE MÕÕTMINE

1.1 Aerosooli liigitus

Aerosolid on keerulised süsteemid, mis võivad koosneda väga erinevate omadustega osakestest. Seetõttu liigitatakse aerosoole erinevatel alustel:

- tekkemehhanismi alusel,
- osakeste agregaatoleku alusel,
- osakeste suuruse järgi (sellest on lähemalt räägitud järgmises punktis),
- osakeste mõõtmete erinevuse alusel,
- sega-alusel.

Tekkemehhanismi alusel jaotatakse aerosolid dispersiooni- ja kondensatsiooniaerosoolideks. Esimesed neist moodustuvad tahkete või vedelate ainete peenestamise või pihustamise käigus ning pulbriliste ainete üleminekul suspendeerunud olekusse. Kondensatsiooniaerosolid moodustuvad üleküllastunud aurude kondensatsioonil. Dispersiooniaerosoolide osakesed on reeglina suuremad kui kondensatsiooniaerosoolidel ning osakeste suurused asuvad laiemas vahemikus.

Agregaatoleku järgi jagatakse aerosolid vedelate ja tahkete osakestega aerosoolideks. Põhiline erinevus siin on osakeste kujus – vedelatel osakestel on korrapärane kuju ning osakeste kokkukleepumisel koagulatsiooni käigus tekivad jälle korrapärase kujuga osakesed. Tahked osakesed võivad olla väga erinevate kujudega ning nende koaguleerumisel tekivad samuti mitmesuguse, reeglina korrapärase kujuga osakesed, mille näivtihedus on enamasti oluliselt väiksem osakeste aine tihedusest.

Osakeste mõõtmete erinevuse alusel jaotatakse aerosolid kahte klassi – monodisperssed ning polüdisperssed aerosolid. Monodispersne aerosool sisaldab ainult ühesuguse suurusega osakesi, polüdispersne aga erineva suurusega. Looduses ideaalseid monodispersseid aerosoole ei esine ning praktikas nimetatakse monodispersseteks osakeste väga kitsa suurusjaotusega aerosoole, mistõttu on piir antud kahe klassi vahel üsna tinglik.

Segaalusel on aerosoolide liigitamiseks kasutusel mitu erinevat klassifikatsiooni, millest kõige täpsemini on määratletud Fuchsi klassifikatsioon [1]. See eristab kolme rühma: 1) udud - vedelad osakesed, 2) suitsud - tahkete osakestega kondensatsiooniaerosolid ning 3) tolmud - tahkete osakestega dispersiooniaerosolid. Fuchs märgib ka, et tehiskeskkonnas esineb sageli ka suitsu- ja uduosakestega seguaerosoole - suitsudu ehk sudu.

Inglisekeelses kirjanduses on kasutusel peenem sega-alusel tehtud klassifikatsioon, kuid nende mõistete defineerimine on palju umbmäärasem kui Fuchsil. Need mõisted on kasutusel peamiselt atmosfääriaerosooli puhul: *fume* (vine), *haze* (vine), *dust* (tolm), *fog or mist* (udu), *smoke* (suits), *smog* (suitsudu, sudu), *spray* (pihu, udu).

1.2 Aerosoolide kirjeldamine

Kõige tähtsam parameeter aerosooliosakeste ja nende käitumise iseloomustamisel on osakeste suurus. Kõik aerosoolide omadused, samuti neid omadusi määravad füüsikaseadused, sõltuvad osakeste suuruselt. Kuna enamike aerosoolide osakesed katavad laia suuruste vahemiku (polüdispersed aerosoolid) – sajakordne erinevus suurimate ja väikseimate osakeste vahel on tavaline, siis tuleb kasutusele võtta mikroskoopiline lähenemine ning kirjeldada aerosoolide omadusi üksikutest osakestest lähtuvalt. Omaduste keskmisi väärtusi on seejärel võimalik hinnata, integreerides üle osakeste suuruste vahemiku. Osakeste suuruse all mõistetakse tavaliselt nende raadiust või diameetrit.

Erinevate aerosoolide osakesed võivad olla väga erinevate suurustega, mistõttu klassifitseeritakse aerosooli ka nende osakeste mõõtmete järgi. Kõige väiksemate osakeste suurus on võrreldavad gaasimolekulide omaga ning neil on ka mitmeid molekulide omadusi. „Ülipeened“ osakesed katavad suurustevahemiku alates suurtest gaasimolekulidest ja lõpetades ligikaudu 100 nm juures. Osakesi, mille suurus jääb alla 50 nm nimetatakse nanomeeterosakesteks. Kõige suuremateks aerosooliosakesteks on silmaga nähtavad „terad“, mis on suuremad kui mõnisada mikromeetrit ning mille omadusi kirjeldatakse klassikalise mehaanika seadustega. Üldjuhul kasutatakse järgmist klassifikatsiooni: nanomeeterosakesed - $d < 50$ nm, ülipeened - 50 nm $< d < 100$ nm, submikromeeter-osakesed - 100 nm $< d < 1$ μ m ning jämedad - $d > 1$ μ m.

Vedelad osakesed on peaaegu alati sfäärilised, samas tahketel osakestel on tavaliselt väga keeruline kuju. Teoreetilistes arvutustes on ebakorrapärase kujuga osakeste liikumist aga küllaltki keeruline kirjeldada. Seetõttu tuuakse sisse osakeste ekvivalentse mõõtme mõiste - see on sellise kerakujulise osakese diameeter (raadius), mis oma mingi füüsikalise omaduse poolest on ekvivalentne vaadeldava osakesega. On kasutusel ruumekvivalentne, pindekvivalentne ja pindekvivalentse projektsiooniga kera diameeter; samuti aerodünaamiline diameeter – aine tihedusega $\rho = 10^3$ kg/m³ kera diameeter, mis langeb raskusväljas sama kiirusega kui vaadeldav osake; ning liikuvus- ehk Stokes'i diameeter – sama, mis aerodünaamiline diameeter, kuid selle kujuteldava kera tihedus loetakse võrdseks osakese näivtihedusega. Ekvivalentse mõõtme kasutamine võimaldab osakeste kuju mitte arvestada, v.a. osakeste korral, millel on väga eripärane kuju – näiteks pikad peenikesed kiud või õhukesed plaadid. Sellisel juhul kirjeldatakse osakesi erinevate orientatsioonidega lihtsustatud mittedünaamiliste objektidena (tavaliselt ellipsitena).

Aerosoolide kõige enam mõõdetud ning keskkonna ja tervise seisukohast oluline omadus on osakeste massikontsentratsioon – kõigi osakeste summaarne mass aerosooli ühikulise ruumala kohta. Massikontsentratsioon on ekvivalentne aerosooliosakeste kogumi osatihedusega õhus, kuid viimast terminit siiski ei kasutata, et ei tekiks segadust selle ja üksiku osakese tiheduse vahel. Teine levinud kontsentratsioonimäär on arvkontsentratsioon – osakeste arv aerosooli ühikulise ruumala kohta.

1.3 Aerosooliosakeste jaotused

Nagu öeldud, ei piisa polüdisperssete aerosoolide kirjeldamiseks alati osakeste mingil viisil defineeritud keskmisest suurusest, vaid vaja on teada ka erineva suurusega osakeste osakaalu. Seetõttu tuuakse sisse osakeste jaotuse tihedusfunktsiooni mõiste, mis kirjeldab osakeste arvu jaotust ekvivalentse diameetri järgi:

$$f_n(D) = \frac{dn}{NdD} = \frac{P\{D \leq D' < D + dD\}}{dD}, \quad (1)$$

$$f'_n(D) = \frac{dn}{dD}, \quad (2)$$

kus dn/N on diameetri vahemikku $(D, D + dD)$ jäävate osakeste suhteline arvkontsentratsioon ehk teisiti öeldes tõenäosus P , et osake on selles vahemikus. Esimene neist kahest funktsioonist on normeeritud üheni, teine kogukontsentratsioonini N :

$$\int_0^{\infty} f_n(D)dD = 1, \quad (3)$$

$$\int_0^{\infty} f'_n(D)dD = N. \quad (4)$$

Jaotuse tihedusfunktsiooni kohta kasutatakse ka terminit „spekter“ millele lisatakse jaotuse argumenti kirjeldus: näiteks mõõtmespekter (argument on diameeter), liikuvusspekter (argumentiks on osakeste liikuvus) jne. Kui kasutatakse diameetri asemel mõnda teist argumenti, mis on esimese ühene funktsioon, siis vastavad jaotuse tihedusfunktsioonid on seotud vahemikku sattumise tõenäosuse võrdsuse tingimusega, näiteks logaritmi diameetrist $\ln(D)$:

$$f(\ln D)d(\ln D) = f(D)dD, \quad (5)$$

$$f(\ln D) = f(D) \frac{dD}{d(\ln D)} = D f(D). \quad (6)$$

Analoogselt valemitega (1) ja (2) võib osakeste arvkontsentratsiooni asemel defineerida ka mõne teise aerosooli kirjeldava füüsikalise suuruse jaotuse osakeste diameetri järgi. Kasutatakse osakeste lineaarmõõdme, pindala, ruumala ja massikontsentratsiooni jaotusi.

Näiteks osakeste ruumala diameetri järgi jaotuse tihedusfunktsioon avaldub:

$$f_V(D) = \frac{dV}{V dD}, \quad (7)$$

kus dV/V on diameetri järgi vahemikus $(D, D + dD)$ asuvate osakeste suhteline ruumala aerosooli ühikulise ruumala kohta (suhteline ruumalakontsentratsioon).

Aerosooliosakeste suurusjaotuse ehk funktsiooni (1) eksperimentaalseks määramiseks mõõdetakse osakeste kontsentratsioonid nende suuruse lõplikes vahemikes ning esitatakse seejärel iga antud vahemiku kontsentratsioonide kogumina, st. osakeste jaotust kirjeldatakse histogrammiga, kus histogrammi tulba laius vastab antud vahemiku laiusele ning tulba kõrgus vastavasse vahemikku jäävate osakeste kontsentratsioonile. Seejärel tehakse lähendus, kus antud vahemikku jäävate osakeste kogukontsentratsioon omistatakse selle vahemiku keskpunktile ning pidevat funktsiooni (1) hinnatakse ainult nende keskpunktide kohal. Aerosooliosakeste selliseks jaotamiseks eraldatakse (separeeritakse) mingi osakeste mõõtmega seotud füüsikalise suuruse alusel uuritava aerosooli laiast jaotusest välja osakesed, mis jäävad kitsasse vahemikku selle füüsikalise suuruse, ning viimase kaudu ka oma mõõtmete järgi. Seejärel mõõdetakse igasse väljaeraldatud fraktsiooni jäävate osakeste kontsentratsioone. Sellist meetodit osakeste suurusjaotuse määramiseks nimetatakse klassifitseerimiseks. Siin tuleb mainida, et kasutatakse ka mikroskoopilisi mõõtmismeetodeid, kus visuaalselt jaotatakse osakesi nende suuruse järgi, kuid tõsiseks probleemiks selle juures on proovi kogumine – väga raske on tagada, et proovis oleksid kõik osakeste suurused õigete kontsentratsioonidega esindatud, lisaks nõuab antud meetod nanomeeterosakeste korral ka võimsaid (ja kalleid) seadmeid.

Klassifitseerimisel kasutatavaks füüsikaliseks suuruseks on enamasti osakeste mehaaniline või elektriline liikuvus. Mehaanilisel liikuvusel põhinevad inertsiaalsed ja gravitatsioonilised meetodid nanomeeterosakeste eraldamiseks on aga enamasti küllaltki keerulised, kuna antud osakeste suuruse juures töötavad nad ainult atmosfäärirõhust oluliselt väiksematel rõhkudel. Samas on aga elektrostaatilisi jõude sellistele osakestele väga lihtne rakendada, mistõttu on elektrilisest klassifikatsioonist ehk nn. liikuvustepõhisest analüüsist kujunenud praktiliselt ainuke vahend aerosooliosakeste suurusjaotuse määramiseks nanomeeter-piirkonnas.

1.4 Aerosooliosakeste elektrilise liikuvuse analüüs

Aerosooliosakesed omandavad kergesti elektrilaengu, seda kas juba nende genereerimise ajal või hiljem mitmesuguste erinevate protsesside teel. Kui laetud osake asetada tuntu tugevusega elektrivälja, siis hakkab ta liikuma kiirusega, mis sõltub ainult osakese laengust ja suurusest¹. Osakesele laenguga q mõjub elektriväljas tugevusega E jõud $F = qE$.

¹Tegelikult sõltub kiirus ka osakese kujust, aga käesolevas töös on eeldatud, et osakeste genereerimisel tekkivad erinevused selles on tühised, mistõttu võib neid mitte arvestada.

Laengu võib ka avaldada $q = ne$ ehk osakesel on n elementaarlaengut e . Laetud osake hakkab keskkonna suhtes liikuma püsiva kiirusega [1][2]:

$$v = nek_m E = kE , \quad (8)$$

kus k_m ja k on vastavalt osakese mehaaniline ja elektriline liikuvus. Hüdrodünaamilises režiimis liikuvate raadiusega r kerakujuliste osakeste elektriline liikuvus avaldub:

$$k = \frac{neC}{6\pi\eta r} , \quad (9)$$

kus η on gaasi viskoossus ning C on Stokesi valemile lisatud parandustegur, mis arvestab gaasikihi „libisemist“ osakese pinnal (ja sellest tulenevat väiksemat takistusjõudu) (i.k. *slip factor*) olukorras, kus osakese suurus on samas suurusjärgus või väiksem gaasimolekulide vaba tee pikkusest λ ehk dimensioonitult kirja panduna on Knudseni arv

$$Kn = \frac{\lambda}{r} , \quad (10)$$

ligikaudu 1 (samas Reynoldsi arv – osakese poolt kaasahaaratava gaasimassi kiirendamiseks vajaliku nn. inertsiaaljõu ja osakesele mõjuva keskkonnatakistusjõu suhe, $Re \ll 1$). Parandustegur C avaldub:

$$C = 1 + Kn \left(\alpha + \beta e^{-\frac{\gamma}{Kn}} \right) , \quad (11)$$

kus α , β ja γ on empiirilised koefitsiendid, mille väärtusteks on antud töös võetud $\alpha = 1.2$, $\beta = 0.5$ ja $\gamma = 1$ [3]. Valemite (9) – (11) kombineerimisel on tulemuseks seos osakese elektrilise liikuvuse ja raadiuse vahel, mida tuntakse Millikani valemi nime all:

$$k(r) = \frac{ne}{6\pi\eta r} \left[1 + \frac{\lambda}{r} \left(\alpha + \beta e^{-\frac{\gamma r}{\lambda}} \right) \right] . \quad (12)$$

Valemist (12) osakese raadiust r liikuvuse k kaudu ei ole võimalik analüütiliselt leida, seda saab teha ainult numbriliste meetoditega.

Liikuvuste järgi osakeste mõõtmespektri määramine eeldab, et antud osakeste laengud on teada. Et separateerimisel kitsasse liikuvustevahemikku jäävad osakesed oleksid seda ka suuruste järgi, peavad nende laengud lisaks olema ka võimalikult võrdsed – enamikul juhtudest eeldatakse, et kõigil osakestel on 1e suurune laeng. Eksisteerib mitmeid aerosoolosakeste tekkemehhanisme, mille käigus osakesed laaduvad. Kuna aga laengute jaotus, mille osakesed omandavad nende tekitamise käigus, ei ole üldjuhul teada, siis oluline osa aerosoolide elektrilisel klassifitseerimisel on tuntud laengujaotuse tekitamine.

Enamlevinud meetodid selleks kasutavad osakeste interaktsioone kergete gaasiiooni-dega, mis tekitatakse fotoelektronide emissioonil, koroonalahenduses või gaasimolekulide ioniseerimisel nende kokkupõrkel radioaktiivse lagunemise käigus tekkinud tuumaosakes-

tega. Levinuim on viimane meetod. Antud protsessi tulemusel tekib unipolaarne või bipolaarne ionatmosfäär, sõltuvalt kas ioonid on ühemärgilise laenguga või leidub nii positiivseid kui negatiivseid ioone. Aerosooliosakeste segunemisel ionidega toimub põrgete tagajärjel laengute vahetus, kus osakeste laengu number võib suureneeda samamärgiliste laengute lisandumisel või väheneda erimärgiliste laengute korral. Vastavalt sellele, kas laengute kandumine osakestele toimub ainult ionide kaootilise liikumise teel või lisandub sellele välise elektrivälja sundiv mõju, nimetatakse laadumist difusiooniliseks või lööklaadumiseks (i.k. *field charging*). Kuna lööklaadumise korral kasutatava tugeva elektrivälja mõju võib oluliselt raskendada osakeste liikuvusanalüüsi, siis kasutatakse enamuses liikuvusanalüsaatoritest difusioonilistioon-osake interaktsiooni². Ka käeolevas töös on kasutatud difusioonilist bipolaarset laadumist.

Piisavalt pika aja järel kujuneb laaduris osakeste ja ionatmosfääri vahel ideaaljuhul välja laengute järgi tasakaaluline olukord. Seda kirjeldab Boltzmanni võrrand, mis annab diameetriga d osakeste osakaalu, millel on $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ elementaarlaengut [2][4]:

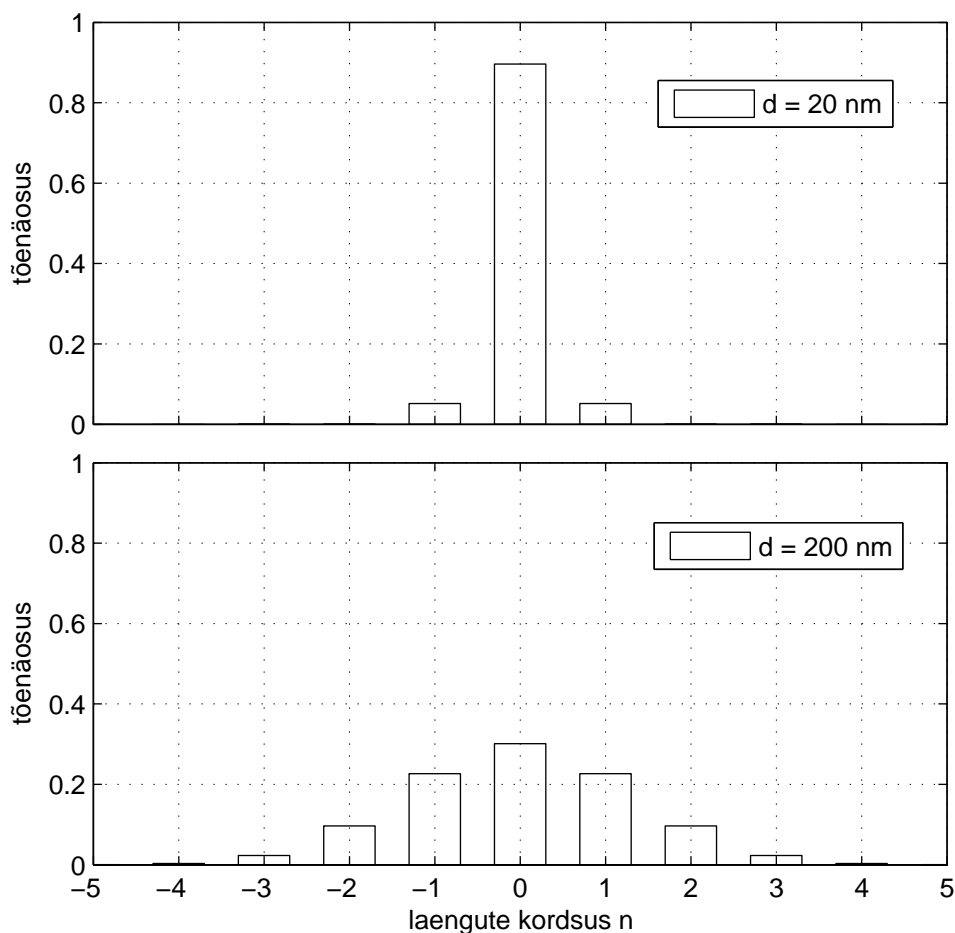
$$f_n = \frac{\exp\left(-\frac{n^2 e^2}{4\pi\epsilon_0 d kT}\right)}{\sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2 e^2}{4\pi\epsilon_0 d kT}\right)}, \quad (13)$$

kus ϵ_0 on elektriline konstant, k on Boltzmanni konstant ja T on absoluutne temperatuur. Joonisel 1 on näha, et antud jaotuse korral on kõige rohkem neutraalseid osakesi ning vastava arvu positiivsete ja negatiivsete laengutega osakesi on ühepalju³. Valemist (13) ja jooniselt 1 ilmneb samuti, et osakeste suuruse kasvades suureneb ka tõenäosus kordsete laengute esinemiseks – näiteks kummagi märgiga kahekordse laengu ($n = \pm 2$) tekkimiseks on tõenäosus 20 nm diameetri juures 0.00001 aga 200 nm korral juba 0.1. Kordsete laengute olemasolu aga tähendab, et sama suurusega osakestel võivad olla erinevad laengud ja seega ka erinevad elektrilised liikuvused. Seetõttu on liikuvustepõhine analüüs üldjuhul piiratud osakeste diameetriga ligikaudu alla poole mikromeetri. Kuid ka sellest väiksemate suuruste korral eksisteerib lõplik tõenäosus kordsete laengute omandamiseks, mis raskendab oluliselt andmete analüüsi. Sellepärast on ka käesolevas töös püütud igati vältida kordsete laengute tekkimist.

Kuigi bipolaarse difusioonilise laadumise käigus tekkiva laengutejaotuse kirjeldamiseks aerosooliosakestel on Boltzmanni jaotus esimeses lähenduses õige, erineb tegelik olukord siiski sellest. Nimelt tekib tasakaaluline laengujaotus ainult isoleeritud süsteemi korral, kus osakesi juurde ei tule ning kus ionide rekombinatsioone samuti ei toimu st. kõikide osakeste arv jääb samaks. Antud juhul aga rekombineeruvad ioonid pidevalt osakeste ja teiste ionidega ning nende asemele tuleb uusi ioone juurde, mistõttu kujuneb tegelik-

²Siiski rakendatakse mõningates laadurites nõrka elektrivälja ionide suunamiseks, saavutamaks lisakontrolli difusioonilise laadumise üle.

³Siinkohal on vajalik rõhutada, et püsiv on antud laenguga osakeste keskmine arv – jätkuvalt toimub pidev laengute vahetus st. tegemist on dünaamilise jaotusega.



Joonis 1: Boltzmanni jaotused erinevate osakeste suuruste juures.

kuses osakestel välja Boltzmanni jaotusele sarnane nn. statsionaarne (i.k. *steady state*, *stationary*) laengujaotus. Lisaks ei ole reaalse jaotuse puhul ka positiivsete ja negatiivsete laengute arv tasakaalus (jaotuse maksimum on nihkes negatiivsete laengute poole), mis on põhjustatud asjaolust, et erimärgiliste ionide rekombinatsioonide kiirused aerosooliosakestega ei ole päris võrdsed, vaid erinevad positiivsete ionide väiksema liikuvuse tõttu. Hoolimata mittetasakaalulisest jaotusest ning ionide erinevast liikuvusest tingitud asümmeetriast, on bipolaarne difusiooniline laadumine siiski sobiv, kuna laengujaotus on stabiilne ja vähetundlik näiteks õhukiiruste muutuste suhtes. Seetõttu on ka antud meetod aerosooliosakeste liikuvuspõhise suurusjaotuse määramise juures üks enamkasutatavamaid.

1.5 Diferentsiaalne liikuvusanalüsaator

Mõõtmisi osakeste liikuvusjaotuse määramiseks on sooritatud juba alates 1902. aastast, mil Langevin kasutas lihtsat silindrilist skeemi nn. „suurte ionide“ avastamisel atmosfää-

ris⁴. Antud skeemi puhul suunati ioone sisaldav õhuproov läbi rõngakujulise ristlõikega pilu kahe koaksiaalse silindrilise elektroodi vahel (nn. integraalne mõõtekondensaator [6]). Välisele elektroodile pinge rakendamisel sisemisele elektroodile kogunenud laengut kasutati mõõduna laetud osakeste arvu jaoks, mille liikuvused ületasid mingit läviväärtust. Antud seadet kasutati järgnevate aastakümnete jooksul mitmete teadlaste poolt, ning loodi ka seadme skeemi erinevaid modifikatsioone, millest tähtsaim on segmenteeritud siseelektroodi lisamine seadme lahutusvõime parandamiseks.

Elektrilisi meetodeid ei kasutatud siiski kuigi palju, enne kui ilmusid tööstuslikult toodetavad instrumendid, mida 1960 ja 1970 aastatel tutvustas firma TSI. Esimene neist oli traditsioonilise silindrilise skeemi modifikatsioon, kus aerosool suunati seadmesse välise elektroodi juures ning lisaks juhiti elektroodide vahelt läbi puhas õhk. Pinge rakendati sisemisele elektroodile ning seadme väljundis mõõdeti sinna jõudnud laetud osakeste poolt üle kantud voolu (1. järku diferentsiaalne mõõtekondensaator). Pinge muutmisel tekkinud voolu muutuste põhjal määrati aerosooliosakeste suuruste jaotus. Selle instrumendi kompaktsemat versiooni, nimega „elektriline aerosoolianalüsaator“ (i.k. *electrical aerosol analyzer* – EAA), tutvustasid 1974 aastal Liu ja Pui. Hiljem kommertsialiseeriti see TSI poolt, tehes nõnda antud seadme üle maailma lihtsalt kättesaadavaks. Kuid EAA on suuremalt jaolt asendunud nn. „diferentsiaalse elektrilise liikuvuste klassifikaatoriga“, mis ilmus samal ajal kui EAA.

Seadet nimega „diferentsiaalne liikuvuste klassifikaator“ või tuntuma nimega „diferentsiaalne liikuvusanalüsaator“ (i.k. DMA – *Differential Mobility Analyzer*) tutvustasid aastal 1975 Knutson ja Whitby, kes kasutasid seda teiste instrumentide kalibreerimiseks vajalike monodisperssete nanomeeterosakeste genereerimiseks. DMA kasutamine aerosooliosakeste suurusjaotuse määramiseks sai võimalikuks alles hiljem, kui tehnoloogia areng võimaldas valmistada selleks sobivaid osakeste detektoreid.

Silindriline DMA sarnaneb oma ülesehituselt EAA-ga, kuid erinevalt EAA-st jõuavad seadme väljundisse ainult kindlas piirkonnas sisemise elektroodini kandunud aerosooliosakesed, mis imetakse seadmest välja läbi väikese pilu siseelektroodis (2. järku diferentsiaalne mõõtekondensaator), st. erinevalt varasematest skeemidest, läbivad seadme ainult osakesed, mille liikuvus asub kitsas vahemikus (silindrilise DMA tööd on järgmises punktis lähemalt kirjeldatud).

Enamus enne 1990 aastaid DMA-ga sooritatud eksperimentidest kasutasid TSI toodetud Knutsoni ja Whitby silindrilise seadme versiooni või mõnda sarnast instrumenti. Antud instrument töötas hästi osakeste diameetrite vahemikus ligikaudu 10 nm kuni 1 μm ning seadme lühendatud versiooni kasutati ka väiksemate osakeste korral, kuid osakeste difusioonilised kaod on kitsa rõngakujulise sisendava tõttu suured. Aastal 1991 töötati Viini Ülikoolis välja uut tüüpi DMA, mis sobis paremini nano-osakeste mõõtmiseks. Sel-

⁴Kõik viited nimedele ja aastaarvudele pärinevad allikatest [2] ja [5].

le tangentsiaalne sisendava vähendas oluliselt kadusid. Antud disain on olnud ka aluseks paljudele uutele skeemidele – näiteks aastal 1996 konstrueeriti Viini tüüpi DMA, mille töötava osa pikkus (st. sisend- ja väljundpilude vaheline kaugus) on väga väike, optimeerimaks selle suutlikkust nanomeeterpiirkonna alumises otsas.

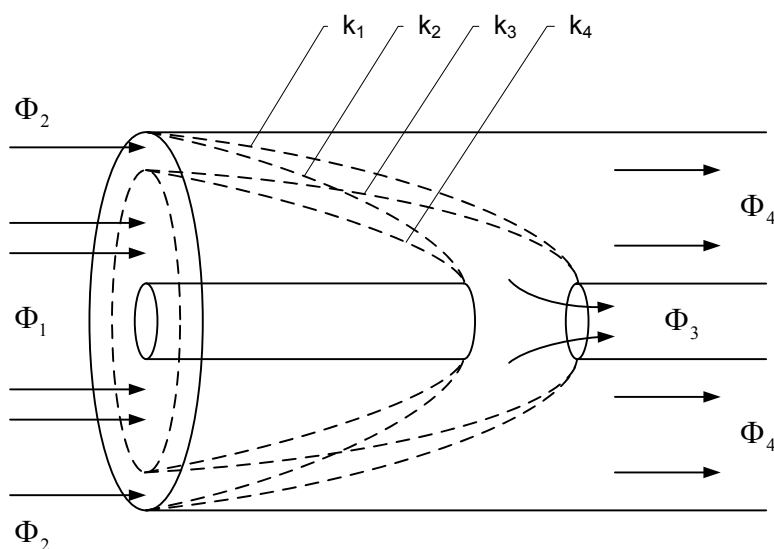
DMA-de edasiarendus jätkub ning kiiresti tekib juurde uusi lahendusi ja juba tuntud skeemide modifikatsioone. Seetõttu on järgnevalt välja toodud ainult olulisemad uuendused. 1995. aastal loodi uut tüüpi DMA, mis kasutas juba varem esitletud tangentsiaalset aerosooli sisselaskeava, kuid mille puhul osakeste klassifitseerimine toimub kahe paralleelse plaadikujulise elektroodi vahel, sissepoole suunatud radiaalses osakeste voos; siit ka seadme nimi – *Radial DMA*. Knutsoni ja Whitby silindrilist DMA-d modifitseerisid aastal 1998 Pui ja ta kolleegid, kohandamaks antud seadet tööks nanomeeter-osakestega. Instrumendis, millel nimeks „nanoDMA“, juhitakse läbi rõngakujulise ava kadude vähendamiseks seadmesse suur aerosoolivool, millest klassifitseerimise alasse jõuab vaid väike osa. Ülejäänud osa viiakse seadmest välja ning seadmesse sisenenud ja seadmest eemaldatud aerosoolivoolude vahel arvutatakse klassifitseerimise alasse jõudnud aerosoolivoolu kiirus. Antud seadme eeliseks on lühem aerosooliosakeste läbilennu aeg seadmest, mis vähendab difusioonilisi kadusid väikeste osakeste korral.

2 DIFERENTSIAALSE LIIKUVUSANALÜSAATORI ÜLEKANDEFUNKTSIOON

2.1 Ideaalne ülekandefunktsioon

Käesolevas töös on kasutusel põhiliselt Viini tüüpi silindrilised DMA-d, ning seega on liikuvusanalüsaatori tööpõhimõtte ja omaduste kirjeldamisel lähtutud just seda tüüpi seadme konstruktsiooni eripäradest.

Antud DMA koosneb kahest kontsentrisest silindrist (joonis 2), millele on raketdatud elektriringe. Aerosool siseneb telgsümmeetrilisse analüsaatorisse õhukese kihina väliselektroodi juures ruumkiirusega Φ_2 . Silindritevahelises elektriväljas liiguvad laetud osakesed siselektroodi suunas nende liikuvusest sõltuva kiirusega ja on seetõttu oma elektrilise liikuvuse põhjal ruumiliselt eraldatud. Läbi siselektroodi pilu imetakse välja (ruumkiirusega Φ_3) puhta (kaitse-) õhu kihi ruumkiiruse Φ_1 ja elektrodidevahelise elektrivälja tugevusega määratud, kitsasse liikuvusevahemikku jäävad osakesed, st. osakesed, mis läbivad vahemaa elektrodide vahel sama ajaga, mille jooksul kaitseõhu vool neid piki silindrit piluni kannab. Suurema liikuvusega osakesed sadestuvad sisemisele elektrodile enne pilu ning väiksema liikuvusega osakesed pärast pilu või nad viiakse õhuvooluga (Φ_4) seadmest välja.



Joonis 2: DMA põhimõtteskeem ja piirliikuvused

Joonisel 2 on kujutatud väljundpilusse jõudnud osakeste trajektooridest moodustunud piirpinnad, sõltuvalt nende sisenemis- ja väljumiskohast. Vastavaid osakeste liikuvusi $k_1 \dots k_4$ nimetatakse piirliikuvusteks. Nagu jooniselt näha, on k_2 kõige kiiremate osakeste liikuvus, mis jõudsid välise elektroodi sisepinna juurest väljundpilu esiservani ja k_3 kõige aeglasemate osakeste liikuvus. Piirliikuvused on arvutatavad järgmiste valemite abil [2][7][8]:

$$\begin{aligned}
k_1 &= \varepsilon_0 \frac{\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3}{CU} , \\
k_2 &= \varepsilon_0 \frac{\Phi_1 + \Phi_2}{CU} , \\
k_3 &= \varepsilon_0 \frac{\Phi_1 - \Phi_3}{CU} , \\
k_4 &= \varepsilon_0 \frac{\Phi_1}{CU} ,
\end{aligned} \tag{14}$$

kus ε_0 on elektriline konstant, U on DMA elektroodidele rakendatud pinge ja C on DMA geomeetriaga määratud (silinderkondensaatori) tegevmahtuvus, st. kondensaatori sisend- ja väljundpilude vahelise osa mahtuvus.

Ideaalsel juhul, kui osakeste trajektoorid sõltuvad ainult nende liikuvusest, on antud liikuvusega k osakeste kontsentratsioon väljundaerosoolis määratud DMA piirliikuvustega antud pinge ja õhuvoolude ruumkiiruste juures, st., on määratud seos DMA väljund- ja sisendaerosooli liikuvusjaotuse tihedusfunktsioonide vahel:

$$\varphi(k) = Hf(k) . \tag{15}$$

Suurust H nimetatakse liikuvusanalüsaatori ülekandefunktsiooniks ning mainitud ideaalsel juhul avaldub see järgmiselt (joonis 3, 1. graafik):

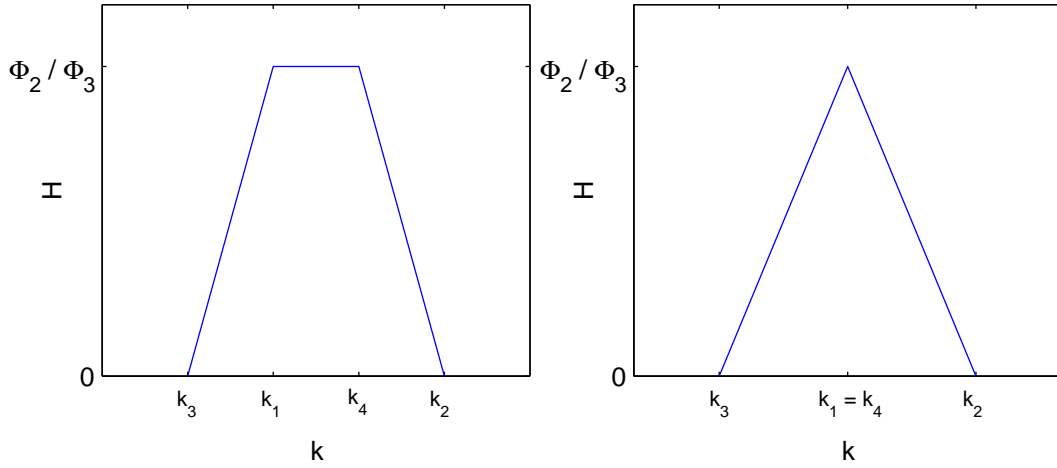
$$H = \begin{cases} 0 & k < k_3 \\ \left(\frac{k}{k_1} - 1\right) \frac{\Phi_1}{\Phi_3} + 1 & k_3 < k < k_1 \\ \frac{\Phi_2}{\Phi_3} & k_1 < k < k_4 \\ \left(1 - \frac{k}{k_1}\right) \frac{\Phi_1}{\Phi_3} + \frac{\Phi_2}{\Phi_3} & k_1 < k < k_2 \\ 0 & k > k_2 \end{cases} , \tag{16}$$

Osakeste kontsentratsioon seadme väljundis on kirjeldatav seosega:

$$n(k_1) = \int_{k_3}^{k_2} H(k, k_1) f(k) dk . \tag{17}$$

Valemitest (15) ja (16) on näha, et saavutamaks võimalikult kitsast $\varphi(k)$, tuleb õhuvoolude kiirused valida nii, et $\Phi_2 = \Phi_3$ ja $\Phi_1 \gg \Phi_2$. Sellisel juhul $k_1 = k_4$ ja ülekandefunktsioonil on kolmnurga kuju (joonis 3, 2. graafik). Valemid (14) ja (16) saavad kuju:

$$\begin{aligned}
k_1 &= k_4 = \varepsilon_0 \frac{\Phi_1}{CU} , \\
k_2 &= \varepsilon_0 \frac{\Phi_1 + \Phi_2}{CU} , \\
k_3 &= \varepsilon_0 \frac{\Phi_1 - \Phi_3}{CU} ,
\end{aligned} \tag{18}$$



Joonis 3: DMA (ideaalne) ülekandefunktsioon. Teine graafik kujutab olukorda, kus $\Phi_2 = \Phi_3$.

$$H = \begin{cases} 0 & k < k_3 \\ \left(\frac{k}{k_1} - 1\right) \frac{\Phi_1}{\Phi_3} + 1 & k_3 < k < k_1 \\ 1 & k = k_1 \\ \left(1 - \frac{k}{k_1}\right) \frac{\Phi_1}{\Phi_3} + 1 & k_1 < k < k_2 \\ 0 & k > k_2 \end{cases} . \quad (19)$$

Seosest (17) lähtub, et liikuvusanalüsaatoriga mõõdetud osakeste jaotusest lähteaerosooli osakeste tegeliku jaotuse leidmiseks on vaja teada DMA ülekandefunktsiooni H . Kuid nagu eelnevalt juba öeldud, kirjeldavad geomeetrisel kaalutlustel tuletatud valemid (18) ja (19) ainult ideaalset olukorda, kus DMA ülekandefunktsioon on antud sõltuvusena osakeste elektrilisest liikuvusest antud pinge ja õhuvoolude korral (arvestades ka loomulikult DMA konstruktsiooni). Reaalne olukord on aga keerulisem.

2.2 Reaalne ülekandefunktsioon

Tegelik liikuvusanalüsaatori ülekandefunktsioon erineb teoreetilisest kahel põhjusel: 1) DMA konstruktsioonilistest ebakorrektsustest põhjustatud ja 2) osakeste difusioonist tekitatud ülekandefunktsiooni moonutused. Esimese mõjud ei sõltu osakeste suurusest ning on eraldi hinnatavad ainult suuruste piirkonnas, kus difusiooni roll on tühine. Konstruktsioonilised kõrvalekalded ettenähtud tingimustest avalduvad enamasti asümmeetrilise ülekandefunktsiooni kujus, kuid ka ülekandefunktsiooni mõningase laienemisena. Ülekandefunktsiooni asümmeetriat antud töös ei täheldatud, laienemine peegeldab mõlemat mõju summaarselt. Suuremate osakeste korral võib difusiooni mõju ignoreerida.

Difusioonilised moonutused ülekandefunktsioonis on põhjustatud aerosooliosakeste Browni liikumisest, mille tõttu osakesed eemalduvad ideaalsetest õhuvooludega määratud trajektoridest [9]. Difusiooni mõju ülekandefunktsioonile avaldub kahel viisil: esiteks osakeste kadu ühendustorustikus ning DMA sisendis, mis on põhjustatud osakeste difusioo-

nilisest sadestumisest seadmete seintele – kahandab ülekandefunktsiooni tipu kõrgust ja funktsiooni graafiku alust pindala; ning teiseks osakeste trajektooride hajumine DMA elektrodide vahel, st. osa vastavatest piirliikuvustest suurema või väiksema liikuvusega osakestest satub difusiooni tõttu ikkagi DMA väljundpilusse – suurendab ülekandefunktsiooni laiust; muutub ka ülekandefunktsiooni kuju. Osakeste difusiooniline liikumine on tugevas sõltuvuses osakese suurusest ning difusioonist tingitud ülekandefunktsiooni muutused avalduvad eriti tugevalt väikeste osakeste korral (ligikaudu $d < 20$ nm). Osakeste difusioonilise liikumise osakaalu antud elektrivälja tugevuse juures kirjeldatakse Peclet’ arvuga, mis on elektriväljas triivi tekitatud osakeste arvu voo tiheduse ja samade osakeste difusioonivoo tiheduse suhe:

$$Pe \approx \frac{v_E b}{D}, \quad (20)$$

kus v_E on elektriväljas E osakese omandatud kiirus, b on teepikkus välise ja sisemise elektroodi vahel ja $D = kTB$ on osakeste difusioonikonstant. Mida suurem on Pe , seda väiksem on difusiooniliste protsesside tähtsus. Võttes aluseks elektrivälja tugevuse välise elektroodi juures, avaldub Peclet’ arv silindrilise DMA korral järgmiselt [10] (kasutatud on ka teistsuguseid avaldusi, näiteks on elektrivälja tugevuseks võetud selle keskmine väärtus elektrodide vahel [11]):

$$Pe = \frac{neU}{kT} \frac{1 - \ln(\frac{R_1}{R_2})}{\ln(\frac{R_2}{R_1})}, \quad (21)$$

kus ne on osakese laeng, U on rakendatud pinge, k on Boltzmanni konstant, T on absoluutne temperatuur ning R_1 ja R_2 on vastavalt DMA sisemise ja välise elektroodi raadius.

Kuna difusiooni mõju DMA ülekandefunktsioonile ei ole täpselt teada, on erinevad autorid kasutanud reaalse ülekandefunktsiooni kirjeldamiseks erinevaid võtteid. Neist füüsikaliselt kõige põhjendatum, kuid siiski ainult lähendus, on kellukesekujuline ülekandefunktsioon [12]. Enamasti on aga kasutusel kolmnurkne funktsioon, kuna selle kasutamine nn. inversioonialgoritmides aerosooliosakeste suurusjaotuse mõõtmisel on oluliselt lihtsam. Lisaks selgub, et kuigi reaalsed ülekandefunktsioonid on Gaussi funktsiooni kujuga ning rangelt võttes on kolmnurk kasutatav ainult osakeste suuruse juures, kus difusiooni võib mitte arvestada, on kolmnurkne kuju piisavalt hea lähendus [13], kuna selle kasutamisel tekkiv viga on katsemääramatusest väiksem. Sellest tulenevalt on ka käesolevas töös kasutatud DMA reaalse ülekandefunktsiooni lähendamiseks kolmnurgakujulist funktsiooni.

Kasutatava ülekandefunktsiooni kuju esitamiseks on esmalt mõistlik valemis (19) H kirjutada ülekandefunktsiooni keskpunkti liikuvuse ($k_1 = k_4$, edaspidi tähistatud k') funktsioonina ümber järgnevalt (arvestatud on, et $\Phi_2 = \Phi_3$, vt. lk. 16) [12]:

$$H(k, k') = \frac{1}{2 \Phi_3 / \Phi_1} \left(\left| \frac{k}{k'} - (1 + \Phi_3 / \Phi_1) \right| + \left| \frac{k}{k'} - (1 - \Phi_3 / \Phi_1) \right| - 2 \left| \frac{k}{k'} - 1 \right| \right). \quad (22)$$

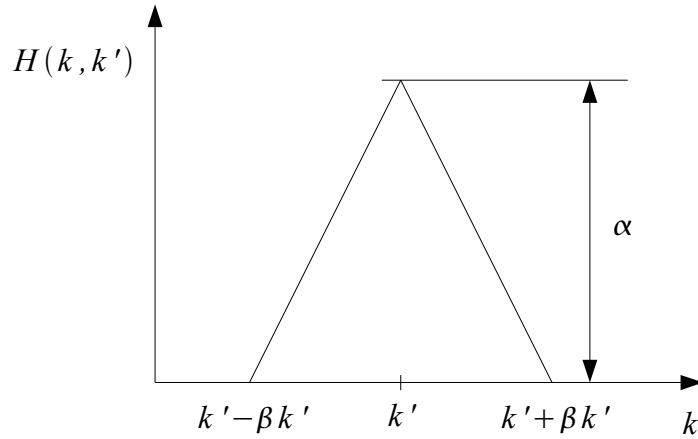
Valemi (17) võib samuti ümber kirjutada kujul:

$$n_1(k') = \int_{k_3(k')}^{k_2(k')} H(k, k') f(k) dk . \quad (23)$$

Muutuste kirjeldamiseks ülekandefunktsioonis on mugav kasutusele võtta kaks empiirilist lisaparaametrit: α ja β ning kirjutada H välja järgmiselt [12][13]:

$$H(k, k') = \frac{\alpha}{2\beta} \left(\left| \frac{k}{k'} - (1 + \beta) \right| + \left| \frac{k}{k'} - (1 - \beta) \right| - 2 \left| \frac{k}{k'} - 1 \right| \right) . \quad (24)$$

Paraameeter α on DMA ülekandefunktsiooni kõrgus (joonis 4), millega saab iseloomustada kadusid (ideaaljuhul $\alpha = 1$) ning β on funktsiooni suhteline poollaius (absoluutne poollaius on $\beta k'$), mis ideaaljuhul $\beta = \Phi_3/\Phi_1$ kuid difusiooniliste nähtuste olemasolu korral võtab arvesse ka neist põhjustatud funktsiooni laienemise.



Joonis 4: DMA reaalse ülekandefunktsiooni mudeli paraameetrid α ja β .

Valemist (23) H kuju määrata ei ole võimalik, kuna aerosooliosakeste jaotus $f(k)$ DMA sisendis ei ole üldjuhul teada. Seetõttu on vaja kasutusele võtta ka teine DMA, millega mõõdetakse jaotust DMA1 väljundis, kui see on seatud kindlale pingele. Osakeste kontsentratsioon DMA2 väljundis ülekandefunktsiooni antud keskpunkti liikuvuse k' korral avaldub:

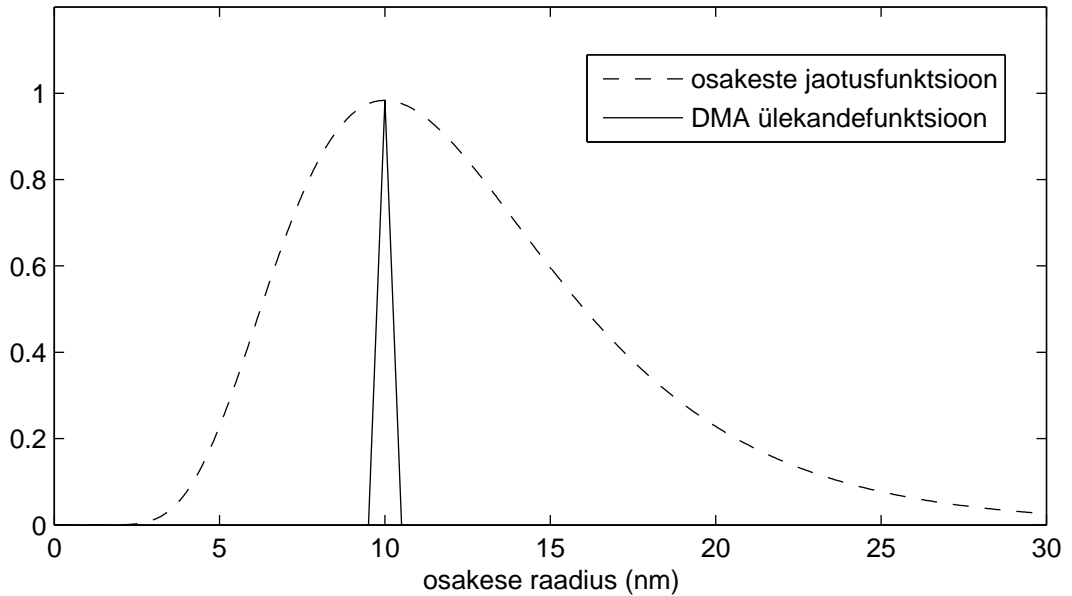
$$n_2(k') = \int_0^{\infty} H_1(k, k_0) H_2(k, k') f(k) dk , \quad (25)$$

kus H_1 ja H_2 on vastavalt DMA1 ja DMA2 ülekandefunktsioonid, $f(k)$ on osakeste jaotus DMA1 sisendis ning k_0 on DMA1 ülekandefunktsiooni keskpunkti liikuvus. Ka siin ei ole $f(k)$ kuju teada, kuid antud juhul võib teha järgmise lähenduse. On teada, et enamiku kunstlikult tekitatud aerosoolide osakeste suurusjaotuse tihedusfunktsioon on hästi lähen-

datav nn. logaritmnormaalne (LN) funktsiooniga (antud juhul normeeritud üheni) [1]:

$$f(\ln r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_g} \exp \left[-\frac{(\ln r - \ln r_g)^2}{2 \ln^2 \sigma_g} \right], \quad (26)$$

kus r on osakese raadius, r_g on osakeste geomeetriline keskmine raadius ning σ_g on jaotuse geomeetriline standardhälve, nii et $\ln^2 \sigma_g = D(\ln r) = \overline{(\ln r - \ln r_g)^2}$. Raadiuse järgi logaritmilises skaalas on antud funktsioon sümmeetriline Gaussi kõver, kus r_g on antud funktsiooni maksimumile vastav raadius. Kuna aerosooliosakeste jaotus on oluliselt laiem DMA ülekandefunktsioonist (joonis 5), siis valides DMA1 ülekandefunktsiooni keskpunkti liikuvuse selle jaotuse tipu läheduses, võib võtta $f(k) = n_0 = \text{const}$ ehk DMA1 väljundjaotusel on DMA1 ülekandefunktsiooni kuju. Konstandist n_0 vabanemiseks on vaja DMA2



Joonis 5: DMA ülekandefunktsiooni ning osakeste suurusjaotuse laiuste võrdlus. Illustreerimiseks on kasutatud juhtu, kus osakeste jaotuse maksimum (raadiuse järgi) asub kohal $r = 10$ nm.

väljundkontsentratsioon n_2 normeerida DMA1 väljundi kogukontsentratsioonini N_1 :

$$N_1 = \int_0^{\infty} H_1(k, k_0) n_0 dk, \quad (27)$$

$$\frac{n_2(k')}{N_1} = \frac{\int_0^{\infty} H_1(k, k_0) H_2(k, k') n_0 dk}{\int_0^{\infty} H_1(k, k_0) n_0 dk} = \frac{\int_0^{\infty} H_1(k, k_0) H_2(k, k') dk}{\int_0^{\infty} H_1(k, k_0) dk}. \quad (28)$$

Valem (28) esitab osakeste kontsentratsiooni DMA2 väljundis DMA1 poolt tekitatud osakeste (N_1 -ni normeeritud) jaotuse ning DMA2 ülekandefunktsiooni sidumina. Seega on DMA-de ülekandefunktsioonide leidmiseks vaja arvutada nn. pöörsidum mõõdetud jaotuse $n_2(k')/N_1$ järgi. Selle teostamiseks kasutatakse algoritmi, mis vähimruutude mee-

todil lähendab iteratiivselt valemit (28) mõõdetud jaotusele DMA2 väljundis, varieerides ülekandefunktsioonide parameetrite α_1 ja β_1 ning α_2 ja β_2 väärtusi. Nende muutmiseks on kaks võimalust:

- Eeldatakse, et DMA1 ja DMA2 on identsed ning alustades oletatavate algväärtustega, muudetakse kummagi ülekandefunktsiooni vastavaid parameetreid α ja β üheaegselt.
- Arvutused tehakse (tuntud) DMA1 etteantud parameetritega α_1 ja β_1 ning muudetakse ainult DMA2 parameetreid α_2 ja β_2 .

Käesolevas töös on kasutatud mõlemat võimalust.

3 EKSPERIMENDI LÄBIVIIMISEL KASUTATUD SEADMETE JA TARKVARA KIRJELDUS

3.1 Katseskeem

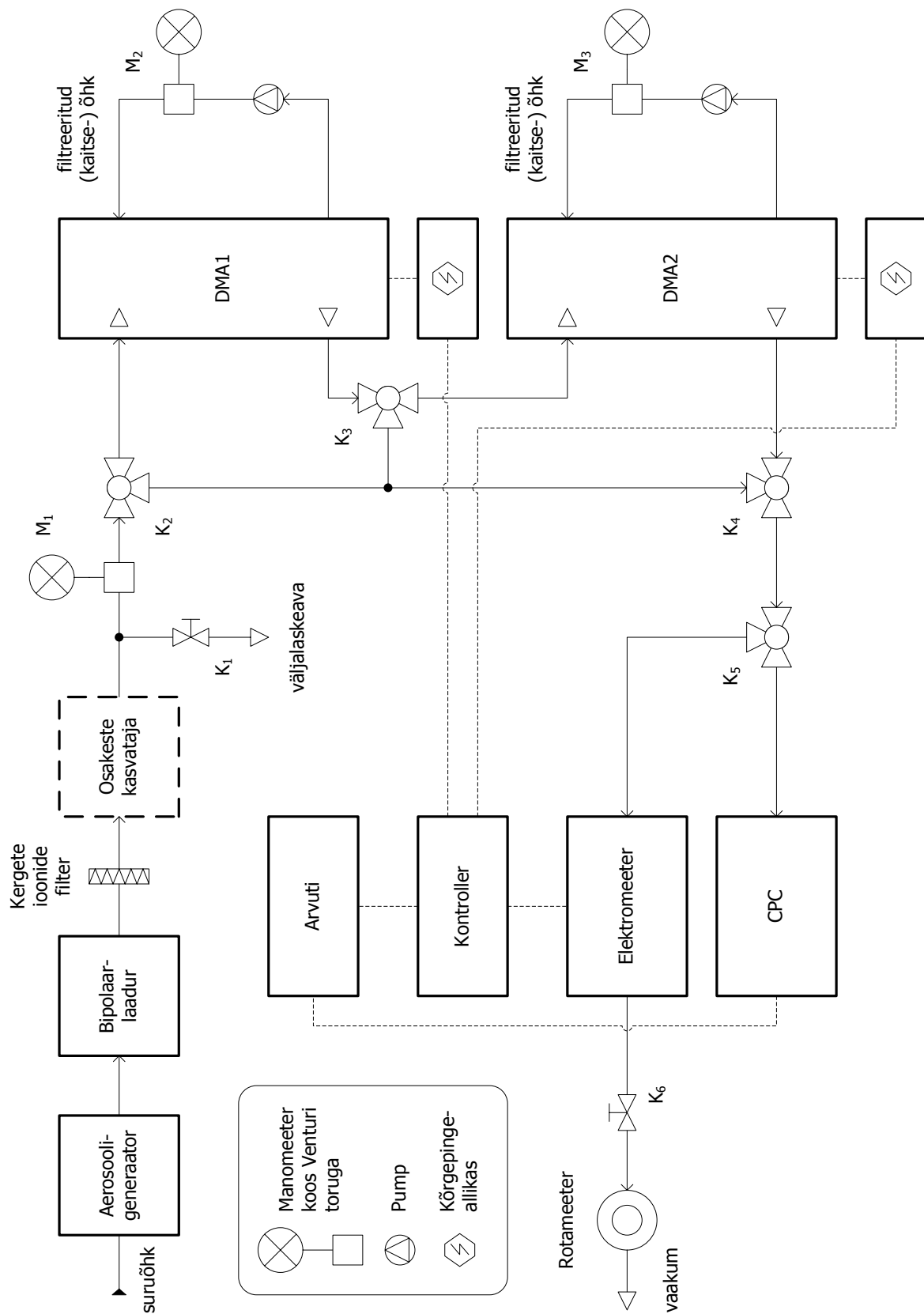
Eksperimendiseadmed on antud töös nn. tandem-DMA (TDMA) konfiguratsioonis (joonis 6), kus DMA2 abil mõõdetakse DMA1 tekitatud aerosooliosakeste liikuvusjaotust. DMA1-te kasutatakse siin sisuliselt osakeste kitsa suurusjaotusega aerosooli generaatorina, sellisel juhul nimetatakse seda seadet osakeste separaatoriks ehk klassifikaatoriks. Kasutatud katseskeem on järgmine.

Aerosooliosakeste tekitamiseks aurustatakse aerosooli kondensatsioonigeneraatoris kõrgel temperatuuril hõbedat. Hõbedauruga küllastunud õhu jahtumisel moodustuvad homogeense nukleatsiooni käigus tahked hõbedaosakesed, mille keskmine suurus sõltub generaatori temperatuurist. Temperatuuri muutmisega on võimalik tekitada osakesi läbimõõduga vahemikus 3...20 nm. Edasi juhitakse aerosool osakeste laadurisse, milles plutooniumoksiidi pinnalt emiteeritud α -osakesed tekitavad bipolaarse iooniatmosfääri. Seal segunevad aerosooliosakesed ionidega ning toimub aktiivne laengute vahetus. Laadurist väljudes on aerosool omandanud statsionaarse (või selle lähedase) laengujaotuse. Osakesetelaaduri järel on elektriline filter, mille ülesandeks on eemaldada laadurist koos aerosooliosakestega väljunud kerged ionid, mis võivad põhjustada kordsete laengutega osakeste tekkimist. Filtris juhitakse aerosooliosakeste ja kergete ionide segu pingestatud elektroodide vahelt läbi, kus ionid sadestuvad elektroodidele. Aerosooliosakeste liikuvus on ionide omast oluliselt väiksem, mistõttu suurem osa neist läbib filtri.

Järgnevalt suunatakse aerosool osakeste kasvatajasse. Seadme põhiosaks on silindri-line toru, millele on mähitud krooni ja nikli sulamist küttetraat. Silindri siseseinal on poorne taht, mida immutatakse seadme ülaosas asuvasse spetsiaalsesse kambrisse valatava dioktüülfalaadiga (DOP). Silindri välisseina kuumutamisel hakkab DOP tahti pinnalt aurustuma. Aerosooliosakesed sisenevad silindri ülaosast ning silindri sees tekib aerosooli, õhu ja auru segu. See segu väljub silindrist jahutatud toru kaudu, kus aur kondenseerub aerosooliosakestele, kasvatades need üles⁵.

Osakeste kasvataja järel saab kraani K_1 abil reguleerida aerosooli voolu ruumkiirust. Ruumkiirust mõõdetakse manomeetri M_1 abil, kasutades selleks Venturi torus tekkiva rõhkude vahe sõltuvust toru läbiva õhuvoolu kiirusest. Edasi juhitakse aerosool kolmekäiguliste kraanide K_2 ja K_4 kaudu kontsentratsiooni mõõtmiseks kraani K_5 suunas või esimesse liikuvusanalüsaatorisse. DMA1-s eraldatakse välja kitsasse liikuvustevahemikku jäävad osakesed, mis jõuavad kraanide K_3 ja K_4 abil jällegi kraani K_5 juurde või DMA2 sissendisse. Teise liikuvusanalüsaatori väljundosakesed läbivad kraani K_4 ning jõuavad kraanini K_5 .

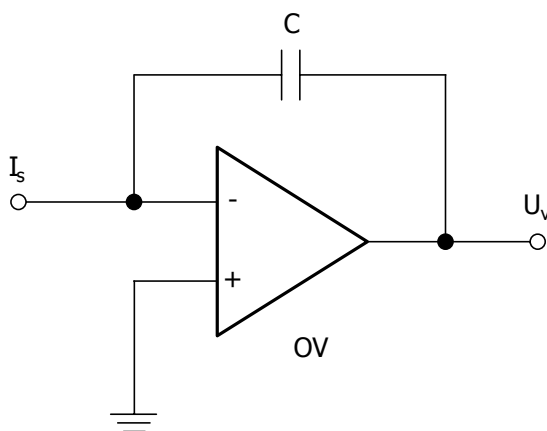
⁵Osakeste kasvataja ning elektriline filter on kasutuses ainult suuremate osakeste tekitamisel.



Joonis 6: DMA ülekandefunktsiooni määramise skeem.

DMA-de kaitseõhu (i.k. *sheath air*) voolude ruumkiirusi mõõdetakse manomeetrite M_2 ja M_3 abil ning reguleeritakse õhuvoole tekitavate pumpade tiivikute pöörlemiskiiruste muutmise teel. Käesolevas töös on kasutatud skeemi, kus kaitseõhk on ringlevas kasutuses st. DMA-st väljunud kaitseõhk suunatakse läbi „absoluutse“ filtri (filtri efektiivsus 99.999%) uuesti DMA-sse (joonisel 2 kujutatud Φ_1 ja Φ_4 on võrdsed).

Kraani K_5 abil valitakse aerosooliosakeste kontsentratsiooni mõõtmiseks kasutatav seade. Kontsentratsiooni saab mõõta osakesteloenduriga (i.k. CPC – *Condensational Particle Counter*) (kasutusel on firma TSI toodetav CPC mudel 3025A [17]) või elektromeetri abil, mis mõõdab aerosooliosakeste poolt ülekantavat voolu. Elektromeeter koosneb isoleeritud „absoluutsest“ filtrist ning sellega ühendatud integraatorist (i.k. *faraday cup electrometer*) (joonis 7). Mõõtes korduvalt integraatori väljundpinget ajavahemiku Δt järel, on võimalik



Joonis 7: Integraatori põhimõtteskeem.

leida selle sisendvoolu järgmise valemi abil:

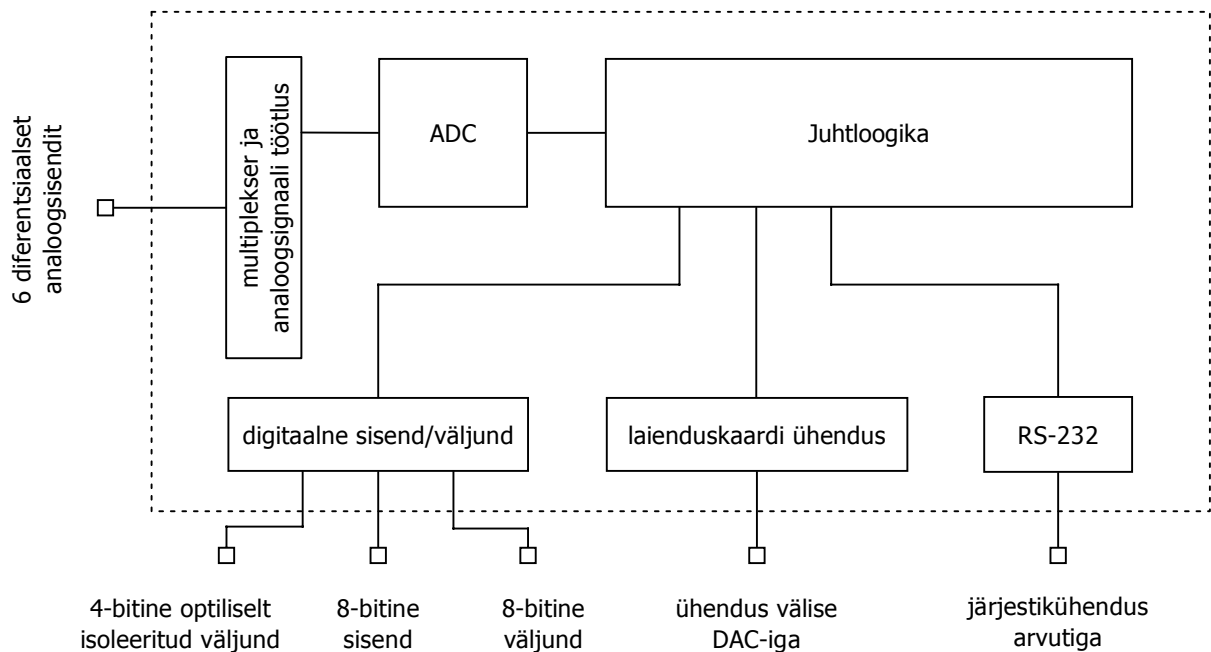
$$I = \frac{U_2 - U_1}{\Delta t} C, \quad (29)$$

kus C on joonisel 7 kujutatud kondensaatori mahtuvus. Kui elektromeetrisse sisenevad osakesed on ühemärgiliselt laetud ning iga osake kannab laengut $1e$, siis teades aerosooli ruumikiirust, saab osakeste kontsentratsiooni (osakeste arv ruumalaühikus) leida integraatori sisendvoolu järgi:

$$kots. = \frac{I}{e \Phi} \quad (30)$$

(e on elementaarlaeng ja Φ aerosooli ruumikiirus). Ruumikiirust mõõdetakse elektromeetri järel asuva rotameetriga ning reguleeritakse kraani K_6 abil. Kuna elektromeetri tundlikkus võib osutada väikseseks aerosooliosakeste madalate kontsentratsioonide korral ning CPC-l on mõõtmiste täpsus madal väikeste osakeste korral⁶, siis sõltub valik elektromeetri või CPC kasutamise kohta konkreetse katse tingimustest. Samas on kraani K_5 vastava asendi seadmisel võimalik kasutada mõlemat seadet ka samaaegselt.

⁶Osakeste läbimõõdu 3 nm juures on CPC-s nende detekteerimise tõenäosus 50%, 5 nm juures 90%.



Joonis 8: Lawson 201 kontrolleri lihtsustatud plokk skeem.

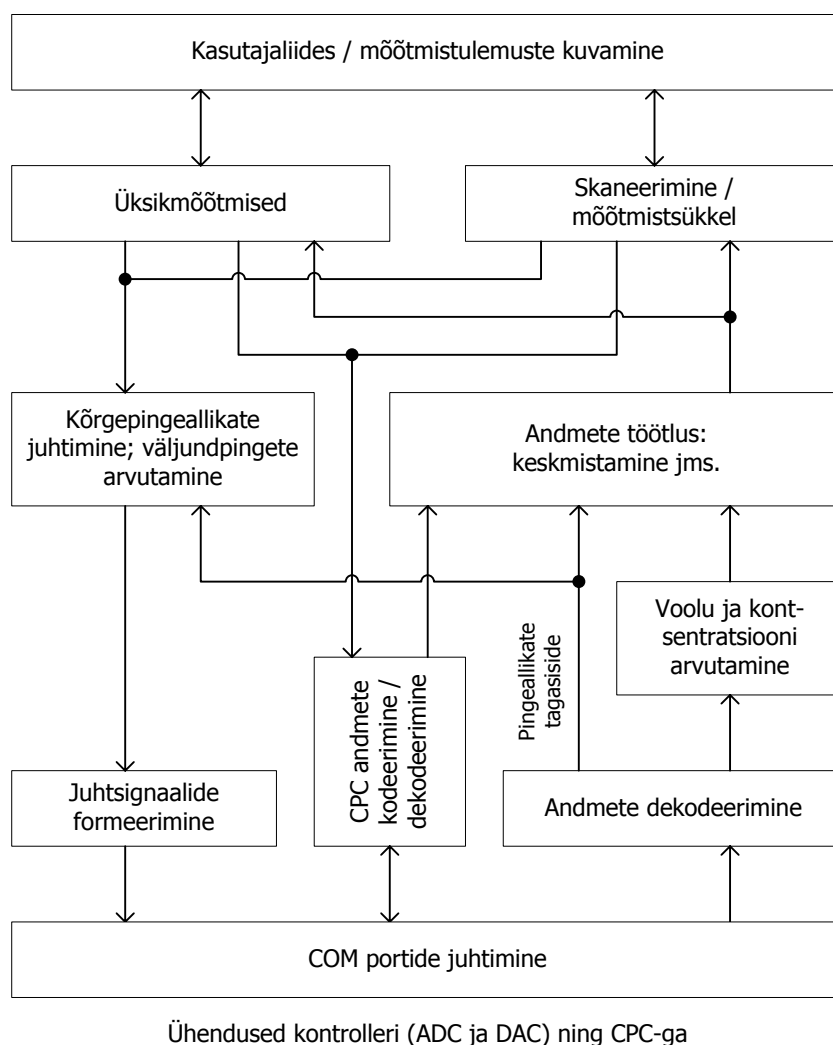
Eksperimendi juhtimiseks on süsteemis kõrgepingeallikad, mikrokontrollersüsteem ja personaalarvuti. Kõrgepingeallikate abil väljastatakse separaatoritele rakendatavad pinged (vahemikus mõned voldid kuni 10 kilovolti). Nad on oma olemuselt pingekordistid, mille väljundpinge on sisendpinge kordne väärtus. Sisendpinge saavad kõrgepingeallikad mikrokontrollersüsteemi kuuluvalt digitaal-analoog muundurilt. Mikrokontrolleriks on firma Lawson Labs poolt toodetav andmehõivesüsteem Lawson 201 [18] (joonis 8), mida on käesoleva töö vajadustest lähtuvalt modifitseeritud.

Lisaks kõrgepingeallikate tüürpingete väljastamisele on Lawson 201 kontrolleri ülesanneteks perioodiline aerosoolielektromeetri väljundi ja kõrgepingeallikate tagasisideahelate mõõtmine ning andmeside personaalarvutiga. Arvutis töötab spetsiaalselt antud töö vajadustest lähtuvalt koostatud tarkvara, millest on lähemalt räägitud järgmises punktis.

3.2 Ülevaade koostatud tarkvarast

Käesoleva töö käigus valmis eksperimendi läbiviimiseks vajalik tarkvara, mille ülesandeks on aparatuuri erinevate osade sünkroonne juhtimine ning mõõtmistulemuste kogumine ja töötlus reaalajas.

Joonisel 9 on esitatud tarkvara funktsionaalne plokk skeem (välja on jäetud välisseadmete ja programmi enda töö algparameetrite seadmise plokid) ning järgnevalt on välja toodud programmi töö põhilised osad (vt. ka joonis 6 lk. 23 ja Lisa C).



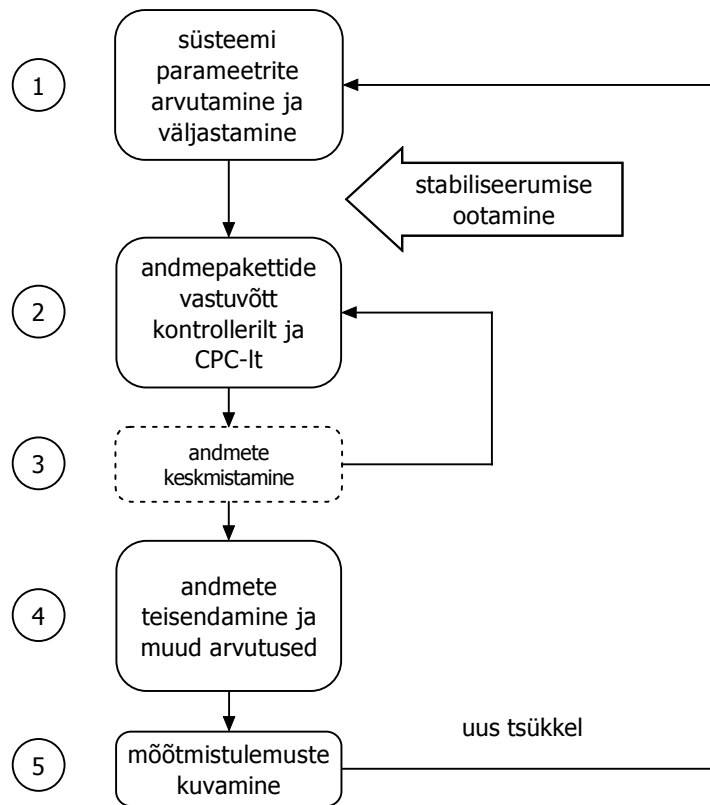
Joonis 9: Tarkvara funktsionaalne plokk skeem.

- *Lawson 201 kontrolleri töörežiimi seadmine.* Töö alguses antakse lähteparameetrid mitmetele kontrolleri sõlmedele (AD muundur jms). Seatakse muunduri kiirus, kvantimise resolutsioon, madalpääsfiltri pääsuriba, kasutatavad AD muunduri kanalid ning teatud sisemised taksagedused. Samuti teostatakse AD muunduri kalibratsioon. Andmeside kontrolleri ja arvuti vahel toimub RS-232 sideliini vahendusel.

- *Pingete väljastamine kõrgepingeallikate tüürimiseks.* Lawson'i kontrolleri jaoks on lisatud kahe kanaliga DA muundur, mille väljundpinget on võimalik seada teatud juhtkaskude saatmisega kontrolleri jaoks. Töö käigus viidi läbi antud DA muunduri kalibratsioon, mis võimaldab tarkvaras soovitud pingete väärtuste automaatset teisendamist kontrolleri jaoks edastatavateks juhtkaskudeks. Pinge väljastamisel võib kasutada ka tagasisidet (kõrgepingeallikatel on vastav väljund, kuhu antakse teatud koefitsiendiga jagatud tegelik väljundpinge), sel juhul kontrollitakse pärast pinget väljastamist kõrgepingeallika väljundil olevat tegelikku pinget ning vajadusel korrigeeritakse seda.
- *Kontrolleri mõõtmiste juhtimine.* Programmis valitakse mõõtmiste tüüp - kas üksikmõõtmine või korduv automaatne mõõtmine, ja saadetakse kontrolleri jaoks vastavad käsud. Iga mõõtmise sooritamise järel saadab kontrolleri tagasi teatud viisil kodeeritud mõõtmistulemused.
- *CPC mõõtmiste juhtimine.* Siin on võimalikud ainult üksikmõõtmised, mistõttu CPC ja arvuti vahel toimub pidev kahepoolne andmeside - CPC-le saadetakse päringud mingi konkreetse mõõdetava suuruse kohta⁷ ning vastu saadakse mõõtmistulemused. Ka siin toimub andmeside RS-232 sideliini vahendusel.
- *Andmete töötlus ja esitamine.* CPC-lt ja Lawson'i kontrolleri jaoks saadud andmed tuleb esmalt dekodeerida, sest esialgu on tegemist ainult baitide jadaga. Kuna CPC edastab infot ASCII koodis, siis käideldavate numbriliste andmete saamine taandub ühele lihtsale programmeerimise tegevusele. Lawson'i kontrolleri puhul on aga teisendus rohkem. Kõigepealt tuleb erinevate kontrollibaitide hulgast eraldada välja kontrolleri 24 bitise AD muunduri jaoks saadud 3 baiti, mis seejärel vastava kalibratsioonivalemi abil mõõdetud pingeks teisendatakse. Edasi töödeldakse andmeid vastavalt sellele, mida mõõdeti - kui mõõdeti kõrgepingeallika väljundpinget, siis korrutatakse saadud väärtus lihtsalt teatud koefitsiendiga. Kui aga on tegemist elektromeetri väljundpingega, siis arvutatakse kõigepealt kahe järjestikuse pingelugemi alusel integraatori sisendvool ja selle alusel leitakse elektromeetrisse sisenenud aerosooliosakeste kontsentratsioon. Saadud tulemused esitatakse programmis tabeli vormis ja graafikuna ning andmeid saab ka erinevates formaatides salvestada.

Programm võib töötada kahes režiimis - esimesel juhul määratakse programmis käsitsi süsteemi parameetrid (DMA ülekandefunktsiooni tipu asukoht jms.) ning sooritatakse aerosooliosakeste kontsentratsiooni üksikmõõtmisi. Teisel juhul, nn. skaneerivas režiimis, viib programm etteantud reeglite järgi automaatselt läbi rea mõõtmisi, „skaneerides“ üle uuritavate aerosooliosakeste liikuvusspektri. Järgnevalt on skaneerimise protsessi lähemalt kirjeldatud.

⁷CPC-lt on võimalik saada mitmesuguseid andmeid - registreeritud aerosooliosakeste arv mingi ajavahemiku jooksul, osakeste kontsentratsioon jms. ning ka andmeid CPC enda sisemiste tööparameetrite kohta.



Joonis 10: Skaneerimise protsessi etapid.

Enne skaneerimise algust sooritatakse programmis mitmesuguseid sisemisi protseduure (küsitakse mälu mõõtmistulemuste jaoks, kustutatakse vanad andmed jms.) ning seejärel saadetakse kontrolleriile käsk mõõtmiste alustamiseks. Kontrolleri töötab oma sisemisel skaneerival režiimil (mitte segamini ajada skaneerimisega programmis), kus mõõtmisi sooritatakse kindlate ajavahemike järel ja mõõtmistulemused saadetakse kohe arvutisse. Programm kasutab saadud andmeid või mitte, olenevalt missugune mõõtmiste etapp hetkel käimas on. Kuna Lawson'i kontrolleri sisemise kella taktsignaali genereeritakse kvartsi abil, siis võimaldab selline töökorraldus saavutada oluliselt suuremat täpsust aja arvestamisel, kui seda oleks võimalik programse taimeriga abil⁸. Edasi kulgeb programmi töö järgmiselt (joonis 10):

1. Esmalt arvutatakse DMA-dele rakendatavad pinged. Pingete väärtuste leidmisel arvestatakse mõõtmiste algus- ja lõpp-punktidele vastavaid pingeid, mõõtepunktide arvu, hetkel käimasoleva mõõtmistsükli numbrit ning mõõtepunktide skaalat (lineaarne või logaritmiline). Seejärel kontrollitakse, kas arvutatud pinge jääb kõrgepingeallika hetkel valitud piirkonda ning vajadusel antakse kasutajale korraldus piirkonna muutmiseks. Lõpuks väljastatakse pinged, kasutades soovi korral tagasisidet.

⁸Täpsus aja mõõtmisel on siin oluline, kuna elektromeetri sisendvoolu arvutamiseks (vt. lk. 24) on vaja võimalikult täpselt määrata aega tema väljundpinge kahe mõõtmise vahel.

Pärast pinge väljastamist oodatakse ettemääratud aja jooksul (see on määratud aerosooli läbivooluajaga DMA-s, seega põhiliselt Φ_1 -ga, ning jääb enamasti mõnekümne sekundi piiridesse) aerosooliosakeste jaotuse väljakujunemist DMA väljundis ning alles seejärel jätkatakse mõõtmistega.

2. Nüüd „avatakse“ sisend kontrolleri andmepakettidele, mis seni lihtsalt kõrvale jäeti. Andmepaketi saabumisel leitakse selle põhjal kõrgepingeallikate pinged (mõõtmistulemustena lähevad kirja DMA-del olevad tegelikud pinged, mitte eelmises punktis arvatud väärtused, kuna need ei pruugi täielikult kokku langeda), ning elektromeetri väljundpinge. Kuna elektromeetri voolu arvutamiseks on vaja ka teist pingelugemist, siis jäädakse järgmist andmepaketti ootama; kui aga integreerimisel on vajalik suurem täpsus, siis kasutatakse mitte järgmist, vaid mõnda hilisemat andmepaketti (kontroller sooritab mõõtmisi varem määratud intervallidega, ning seda muuta ei saa). Kui voolu arvutamine on lõppenud, siis saadetakse päring CPC-le ning registreeritakse vastusaadetud mõõtmistulemused.
3. Järgnevalt toimub juhuslike mürade mõju vähendamiseks andmete keskmistamine (kui programmi seadetes on see valitud). Selleks läbitakse eelmist etappi vajalik arv kordi ning saadud andmetest arvutatakse keskmine.
4. Kuna antud protsessi käigus mõõdetakse reaalselt ainult mitmesuguseid pingeid, siis käesolevas etapis toimub nende väärtuste teisendamine, leidmaks uuritavat aerosooli otseselt iseloomustavaid parameetreid. Siin arvutataksegi eelnevalt mõõdetud elektromeetri väljundpingete põhjal aerosooliosakeste poolt ülekantud vool ning selle kaudu omakorda nende kontsentratsioon. DMA-dele rakendatud kõrgepinge (ning õhuvoolude ruumkiiruste) väärtuste järgi leitakse seadme väljundosaakeste keskmine liikuvus ning raadius.
5. Järgnevalt kuvatakse saadud tulemused tabelina ning joonistatakse graafik. Hetkel tabeli veergudes esitatavaid andmeid ja graafiku telgedel olevaid suurusi on võimalik valida, st. näiteks kas DMA väljundosaakesi iseloomustatakse nende liikuvuse, raadiuse või DMA-dele rakendatud pinge järgi ning kas graafikul on osakeste kontsentratsiooni sõltuvus nende raadiusest või on hoopis esitatud 20 sekundi jooksul loendatud osakeste arvu ja nende liikuvuse seos. Pärast skaneerimise lõppu saab tabuleeritud andmeid erinevates formaatides ka salvestada ning samuti on võimalik printida või salvestada kuvatud graafikut.

Sellega on skaneerimise üks tsükkel lõppenud. Mõõtmiste jätkumisel algab kõik uuesti, kui aga tegemist oli viimase mõõtepunktiga, siis peatatakse protsess. Lawson'i kontrolleri saadetakse käsk skaneerimise lõpetamiseks, COM-pordi ja mitmesugused sisemised andmepuhvrid tühjendatakse ning kasutajaliidesel aktiveeritakse teatud võimalused, mis skaneerimise ajal olid blokeeritud. Viimane on vajalik, vältimaks olukorda, kus kasutajal võib töö keskel tekkida võimalus tahtmatult modifit-

seerida veel töötusel olevaid andmeid, mis võib viia mittekorrektsete katsetulemuste tekkimiseni või halvimal juhul programmi töö peatumiseni.

Antud tarkvara on koostatud eelkõige käesoleva töö, ning üldisemalt tulevaste nn. tandem-DMA eksperimentide vajadustest lähtuvalt, kuid silmas on peetud ka võimalust programmi rakendamiseks teistsuguse seadmete konfiguratsiooniga aerosoolieksperimentide juhtimiseks. Seetõttu on programmi ülesehitus väga paindlik ning kergesti kohandatav konkreetse eksperimendi vajadustega.

Valminud tarkvara on kirjutatud keeles Delphi ning töötab Windows keskkonnas. Programmi lähtetekst sisaldab ligi 5000 rida koodi ning selle kirjutamine oli ka kõige aeganõudvam etapp antud töö juures. Ülesannet raskendas ka asjaolu, et tarkvara kirjutamise ajal oli Lawson 201 kontrolleri ametlik dokumentatsioon väga puudulik, mistõttu antud seadme töö mitmed eripärad selgusid nn. katse-eksitus meetodil.

4 TULEMUSED

4.1 Eksperimendi teostamise ja andmeanalüüsi metoodika

Erinevate diferentsiaalsete liikuvusanalüsaatorite tegelike ülekandefunktsioonide määramiseks viidi läbi rida mõõtmisi. Kasutusel oli joonisel 6 esitatud katseskeem, kus DMA1 ja DMA2 rolli täitsid antud katses parasjagu uuritavad liikuvusanalüsaatorid.

Enne iga katset mõõdeti ühe analüsaatoriga üle generaatori tekitatud osakeste jaotus, määramaks täpselt selle maksimumi asukohta (et leheküljel 20 kirjeldatud konstantsuse tingimus oleks täidetud) ning edasisteks mõõtmisteks seati DMA1 pinge nii, et selle ülekandefunktsiooni tipp asuks leitud maksimumi kohal liikuvuste skaalal. Järgnevalt skaneeriti DMA2 pinge astmelise muutmisega üle DMA1 väljundis tekkinud aerosooliosakeste jaotuse, registreerides skaneerimise igas punktis DMA2 väljundi osakeste kontsentratsiooni. Pärast iga skaneerimist mõõdeti ka DMA1 väljundi osakeste kogukontsentratsiooni.

Enne ja pärast iga katset kontrolliti süsteemi parameetrite – õhuvoolude ruumkiirused, aerosooligeneraatori toitepinge jms. püsivust, samuti viidi enne eksperimentide algust läbi õhuvoolude ruumkiiruste määramiseks kasutatud diferentsiaalmikromanomeetrite kalibratsioon.

Saadud andmete analüüsimiseks lähendati valemiga (28) määratud funktsiooni eksperimentis registreeritud andmetele $(n_2/N_1)_i$, k_i . Selleks kasutati vähimruutude meetodit, kus ülekandefunktsiooni H mudeli parameetrite α ja β varieerimisega otsiti summa

$$S(\alpha, \beta) = \sum_i [(n_2/N_1)_i - n_2(k_i, \alpha, \beta)/N_1]^2 \quad (31)$$

miinimumi. Leitud parameetrite alusel koostati seejärel antud ülekandefunktsiooni graafik ning leiti aerosooliosakeste teoreetiline (mudel-) arvkontsentratsiooni jaotus DMA2 väljundis valemi (28) järgi.

Arvutuste tulemusi esitavad graafikud on kõik koostatud nii, et x-teljel olevaks suurus on antud jaotuse (funktsiooni) tipu asukoha järgi normeeritud liikuvus. See on vajalik selleks, et erinevatel osakeste suurustel mõõdetud jaotusi oleks mugav omavahel võrrelda. Samuti on nõnda võimalik korrigeerida erinevate seadmete väljundjaotuse maksimumi asukoha erinevat nihet sisendaerosooli jaotuse maksimumi suhtes, mida on täheldanud ka teised autorid [5][13], kuid mille põhjus ei ole täpselt teada.

Andmete töötlus viidi läbi programmi MathCad™ abil ning kirjeldatud meetodi realisatsioon koos kommentaaridega on esitatud MathCad-i töölehenähtel lisas A (lk. 45).

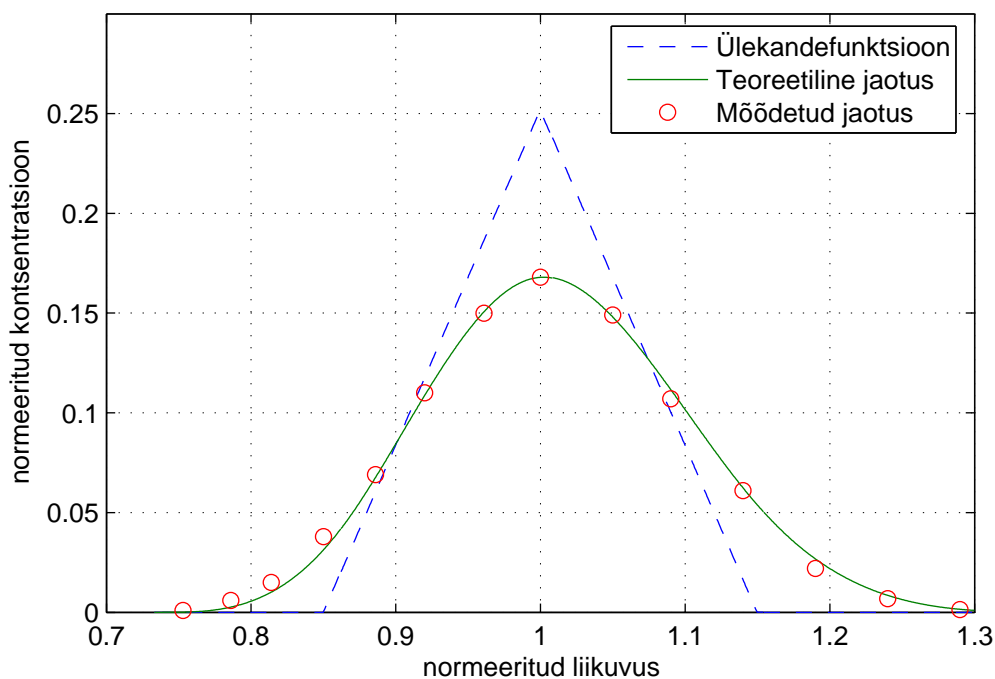
4.2 Viini tüüpi DMA ülekandefunktsiooni määramine

Antud eksperimentis määrati kahe identse liikuvusanalüsaatori ülekandefunktsiooni. Kasutatud DMA-deks olid Tartu Ülikooli Keskkonnanäüüsika instituudis valmistatud Viini tüüpi liikuvusanalüsaatorid. Kasutatud seadmete tööparameetrid antud katse korral olid järgmised:

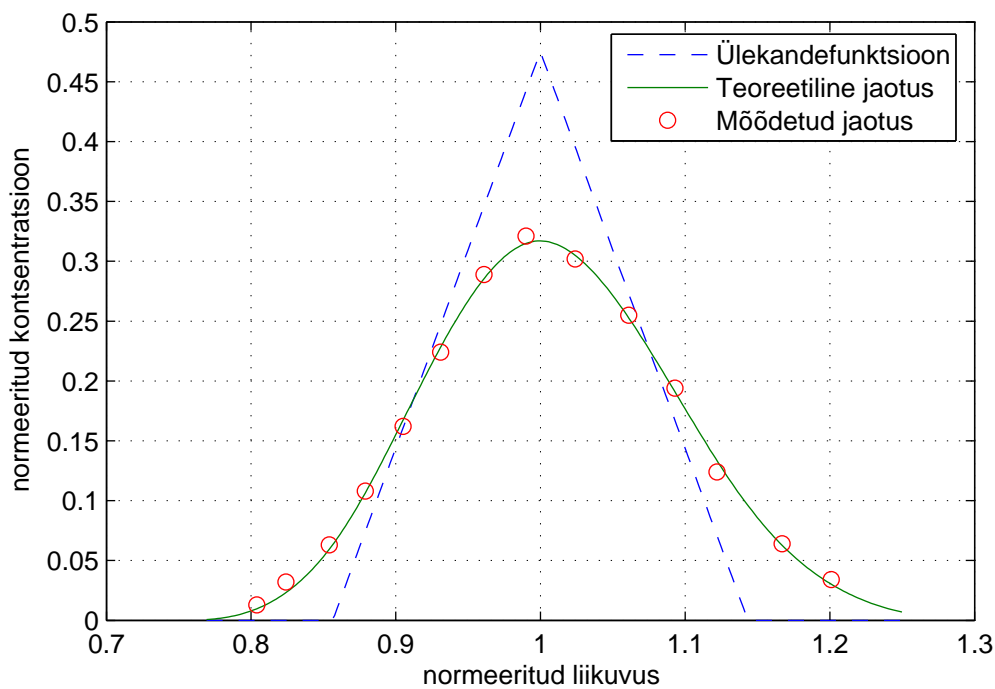
- DMA-de silindri väline raadius: 25 mm,
- DMA-de silindri sisemine raadius: 19 mm,
- DMA-de mahtuvus: 19.85 pF,
- aerosooli ruumkiirus: 150 l/h,
- kaitseõhu ruumkiirus: 1500 l/h (ruumkiiruste suhe mõlema DMA korral 0.1)

Mõlemad seadmed olid ühesuguse konstruktsiooniga ning töötasid ühesugustes tingimustes.

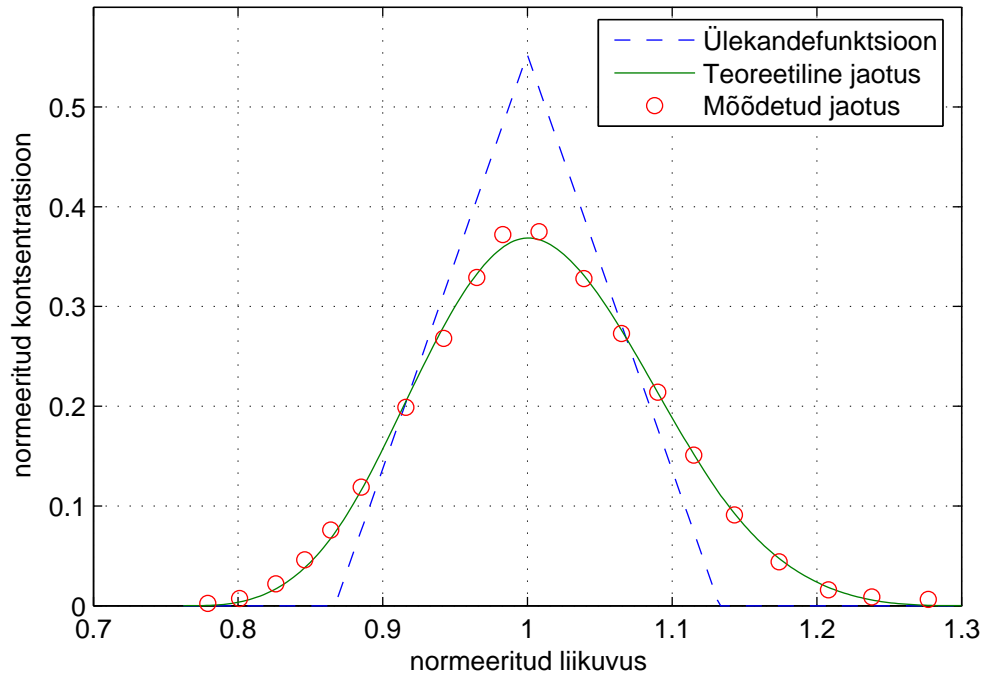
Katsed viidi läbi DMA1 ülekandefunktsiooni tipule vastava osakeste raadiuse kolme erineva väärtuse juures: 5 nm, 10 nm ja 37 nm (edaspidi DMA1 modaalaradius), kus iga kord registreeriti eelnevalt kirjeldatud viisil normeeritud DMA2 väljundjaotus. Seejärel töödeldi saadud andmeid, kasutades lihtsat vähimruutude algoritmi, varieerides eelnevalt esitatud valemi (28) parameetreid mõlema DMA jaoks korraga (st. $\alpha_1 = \alpha_2$ ja $\beta_1 = \beta_2$). Iga DMA1 modaalaradiuse juures määrati liikuvusanalüsaatorite ülekandefunktsiooni kirjeldavad suurused α ja β . Leitud parameetrite α ja β väärtused on toodud tabelis 1. Joonistel 11 – 13 on esitatud DMA2 väljundi mõõdetud jaotused ning neile lähendatud mudeli kõverad iga kasutatud osakeste suuruse korral. Toodud on ka arvutuste käigus määratud ülekandefunktsioonid.



Joonis 11: DMA2 arvutatud ja mõõdetud väljundjaotuste võrdlus ning Viini tüüpi liikuvusanalüsaatori ülekandefunktsioon, DMA1 modaalaradiuse $r = 5$ nm juures ($\alpha = 0.252$, $\beta = 0.150$).



Joonis 12: DMA2 arvutatud ja mõõdetud väljundjaotuste võrdlus ning Viini tüüpi liikuvusanalüsaatori ülekandefunktsioon, DMA1 modaalaradiuse $r = 10$ nm juures ($\alpha = 0.475$, $\beta = 0.143$).



Joonis 13: DMA2 arvutatud ja mõõdetud väljundjaotuste võrdlus ning Viini tüüpi liikuvusanalüsaatori ülekandefunktsioon, DMA1 modaalaradiuse $r = 37$ nm juures ($\alpha = 0.553$, $\beta = 0.133$).

4.3 TSI nanoDMA ülekandefunktsiooni määramine

Antud eksperimendi ülesehitus on sarnane eelmisega, kuid kasutatud on kahte erinevat liikuvusanalüsaatorit: DMA1 on eelmises katses uuritud Viini tüüpi liikuvusanalüsaator ning DMA2 on firma TSI poolt valmistatud nanoDMA⁹. Kasutatud seadmete parameetrid on järgmised:

- DMA1 silindri väline raadius: 25 mm,
- DMA1 silindri sisemine raadius: 19 mm,
- DMA1 mahtuvus: 19.85 pF,
- DMA1 aerosooli ruumkiirus: 150 l/h,
- DMA1 kaitseõhu ruumkiirus: 1500 l/h,
- DMA2 silindri väline raadius: 19.05 mm,
- DMA2 silindri sisemine raadius: 9.37 mm,
- DMA2 mahtuvus: 3.94 pF,

⁹Kasutati TSI poolt toodetavat seadet nimega SMPS - *Scanning Mobility Particle Sizer*, mille koosseisu kuuluvad elektriline klassifikaator ning CPC.

- DMA2 aerosooli ruumkiirus
osakeste raadiuse 5 ja 10 nm korral: 90 l/h,
osakeste raadiuse 37 nm korral: 18 l/h,
- DMA2 kaitseõhu ruumkiirus
osakeste raadiuse 5 ja 10 nm korral: 900 l/h,
osakeste raadiuse 37 nm korral: 180 l/h

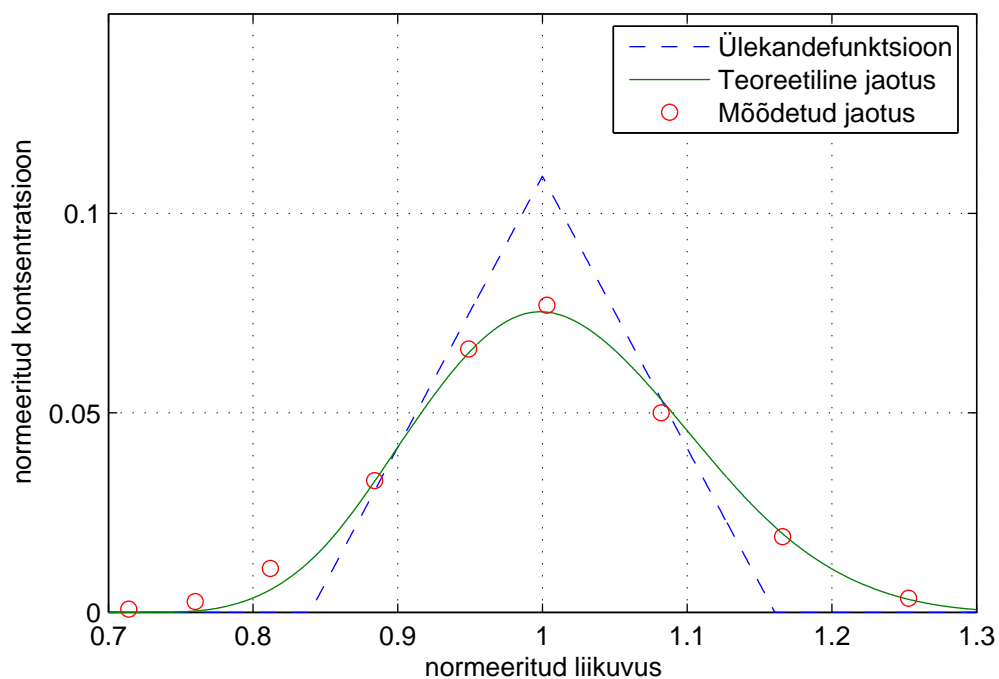
Nagu näha, ei olnud antud katse korral liikuvusanalüsaatorite õhuvoolude ruumkiirused võrdsed. See on tingitud asjaolust, et SMPS ei ole käesolevas töös kasutatud režiimi korral võimeline tekitama õhuvoole suurema ruumkiirusega kui 90 l/h (37 nm piirkonnas 18 l/h). Samas oli kõigi katsete korral õhuvoolude ruumkiiruste suhe kummaski DMA-s 0.1. Kuna DMA1 juures kasutatavad diferentsiaalmanomeetrid olid kalibreeritud vastavalt 150 l/h ja 1500 l/h õhuvoolude ruumkiiruste jaoks, siis osutus antud katse korral ka vajalikuks kompenseerida DMA-de erinevate ruumkiiruste vahet, milleks lisati DMA1 väljundisse sobiva ruumkiirusega õhu väljatõmme.

Andmete töötamise meetodika sarnaneb samuti eelmises punktis kirjeldatule, kuid kuna antud juhul oli tegemist kahe erineva liikuvusanalüsaatoriga, siis erines siin vähimruutude algoritmis parameetrite α ja β varieerimise viis. Käesolevas katses võeti eelmises punktis leitud α_1 ja β_1 väärtused ning muudeti α_2 ja β_2 väärtusi. Katsed sooritati kolmel erineval DMA1 modaalaradiuse väärtusel: 5 nm, 10 nm ja 37 nm¹⁰, ning leitud DMA2 ülekandefunktsiooni parameetrid on toodud tabelis 1. Joonistel 14 ja 15 on esitatud DMA2 väljundi mõõdetud jaotus ning viimasele lähendatud mudeli kõver iga kasutatud osakeste suuruse korral. Toodud on ka arvutuste käigus määratud ülekandefunktsioonid.

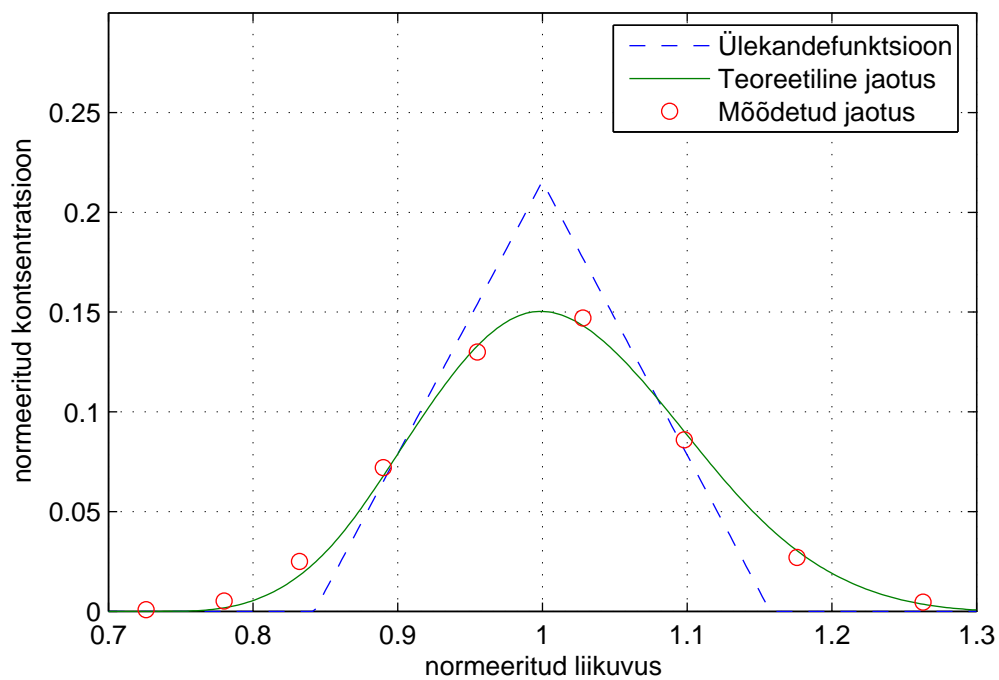
osakeste raadius		5 nm	10 nm	37 nm
Viini tüüpi	α	0.252	0.475	0.553
DMA	β	0.150	0.143	0.133
TSI	α	0.109	0.216	0.3
nanoDMA	β	0.161	0.158	0.15

Tabel 1: Viini tüüpi DMA ja TSI nanoDMA kolmel osakeste suurusel määratud ülekandefunktsioonide parameetrid.

¹⁰Osakeste raadiuse 37 nm juures ei õnnestunud tehnilistel põhjustel TSI nanoDMA ülekandefunktsiooni korrektselt määrata ning α ja β kohta on esitatud teiste katsetega võrreldes väiksema täpsusega hinnangud.



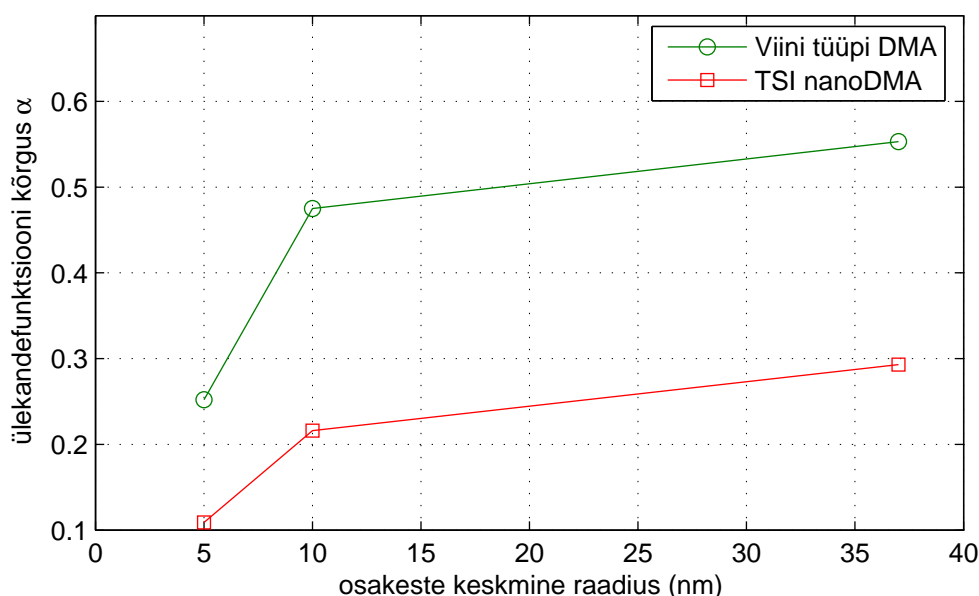
Joonis 14: DMA2 arvutatud ja mõõdetud väljundjaotuste võrdlus ning TSI nanoDMA ülekandefunktsioon, DMA1 modaalaradiuse $r = 5$ nm juures ($\alpha = 0.109$, $\beta = 0.161$).



Joonis 15: DMA2 arvutatud ja mõõdetud väljundjaotuste võrdlus ning TSI nanoDMA ülekandefunktsioon, DMA1 modaalaradiuse $r = 10$ nm juures ($\alpha = 0.216$, $\beta = 0.158$).

4.4 Tulemuste analüüs

Joonistel 16 ja 17 on esitatud ülekandefunktsiooni parameetrite α ja β sõltuvused osakeste suurusest Viini tüüpi DMA ja TSI nanoDMA jaoks. Nagu graafikutelt näha, suureneb α väärtus osakeste kasvades ning alates mingist väärtusest selle kasv aeglustub oluliselt. See on seletatav difusiooni mõju vähenemisega suuremate osakeste korral, mis tähendab, et osakeste difusioonist tingitud kaod liikuvusanalüsaatoris kahanevad. Võib ka oletada, et alates osakeste suurusest ligikaudu 20 nm α kasv praktiliselt lakkab ning kaod DMA-s ei sõltu enam osakeste suurusest. Täpset üleminekupiirkonda on antud graafikutelt katsepunktide vähesuse tõttu raske hinnata.

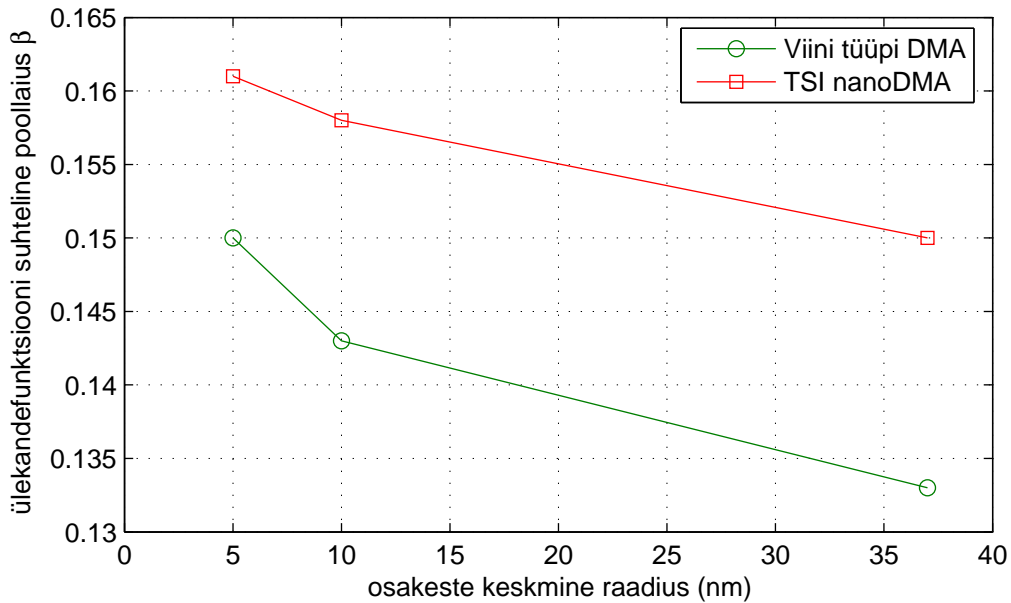


Joonis 16: Ülekandefunktsiooni kõrguse α sõltuvused osakeste suurusest Viini tüüpi DMA ja TSI nanoDMA korral.

Ülekandefunktsiooni suhteline poollaius β väheneb osakeste suuruse kasvades, mis on samuti seletatav difusiooni mõjude vähenemisega. Lisaks võib ka β puhul oletada üleminekupiirkonna olemasolu, millest suuremate osakeste korral ülekandefunktsiooni suhteline poollaius enam osakeste suurusest praktiliselt ei sõltu.

Esitatud graafikutel ning tabelis 1 ilmnevad ka kasutatud Viini tüüpi DMA ja TSI nanoDMA töö oluliselt erinevad parameetrid. Nagu näha, on nanoDMA-l suuremad osakeste kaod kui Viini tüüpi seadmel: isegi 37 nm juures, kus difusiooni mõjud on eelduste kohaselt väga väikesed, on nanoDMA α väärtus ainult veidi suurem kui Viini tüüpi DMA oma 5 nm juures. Ligikaudselt on kaod nanoDMA-l kaks korda suuremad kui Viini tüüpi seadmetel kõigi osakeste mõõdetud suuruste korral.

Kadude erinevuse tõenäoline põhjus peitub seadmete erinevas aerosooli sisselaskeava konstruktsioonis – Viini tüüpi DMA korral paiknevad sisselaskedüüsid tangentsiaalselt ning silindri radiaalsihi suhtes väikese nurga all, mille eesmärk ongi kadude vähendami-



Joonis 17: Ülekandefunktsiooni suhtelise poollaiuse β sõltuvused osakeste suurusest Viini tüüpi DMA ja TSI nanoDMA korral.

ne. Samas ei saa kõiki osakeste kadusid liikuvusanalüsaatorite konstruktsiooni erinevusega põhjendada. Kuigi sooritatud katsete käigus püüti erinevate liikuvusanalüsaatorite ja teiste mõõteseadmete kasutamisel tagada võimalikult ühesugust ühendustorude pikkust, ei olnud see seadmete ja kogu süsteemi ehitusest tulenevatel põhjustel siiski alati täielikult võimalik ning oletada võib, et sellest tingituna ei olnud osakeste kaod ühendustorudes iga katse korral täiesti ühesugused. Hinnanguliselt on aga ühendustorude erinevast pikkusest tingitud kadude erinevus vähemalt suurusjärgu võrra väiksem seadmete konstruktsioonilistest eripäradest põhjustatuist.

Kuigi difusiooni mõju võib olla tugev, ei saa liikuvusanalüsaatori ülekandefunktsiooni parameetrite erinevust ideaalse juhu väärtustest täielikult sellega seletada. Nagu tabelist 1 lk. 35 näha, on ka osakeste suuruse $r = 37$ nm juures, kus difusiooni mõju peaks olema väga väike, siiski ülekandefunktsioonide laiused ideaalsetest väärtustest erinevad. Selline ülekandefunktsiooni laienemine on tõenäoliselt põhjustatud väikestest ebatäpsustest liikuvusanalüsaatorite konstruktsioonis (mittekontsentrisus, silindri telgede mitteparalleelsus) ja olulisel määral õhuvoolu kiiruse ebahürtlustest rõngaspilu perimeetri ulatuses. Kuna antud põhjustest tulenev ülekandefunktsiooni poollaiuse suurenemine on kummagi DMA jaoks erinev, siis on sellega tõenäoliselt selgitatav ka Viini tüüpi DMA ja TSI nanoDMA β -de erinevused kõikidel osakeste suurustel. Teine võimalik põhjus antud seadmete ülekandefunktsioonide poollaiuste erinevuseks on aerosooliosakeste erinev läbilennuaeg kummaski liikuvusanalüsaatoris. Seadmete geometriaal ja õhuvoolude ruumkiirustel põhinevad arvutused näitavad, et TSI nanoDMA korral viibivad osakesed tõepoolest kauem liikuvusanalüsaatori tööpiirkonnas, mille tõttu difusiooni mõjud võimenduvad. Samas ei ole võimalik sellega põhjendada ülekandefunktsioonide poollaiuste erinevust suuremate osakeste korral, kus difusiooni mõju on väike.

Eespool toodud DMA2 väljundi jaotuse graafikutel ilmneb veel üks liikuvusanalüsaatorite konstruktsioonist tulenev efekt. Nimelt on mõlema seadme juures märgatav mõõdetud jaotuse ja arvutatud kõvera punktide väärtuste vahe kasvamine väiksemate liikuvuste juures jaotuse „sabas“. Antud erinevus on eriti märgatav TSI nanoDMA korral. Selle tõenäoliseks põhjuseks on õhuvoolu profiilide ebatühtlused DMA-s, mis tulenevad aerosooli sisselaskevade konstruktsioonist. Siit tuleneb ka arvatav põhjus, miks Viini tüüpi DMA-l antud nähtus nõrgemini ilmneb – selle seadme aerosooli sisselaskevade konstruktsiooni juures on spetsiaalselt püütud tagada õhuvoolude võimalikult suurt ühtlust kogu DMA rõngaspilu ümbermõõdu ulatuses.

Läbiviidud eksperimentide mõõtemääramatust on käesolevas töös raske hinnata, kuna tegemist on väga keerulise süsteemiga. Mõõtmiste täpsuse seisukohast võib vaid iseloomustada üksikuid süsteemi sõlmi eraldi. Kõige suurema ebatäpsusega on antud süsteemis õhuvoolude ruumkiiruste mõõtmine. Rotameetrite mõõtemääramatus on ligikaudu 10%, mikromanomeetrite määramatus jääb 1% piiridesse (probleemiks on vaid aeg-ajalt tekkiv nullnivoo nihe), kuid vigu põhjustavad ruumkiiruste mõõtmiseks kasutatavate Venturi torude ummistumised. Ebatäpsused õhuvoolude ruumkiiruste mõõtmisel põhjustavad aga vigu aerosooliosakeste liikuvuste määramisel. Teine süsteemi osa, mis põhjustab suuremaid määramatusi, on osakeste kontsentratsiooni mõõtmine. CPC puhul määrab seadme täpsuse õhuvoolude stabiilsus (10% suhteline määramatus); elektromeeter peaks olema suuteline mõõtma voole suurusjärgus 1 fA, kuid käesolevas töös täheldati kuni 10 fA kõikumisi seadme näidus, mille põhjused ei ole täpselt teada (kõne alla võivad tulla elektrilised häired või elektromeetri isolaatori saastumine).

Kokkuvõttena võib öelda, et käesolevas töös läbiviidud katsete tingimustes on kahest võrreldud liikuvusanalüsaatorist paremate näitajatega Viini tüüpi seade, millel on madalamad osakeste kaod ning väiksem ülekandefunktsiooni suhteline poollaius. Samas tuleb märkida, et katse ülesehitusest lähtuvalt ei olnud võimalik kasutada ainult nanoDMA-le omast aerosooli lisa-väljatõmmet (i.k. *bypass air*), mis on just mõeldud difusiooniliste efektide mõju vähendamiseks antud seadmes. Seetõttu on alust arvata, et nanoDMA ülekandefunktsiooni omadused paraneksid antud seadme kõigi tehniliste võimaluste rakendamisel.

KOKKUVÕTE

Aerosooliosakeste suurusjaotuse mõõtmiseks diferentsiaalse liikuvusanalüsaatoriga on vaja teada seadme ülekandefunktsiooni. Suuremate osakeste korral võib selleks esimeses lähenduses kasutada teoreetilist liikuvusanalüsaatori geomeetria ja režiimiparameetrite järgi arvutatavat funktsiooni, kuid väiksemate osakeste puhul on vaja seda iga seadme jaoks eksperimentaalselt määrata. Käesoleva magistritöö teemaks oligi erinevate diferentsiaalse liikuvusanalüsaatorite reaalsete ülekandefunktsioonide määramine, mis võimaldab senisest suuremat täpsust aerosooliosakeste suurusjaotuste mõõtmisel ning genereeritavate standardaerosoolide osakeste suurusjaotuse parameetrite hindamisel.

Käesoleva töö käigus koostati esmalt arvutijuhitav mõõtesüsteem ja mahukas tarkvara, mis võimaldab sooritada eksperimente kahe liikuvusanalüsaatoriga nn. tandem-DMA konfiguratsioonis. Süsteem võimaldab kiiresti ja täpselt ette anda ja kontrollida liikuvusanalüsaatorite tööparameetreid ning reaalses koguda ja töödelda erinevatelt mõõteriistadelt saadavaid andmeid. Tarkvaras on võimalik mõõdetud tulemuste esmane töötlus ja analüüs ning nende väljastamine erinevates formaatides edasiseks töötamiseks. Lisaks on antud tarkvara ülesehitus paindlik, mis võimaldab seda kasutada ka teistsuguse seadmete konfiguratsiooniga aerosooliekperimentide juhtimiseks. Antud süsteemi kasutuselevõtu-ga vähenes oluliselt eksperimentide läbiviimiseks kuluv aeg ning tõenäosus mõõtmisvigade tekkimiseks.

Kasutades koostatud süsteemi, määrati seejärel kolme diferentsiaalse liikuvusanalüsaatori ülekandefunktsioonid kolmel erineval osakeste suurusel. Osakeste suurused olid valitud nii, et oleks võimalik hinnata difusiooniliste efektide mõju ülekandefunktsioonile. Mõõtmistulemustest selgus, et väikeste osakeste korral (raadiusega ligikaudu 10 nm ja alla selle) on difusiooni mõju diferentsiaalse liikuvusanalüsaatori ülekandefunktsioonile tugev, põhjustades selle laienemist ning kõrguse vähenemist. Samuti ilmnes, et suuremate osakeste korral on difusiooni osatähtsus väiksem ning sõltub osakeste suuruselt vähem. Kasutatud erinevat tüüpi liikuvusanalüsaatorite võrdlus näitas antud seadmete erinevaid omadusi – Viini tüüpi DMA väiksemaid difusioonilisi kadusid ning ülekandefunktsiooni väiksemat poollaiust, mille põhjuseks on arvatavasti seadmete konstruktsioonilised eripärad. Katsetest selgus ka, et DMA-de mehhaanilisest ja hüdrodünaamilisest ebatäiuslikkusest tingitud ülekandefunktsiooni laienemist ei saa ignoreerida, mistõttu ideaalset ülekandefunktsiooni ei saa kasutada ka suurte osakeste korral.

Käesoleva töö käigus saadud andmed annavad üldise hinnangu kasutatud liikuvusanalüsaatorite ülekandefunktsioonide kohta. Edaspidi tuleks antud seadmete ülekandefunktsioone uurida ka teistel osakeste suurustel, seda eriti osakeste korral diameetriga alla kümne nanomeetri, kus difusioonil on oluline mõju liikuvusanalüsaatori tööle. Samuti tuleks uurida võimalusi sellise pöörsidumi algoritmi rakendamiseks, mis arvestaks ka ülekandefunktsiooni mudeli parameetrite sõltuvust antud osakeste suuruselt, kuna selle

mittearvestamisest tingitud vead ilmnevad tugevalt just väiksemate osakeste korral.

Ma tänan Eduard Tamme ja Aadu Mirmet, kelle juhendamisel käesolev töö valmis. Samuti tänan Tartu Ülikooli Keskkonnafüüsika instituudi töötajaid nende igakülgse abi eest.

Janek Uin

KIRJANDUS

- [1] N. A. Fuchs. *The Mechanics of Aerosols*. Pergamon Press, 1964.
- [2] R. C. Flagan et al. *Aerosol Measurement - Principles, Techniques, and Applications (2nd Edition)*. John Wiley & Sons, 2001.
- [3] H. Tammet. Size and mobility of nanometer particles, clusters and ions. *Journal of Aerosol Science*, 26:459–475, 1995.
- [4] W. C. Hinds. *Aerosol Technology (Second Edition)*. John Wiley & Sons, 1999.
- [5] R. C. Flagan. History of electrical aerosol measurements. *Aerosol Science and Technology*, 28:301–380, 1998.
- [6] H. Tammet. Aspiratsioonõj metod izmerenija spektra aeroionov. *Tartu Riikliku Ülikooli Toimetised*, 195:1–237, 1967.
- [7] Ü. Kikas, R. Susi, and E. Tamm. On the theory of the electrostatic separation of aerosols. *Tartu Riikliku Ülikooli Toimetised*, 631:76–84, 1982.
- [8] E. Tamm. Electrical classification as a basis of the aerosol standard. *Journal of Aerosol Science*, 23 S1:S285–S288, 1992.
- [9] W. Birmili, F. Stratmann, A. Wiedensohler, D. Covert, L. M. Russell, and O. Berg. Determination of differential mobility analyzer transfer functions using identical instruments in series. *Aerosol Science and Technology*, 27:215–223, 1997.
- [10] R. C. Flagan. On differential mobility analyzer resolution. *Aerosol Science and Technology*, 30:556–570, 1999.
- [11] H. Fissan, A. Pöcher, S. Neumann, D. Boulaud, and M. Pourprix. Analytical and empirical transfer functions of a simplified spectromètre de mobilité électrique circulaire (SMEC) for nano particles. *Journal of Aerosol Science*, 29:289–293, 1998.
- [12] M. R. Stolzenburg. *An Ultrafine Aerosol Size Distribution Measuring System*. PhD thesis, University of Minnesota, 1988.
- [13] F. Stratmann, Th. Kauffeldt, D. Hummes, and H. Fissan. Differential electrical mobility analysis: A theoretical study. *Aerosol Science and Technology*, 26:368–383, 1997.
- [14] M. N. A. Karlsson and B. G. Martinsson. Methods to measure and predict the transfer function size dependence of individual DMAs. *Journal of Aerosol Science*, 34:603–625, 2003.

- [15] B. G. Martinsson, M. N. A. Karlsson, and G. Frank. Methodology to estimate the transfer function of individual differential mobility analyzers. *Aerosol Science and Technology*, 35:815–823, 2001.
- [16] G. P. Reischl, J. M. Mäkelä, and J. Nécid. Performance of vienna type differential mobility analyzer at 1.2-20 nanometer. *Aerosol Science and Technology*, 27:651–672, 1997.
- [17] TSI CPC mudeli 3025A kodulehekülg.
<http://www.tsi.com/particle/products/partcount/3025A.htm>, 18. Mai 2005.
- [18] Lawson Labs mudeli 201 kodulehekülg.
<http://www.lawsonlabs.com/specExternal201.html>, 18. Mai 2005.

SUMMARY

Determination of the transfer function of a differential mobility analyzer in a dual aerosol analyzer experiment

To measure the size distribution of aerosol particles with a differential mobility analyzer one needs to know the transfer function of this device. A transfer function based on mobility analyzer geometry and working parameters is in first approximation applicable for larger particles but in case of smaller particles it is necessary to determine this function experimentally. The subject of this master's thesis was to determine the transfer function of different differential mobility analyzers which allows greater precision in measurements of aerosol particles size distribution and in evaluation of parameters of generated calibration aerosols.

In this work a computer controlled measurement system and software package was first developed which enables experiments with two mobility analyzers to be carried out in a so-called tandem-DMA configuration. The system allows quick and precise control of the parameters of the mobility analyzers and real-time acquisition and processing of experimental data. The software allows preliminary data processing and export for further analyzing. Also the software can easily be adapted for use in other aerosol experiments with different configuration of instruments. With adoption of this measurement control system, the time previously needed for experiments decreased dramatically and probability of measurement errors was also reduced.

With this system the transfer functions of three differential mobility analyzers were investigated for three different particle sizes. These sizes were chosen so that the effects of diffusion on transfer function could be assessed. The experiments showed that with smaller particles (radius 10 nm and below) diffusion has a strong effect on the transfer function of a differential mobility analyzer. The transfer function's width is increased while height decreases. It was also found that with larger particles the diffusion plays a minor role and has a weaker dependency on particle size. Comparison of different mobility analyzers also revealed their different properties – smaller diffusional losses and narrower transfer function of the Vienna type DMA, in comparison to TSI nanoDMA, the reasons for which are thought to lay in different designs of the investigated devices.

The results obtained in this work allow general assessment of parameters of the investigated devices. In future the transfer functions of these mobility analyzers should also be investigated for other particle sizes, especially for particle radiuses below five nanometers where the effects of diffusion become significant. Also a possibility for use of a more advanced deconvolution algorithm for data analysis should be explored, which would account for transfer function parameter dependency on particle size, especially in case of smaller particles where errors produced by current algorithm become apparent.

LISA A Pöördsidumi leidmise algoritm

Esitatud on vähimruutude meetodil põhinev algoritm, mis lähendab teoreetilist ülekandefunktsiooni mudelit mõõdetud andmetele. Algoritmi realiseerimiseks on kasutatud programmi MathCad ning järgnevalt on toodud antud programmi tööleht (näitena on kasutatud Viini tüüpi DMA ülekandefunktsiooni määramist 10 nm raadiusega osakeste korral).

Vähimruutude meetod diferentsiaalse liikuvusanalüsaatori ülekandefunktsiooni leidmiseks

failist loetakse sisse mõõtmistulemused:

```
andmed :=  
katsed.txt          i := 0 .. rows(andmed) - 1
```

arvutusteks kasutatakse osakeste liikuvust ja kontsentratsiooni
suurest massiivist eraldatakse välja vajalikud andmed:

```
liikuvusi := andmedi,0      kontsi := andmedi,1
```

mõõdetud kogukontsentratsioon DMA1 väljundis: $N1 := 5.206 \times 10^5 \text{ (p/cm}^3\text{)}$

N1-ni normeeritud kontsentratsioon: $\text{konts}_i := \frac{\text{konts}_i}{N1}$

ülekandefunktsiooni mudeli definitsioon:

$$H(k1, k0, \alpha, \beta) := \frac{\alpha}{2 \cdot \beta} \cdot \left[\left| \frac{k1}{k0} - (1 + \beta) \right| + \left| \frac{k1}{k0} - (1 - \beta) \right| - 2 \cdot \left| \frac{k1}{k0} - 1 \right| \right]$$

$k1$ on funktsiooni muutuja (liikuvus), $k0$ on funktsiooni maksimumi asukoht ning α ja β on lähendamise käigus muudetavad parameetrid, mis määravad funktsiooni kõrguse ning (suhtelise) poollaiuse.

esimese liikuvusanalüsaatori karakterne liikuvus: $k0 := 518 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$

piirliikuvused (integraalide rajad): $kp2(k, b) := k + k \cdot b$ $kp3(k, b) := k - k \cdot b$

lähendusvalem mõõdetud andmetele:

$$n(k_2, \alpha, \beta) := \frac{\int_{kp3(k_2, \beta)}^{kp2(k_2, \beta)} H(k, k_0, \alpha, \beta) \cdot H(k, k_2, \alpha, \beta) dk}{\int_{kp3(k_0, \beta)}^{kp2(k_0, \beta)} H(k, k_0, \alpha, \beta) dk}$$

k_2 on funktsiooni muutuja (DMA2 ülekandefunktsiooni keskpunkti liikuvus)

mõõtepunktide ja mudelfunktsiooni väärtuste (antud punktides) erinevuste ruutude summa, mille miinimumi otsitakse:

$$\text{summa}(\alpha, \beta) := \sum_i \left(\text{konts}_i - n(\text{liikvus}_i, \alpha, \beta) \right)^2$$

Kasutusel on MathCad-i funktsioon **minerr**, mis etteantud parameetrite varieerimisega otsib esitatud võrrandi(te) lahenditeks kõige paremini sobivaid parameetrite väärtusi st. väärtusi, mille kasutamisel tekkinud viga on minimaalne.

otsitavate parameetrite algväärtused:

$$\alpha := 0.3 \quad \beta := 0.2$$

On defineeritud võrrand, mille jaoks **minerr** otsib seda kõige paremini rahuldavaid väärtusi.

Kuna antud juhul on vaja leida summa miinimumi, siis on võrrand järgmine:

Given

$$\text{summa}(\alpha, \beta) = 0$$

funktsioon **minerr**:

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} := \text{Minerr}(\alpha, \beta)$$

leitud parameetrite väärtused:

$$\alpha = 0.475 \quad \beta = 0.143$$

LISA B Millikani valemi pöördülesannet realiseeriv algoritm

Toodud on programmeerimiskeeles Delphi kirjutatud algoritm, mis leiab numbriliselt Millikani valemist (valem (12) lk. 10) etteantud liikuvuse põhjal sellele vastava raadiuse. Toodud funktsioon alustab esmasest väärtusest ning läheneb iteratiivselt tulemusele, mis annab väikseima vea.

```
function liikuvus2raadius(liikuvus: Double): Double;  
var a1, b1, tempk: Double;  
    i: integer;  
begin  
    //A,B,C – empiirilised koefitsiendid  
    //olaeng – osakese laeng  
    //muud konstandid (molekuli keskmine vaba tee pikkus jms.)  
    //on arvutuste kiirendamiseks kokku võetud  
    Result := 0;  
    if liikuvus = 0 then Exit;  
    i := 0;  
    tempk := liikuvus * 10000; //m2 -> cm2  
    a1 := 100; b1 := a1; // [a]=nm  
    repeat  
    begin  
        i := i + 1;  
        b1 := 0.8 * a1 + 0.2 * b1;  
        a1 := 0.004696 * olaeng /  
            tempk * (1 + 59.5 / b1 * (A + B * exp(-b1 * C / 59.5)));  
    end;  
    until (abs(b1 - a1) < 0.00001 * b1) or (i > 99);  
    if i < 100 then Result := a1 * 1e-9;  
end;
```

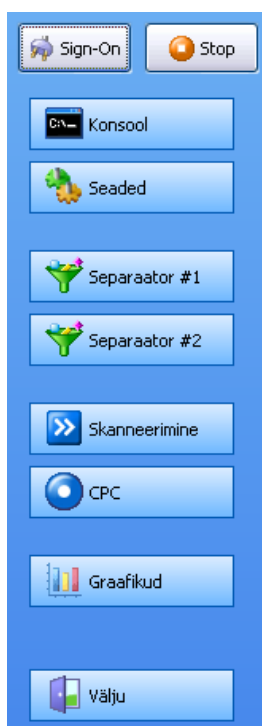
LISA C Valminud tarkvara kasutusjuhend

Järgnevalt on toodud käesoleva töö käigus valminud tandem-DMA eksperimentide juhtimiseks vajaliku tarkvara lühike kasutusjuhend.

Programmi kasutajaliides koosneb kolmest peamisest aknast – põhiaken, konsooliaken ja graafikute aken.

Põhiaken

Akna vasakus servas asub paneel nuppudega, mis võimaldavad teha aktiivseks akna erinevaid lehekülgi.



Kõige esimene nupp loob või katkestab ühenduse Lawsoni kontrolleriiga. Ühendus on vajalik kõikide töörežiimide korral, v.a. mõõtmised CPC-ga. Viimane ei kasuta kontrolleri, vaid suhtleb PC-ga otse, teise COM pordi vahendusel.

Teine nupp katkestab parasjagu pooleli oleva toimingu (ettevaatust – võib esineda andmete kadu!).

Viimane nupp sulgeb programmi.

Ülejäänud nupud teevad seda, mis neile kirjutatud – avavad vastava lehe või uue akna.

Akna paremasse poolde ilmuvad aktiveeritud leheküljed, mis on esitatud järgnevalt.

Separaatrite lehed

Kõrgepinge #1

ainult pinge

raadius (nm): 20.7879

liikuvus *1e9: 122.9750

pinge (V): 1 000.0

õhu kiirus (l/h): 1500

mahtuvus (pF): 30.00

pingeallika piirkond: 10 kV

pinge korrigeerimine tagasisideahelaga

väljasta mõõda

Vool

start vool (fA)

aerosooli kulu (l/h): 150.0

lekkevoolu arvestamine 0.0

keskmistamine: 1

Kõrgepinge poolel saab valida väljastatava pinge. Selleks tuleb sisestada kas soovitud pinge otse või anda ette liikuvus või raadius. Kolm tekstikasti on omavahel seotud ning väärtused muutuvad neis sünkroonselt.

Edasi on võimalik määrata sissetuleva õhu kiirust ning separaatori mahtuvust. Need on aga vajalikud ainult siis, kui ei sisestata pinge väärtust otse. Lehe vasakus ülaosas oleva märkeruuduga saabki aktiivseks jätta

ainult pinge sisestamise lahtri, tehes lihtsamaks vajaliku ülesleidmise antud lehelt.

Järgnevalt saab seada kõrgepingeallika piirkonda, mis peab ühtima valitud seadetega pingeallikal endal. Programmi seadeid muutes on võimalik ka sisse lülitada režiimi, kus kõrgepingeallika piirkonda programmis muudetakse automaatselt, pinge sisestuslahtri väärtuse muutumisel.

Järgmine valik määrab, kas pinge väljastamisel püütakse seda reguleerida tegeliku pinge tagasimõõtmisega kõrgepingeallika tagasisideahelast. Kuid antud valiku rakendamisel pikeneb pinge väljastamise aeg ning paremad tulemused ei ole samuti alati garanteeritud.

Voolu poolel saab valida väljastatava suuruse – kas vool või kontsentratsioon, aerosooli kulu ning samuti seda, kas mõõtetulemusest lahutatakse maha vastavas tekstikastis määratud lekkevool. Samuti saab määrata, kui mitut mõõtetulemust arvestatakse jooksva keskmise arvutamisel.

Mõõdetud väärtused väljastatakse ekraanile paaridena: viimati mõõdetud tulemus ja keskmistatud tulemus. Parempoolse hiirenupuga tekstialal klõpsates ilmuvad valikud mõõtmistulemuste kopeerimiseks/salvestamiseks ja tekstiala puhastamiseks.

Skaneerimise leht

The screenshot shows a software interface for scanning. On the left, there are control buttons: 'start', 'katkesta', and 'parameetrid'. There are also checkboxes for 'Graafik aktiivne', 'tagasiside pinge väljastamisel', and 'CPC andmed:'. Below these are dropdown menus for 'knts. (display)' and 'keskmistamine: 1'. Two circular regions are defined: 'Piirkond #1: 16.72...16.72#1' and 'Piirkond #2: 2.00...11.00#20'. A 'raadius (nm)' dropdown is set to a value. On the right, a table displays 20 rows of data with columns: #, x1, x2, y1, y2, and cpc.

#	x1	x2	y1	y2	cpc
1	0.000	2.097	76.791	-67.770	0.000
2	0.000	2.275	154.396	-2.444	0.000
3	0.000	2.475	278.175	1.013	0.000
4	0.000	2.683	461.260	-2.046	0.000
5	0.000	2.926	700.295	9.735	0.000
6	0.000	3.176	974.993	-30.259	0.000
7	0.000	3.467	1383.940	-0.556	0.000
8	0.208	3.773	1866.897	1.172	0.000
9	0.255	4.110	2384.060	-35.803	0.000
10	0.278	4.491	2859.130	33.140	0.000
11	0.261	4.926	3124.050	2.940	0.000
12	0.128	5.376	3154.095	1.172	0.000
13	0.000	5.846	2893.200	-4.510	0.000
14	0.000	6.397	2446.010	-2.960	0.000
15	0.127	7.030	1809.930	6.497	0.000
16	0.185	7.684	1311.322	0.377	0.000
17	0.166	8.392	870.963	5.662	0.000
18	0.143	9.213	474.771	-1.947	0.000
19	0.114	10.095	194.987	1.510	0.000
20	0.189	11.006	68.009	-6.894	0.000

Siin saab seada skaneerimisega seotud parameetreid: kas skaneerimise ajal on graafik ka aktiivne, kas kasutatakse tagasisidet (vt. selgitust separaatorite lehe juures) ning kas paralleelselt sooritatakse ka mõõtmisi CPC-ga. Viimasel juhul saab veel valida mitme erineva mõõdetava suuruse ja nende esitusviiside vahel.

Järgnevalt saab veel määrata keskmistamisel kasutatavate lugemite arvu (mitte segi ajada integreerimis-

ajaga!)

Edasi on näidatud skaneerimise piirkondade algus- ja lõpp-punktid ning ka mõõtepunktide arv. Nende esitamisel saab valida kolme suuruse vahel: raadius, liikuvus ja pinge. Klõpsates piirkonda esitaval lingil, ilmub dialoogiaken, kus saab muuta vastavat piirkonda.

The dialog box 'Piirkond: Separaator #1' has two sections: 'Algus' and 'Lõpp'. Each section contains input fields for 'raadius (nm): 20.7879', 'liikuvus *1e9: 122.9750', and 'pinge (V): 1 000.0'. On the right, there are radio buttons for 'Skaala: Lineaarne' and 'Logaritmiline', and a 'Punktide arv:' dropdown set to '1'. 'Ok' and 'Cancel' buttons are at the bottom.

Algus- ja lõpp-punkti valik toimub täpselt samamoodi nagu väljundpinge seadmine separaatori lehel. Ka vajalikud suurused – õhu ruumkiirus ja separaatori mahtuvus võetakse sealt.

Edasi saab valida vajaliku mõõtepunktide arvu ning samuti nende skaala – kas see on lineaarne või logaritmiline.

Kui soovitakse mõõta vaid ühe separaatoriga, siis tuleb teise mõõtepunktide arvuks panna 1.

Kui skaneerimise piirkonnad on õigesti valitud, siis esitatakse need ekraanil ning skaneerimise

alustamise nupp muutub aktiivseks. Kui aga on mingi viga – skaneerimise piirkonna alguspunkt on näiteks suurem lõpp-punktist, siis antakse sellest teada vastava separaatori piirkonna juures ning skaneerimist alustada ei ole võimalik.

Lehe allosas on riba, mis näitab mõõtmiste progressi. Ligikaudne aeg mõõtmiste lõpuni on ka esitatud inforibal programmi põhiakna allosas.

Mõõtmistulemused esitakse tabelina, kus on toodud kummagi separaatori pinged, mõõdetud elektromeeetrite voolud ja CPC mõõtmiste tulemused (kui CPC oli kasutusel). Esitatavaid suurusi (pinge-raadius-liikuvus ja vool-kontsentratsioon) saab valida, klõpsates parempoolse hiirenupu-ga tabelil. Siin saab ka tabelit puhastada ning andmeid salvestada. Viimase valikul ilmub dia-loogiaken, kus saab mõõtmisele lisada kommentaari ning valida ka sobivad märgid, mis eralda-vad salvestatavas andmefailis kommentaarid mõõtmistulemustest ja viimased üksteisest. Selline võimalus on lisatud, kuna erinevatel andmetöötlusprogrammidel (Excel, MathCad, Maple, MatLab, SigmaPLot, GnuPlot jms.) on erinevad nõudmised sisendfailide formaadile.

CPC leht

Siin saab juhtida mõõtmisi CPC-ga. Saab määrata mõõdetavat suurust ja selle esitust, ajava-hemikku lugemite esitamise vahel ning lugemite arvu jooksva keskmise arvutamisel.

Vajutades nupul "CPC info", esitatakse mitmesuguste CPC tööparameetrite väärtused – sisemi-sed temperatuurid jms.

Seadete leht

Programmi seadeid hoitakse *settings.ini* failis, kuid kuna selle käsitsi muutmine on ebamugav ning võib põhjustada vigu, siis on sagedamini muudetavad suurused tehtud kättesaadavaks ka programmi seest. Järgnevalt on toodud mõningate parameetrite kirjeldused:

Nimi	Kirjeldus
Näita abiinfot	Kui see on märgitud, siis hiirega teatud kasutajaliidese elementidele osutamisel näidatakse tekstikasti abiinfoga antud elemendi kohta.
Aerosooli stabiliseerumise aeg	Määrab kui kaua oodatakse pärast pinget väljastamist, enne, kui alustatakse voolu mõõtmisega. (ainult skaneerimise juures).
Elektromeeetrite integreerimisaeg	Määrab, kui kaua integreeritakse pinget voolu mõõtmisel.
Elektromeeetrite stabiliseerumise aeg	Määrab aja, mille järel peale integraatori RESET-i jälle mõõtma hakatakse.
Pinge väljastamise OK lävi	<i>Kasutusel ainult tagasisidega pinget väljastamisel.</i> Määrab, kui palju tohib tegelik pinge erineda soovitud pingest.
Voolu mõõtmise ja tagasiside ADC kanalid	Lawsoni analoog-digitaal muunduri kanalite valik, st. millist kanalit millise funktsiooni jaoks kasutatakse. Kanalite vahemik 0..5. Kanalid ei tohi kattuda. Kui nad siiski kattuvad, siis annab programm sellest märku ja ei lase uusi seadeid salvestada. NB: uus kanalite valik rakendub alles pärast uut Sign-On-i.

Seadete lehe allosas olevate nuppude abil saab muudatusi salvestada või neid tühistada, viimasel juhul taastatakse muudetud parameetrite väärtused endisel kujul.

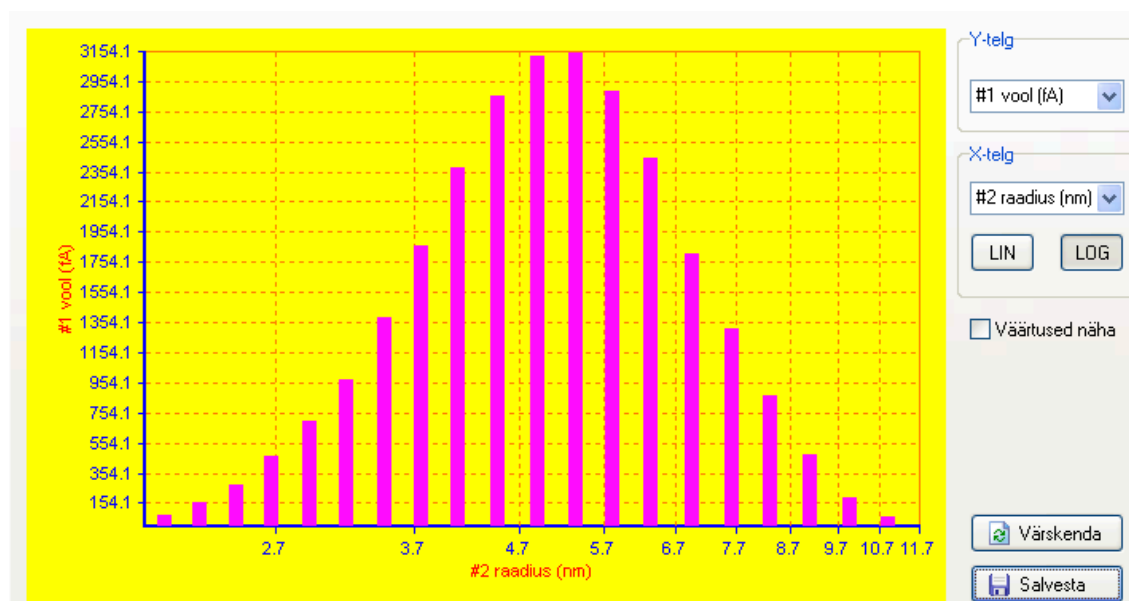
NB: muudatuste rakendamiseks peab vajutama salvestamise nupule!

Konsooliaken

Konsooliaknasse ilmuvad teated programmi jooksva töö kohta. Akna mahutavus on vaikumisi 1000 rida, peale mida hakatakse eestpoolt ridu ära kustutama. Seda väärtust saab ka seadete-failist muuta.

Siia aknasse saadetakse ka mitmesuguseid veateateid, millest eraldi teateaknaga märku ei anta. Seetõttu on mingi vea ilmumisel alati mõttekas uurida konsooliakna sisu. Tõsise vea korral salvestatakse see automaatselt ka faili.

Graafikute aken



Siin esitatakse skaneerimise tulemused graafiliselt. Kui skaneerimise ajal oli seatud vastav vool, siis joonistatakse graafikut mõõtmisega samaaegselt. Vastasel juhul tuleb mõõtmise lõpul vajutada värskendamise nupule – sellisel juhul joonistatakse graafik olemasolevate väärtuste põhjal üle. Seda nuppu tuleb kasutada ka pärast mõnede graafiku seadete muutmist, mis ei rakendu automaatselt ja vajavad seega graafiku uuesti joonistamist.

Antud lehel saab valida kummalgi graafiku teljel esitatavat suurust ning ka x-telje skaalat (lineaarne või logaritmiline). Samuti saab määrata, kas graafikul esitatud punktide väärtused on nähtavad.

Veateated

Programmi töös võivad ilmuda mitmesugused erineva põhjusega vead. Enamuse puhul neist teavitatakse sellest ka programmi kasutajat kas vastava teateakna abil või teatega konsooliaknas. Järgnevalt on toodud kõik esineda võivad veateated koos selgitustega.

#	Teade	Kirjeldus
1	[1] viga CPC mõõtmisel; vigane tulemus	Saadi ebakorrekne tulemus või ei saadud üldse mingeid andmeid. Põhjus: halb või puuduv ühendus CPC-ga.
2	Midagi läks valesti mõõtmise peatamisel.	Lawsoni kontrolleri ei reageerinud korrektselt mõõtmise katkestamise käsule. Põhjuseid selleks võib olla mitmeid. Lahenduseks on kontrolleri hetkeline väljalülitamine.
3	Valitud ADC kanalid kattuvad.	Mõõtmiste ja tagasiside valitud analoog-digitaal muunduri kanalid kattuvad, vaja kanalite numbreid muuta.
4	Ühendumisel Lawsoniga tekkis viga.	Ühenduse loomisel Lawsoni kontrolleri tekkis viga. Kõige tõenäolisem põhjus on, et kontrolleri ei ole sisse lülitatud või on ühendus arvutiga halb. Tõsisemal juhul on probleem kontrolleri tööga.
5	Tekkis viga andmevahetusel Lawsoni kontrolleri	Põhjuseid võib olla siin mitmeid, kõige tõenäolisem neist on mingi probleem ühendusega arvuti ja kontrolleri vahel. Tõsisemal juhul on probleem kontrolleri tööga.
6	Viga andmete lugemisel seadefailist	Programmis tekkis probleem andmete lugemisel, põhjuseks on ebakorrektsed andmed (punkti asemel koma, numbri asemel täht jms.).
7	Viga seadefaili juures	Tekkis mingi üldine probleem seadefailiga, kõige tõenäolisemalt ei leitud faili üles.
8	Toimus tõsine viga programmi töös: [info vea kohta]	Kõige üldisem veateade, enamasti seotud operatsioonisüsteemiga. Antud üldisele teatele lisatakse alati ka info konkreetse probleemi kohta.
9	[9] üks või mitu ebakorrekset väärtust seadefailis	Teade selle kohta, et mõne seadefailis oleva programmi parameetri väärtus ei ole korrektne (on lubatud piirkonnast väljas vms.).
10	Andmete töötlemiseks ettenähtud aeg sai otsa - uus andmepakett saabus	On tekkinud olukord, kus enne vana andmepaketi töötamise lõppu saabus juba uus. Programmi normaalse töö käigus seda tekkida ei saa (välja arvatud ekstreemsel juhul, kui arvuti on väga hõivatud mõne teise protsessiga). Antud vea tekkimise põhjuseks võivad olla kas saabunud ebakorrektsed andmed või probleemid operatsioonisüsteemis.
11	Toimus tõsine viga COM pordiga: [info vea kohta]	Üldine COM pordi viga, millele lisatakse info konkreetse probleemi kohta.
12	[12] COM pordil [#] on vale väärtus [VÄÄRTUS].	Viga tekib, kui seadefailis on määratud ebakorrekne pordi nimi: kas süsteemis mitteeksisteeriv port või on pordi nime kirjutamisel tehtud viga.

13	Ettenähtud aja jooksul ei saadud uusi andmeid, skaneerimine katkestatud	Antud viga tähendab, et ettemääratud aja jooksul ei saanud Lawsoni kontrolleriilt uusi andmeid. Põhjuseks võib olla viga kontrolleri töös või probleem ühendusega arvuti ja kontrolleri vahel. Pärast antud vea ilmumist (ning selle põhjuse likvideerimist) on vaja Lawsoni kontrolleri korras välja lülitada ning ka programm uuesti käivitada.
14	Lawsoni ja CPC COM pordid kattuvad. Probleemide vältimiseks määrati neile vaikimisi väärtused: Lawson=[#] ja CPC=[#].	Kahele seadmele oli seadedefailis määratud samad COM portide nimed. Kui programmi poolt vaikimisi määratud väärtused sobivad, siis võib tööd jätkata, vastasel korral tuleb aga esmalt programm sulgeda (väga tähtis, sest sulgemisel kirjutatakse mitmete parameetrite väärtused seadedefaili), muuta seadedefaili sisu ning seejärel programm uuesti käivitada.

Nõuded kompileerimiseks

Programm on kirjutatud keeles Delphi ja vajab seega kompileerimiseks Borland Delphi kompilaatorit. Originaalis on kasutatud Delphi versiooni 7 (Enterprise edition), kuid sobima peaksid ka kõik uuemad Delphi Win32 kompilaatorid. Vanemate versioonide kohta garantii puudub.

Vajalik on ka Delphi JEDI Library – suur vabavaraline teekide ja komponentide kogu. Kasutatud on versiooni 3 (beta, RC2), mõnda vanemat versiooni saab ka kasutada väikeste muudatustega.

Lisaks on vajalik XiControls komplekt, täpsemalt XiPanel ja XiButton (seda viimast on natuke modifitseeritud, aga muutused olid kõik kosmeetilised).

Ning lõpuks on vajalik ka komponent COM pordiga suhtlemiseks, selleks on kasutatud CPort nimelist komplekti, kus on lisaks ka mugav komponent andmepakettide püüdmiseks.

Järgnevalt on toodud ka viited veebilehtedele, kust eelpoolnimetatud komponente leida võib (seisuga 07.05.2005).

- Delphi JEDI: <http://www.delphi-jedi.org>
- XiControls: <http://deadlogic.co.nr>
- CPort: <http://sourceforge.net/projects/comport>

Programmeerimisel on kasutatud ka GExperts Delphi lisade komplekti, täpsemalt selle Debug teeki. Et programmi töö käigus GExperts debug-aknas näha programmi koodi sissekirjutatud teateid, tuleb programm kompileerida „MYDEBUG” define direktiiviga.

LISA D Publikatsioon

Janek Uin, Eduard Tamm, Aadu Mirme „*Kalibratsiooniaerosoolide genereerimise süsteem ja selle juhtimine*“, stendiettekanne XXXV Eesti füüsikapäevadel 22. - 23. märtsil 2005 Tartus.



KALIBRATSIOONIAEROSOOLIDE GENEREERIMISE SÜSTEEM JA SELLE JUHTIMINE

Janek Uin, Eduard Tamm, Aadu Mirme

Tartu Ülikool, Keskkonnanfüüsika Instituut
email: uin@ut.ee

Aerosoolispektromeetrite kalibreerimiseks on vaja kitsa ja hästituntud spektriga monodispersset aerosooli. Sellist valmis "etalonaerosooli" aga ei ole, ning seetõttu tuleb sobivate omadustega aerosool genereerida. Tartu Ülikooli Keskkonnanfüüsika Instituudis on välja töötatud süsteem selle teostamiseks.

Kalibratsiooniaerosooli tekitamine toimub järgmiselt (joonis 1).

Aerosooli kondensatsioonigeneraatoris (a) aurustatakse kõrgel temperatuuril hõbedat. Hõbedaauruga küllastunud õhu jahtumisel moodustuvad tahked hõbedaosakesed, mille suurus sõltub generaatori temperatuurist.

Aerosool juhitakse edasi laadurisse, milles plutooniumoksiidi poolt emiteeritud α -osakesed tekitavad bipolaarse ionatmosfääri. Seda läbides omandavad aerosooliosakesed elektrilaengu +e või -e. Kordsete laengute tekkimise tõenäosus on väikes- te osakeste korral väga väike, mis tähendab, et nende liikuvus (kiirus, millega laetud

osake liigub ühikulise tugevusega elektriväljas) sõltub ainult osakeste suuruselt.

Statsionaarse laengujaotuse omandanud aerosool juhitakse läbi täiendava kondensatsioonilise kasvataja (c), kui on vaja suuremaid osakesi, või suunatakse otse separaatorisse (d) (edaspidi DMA i.k. lühendi järgi - Differential Mobility Analyzer). Osakesed sisenevad õhukese kihina silindrilise väliselektroodi juures (joonis 2). Silindritevahelises elektriväljas liiguvad laetud osakesed siselektroodi suunas nende liikuvusest sõltuva kiirusega. Läbi siselektroodi kitsa pilu imetakse välja puhta (kaitse-) õhu kihi ruumkiiruse ja elektrodidevahelise elektrivälja

tugevusega määratud, kitsasse liikuvusevahemikku jäävad osakesed. Kuna elektrivälja tugevus sõltub elektrodidele rakendatud pingest, siis on viimase muutmise võimalik valida väljundosakeste keskmist liikuvust ja seega ka suurust.

Süsteemi väljund aerosooli osakeste kontsentratsiooni määratakse elektrometri (e), mõttes laetud osakeste poolt ajaühikus ülekantud voolu, või osakestelõenduriga

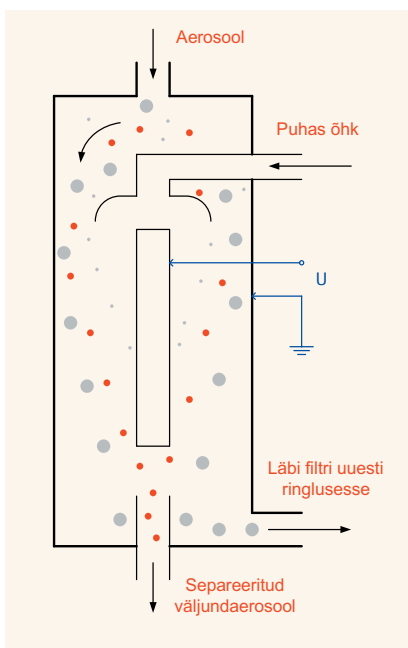
(f) (i.k. CPC - Condensation Particle Counter).

Süsteemi kuuluvad ka aerosoolide genereerimise protsessi juhtimiseks vajalikud seadmed, milleks on kõrgepingeallikas, modifitseeritud Lawson 201 tüüpi mikrokontrollersüsteem ning personaalarvuti.

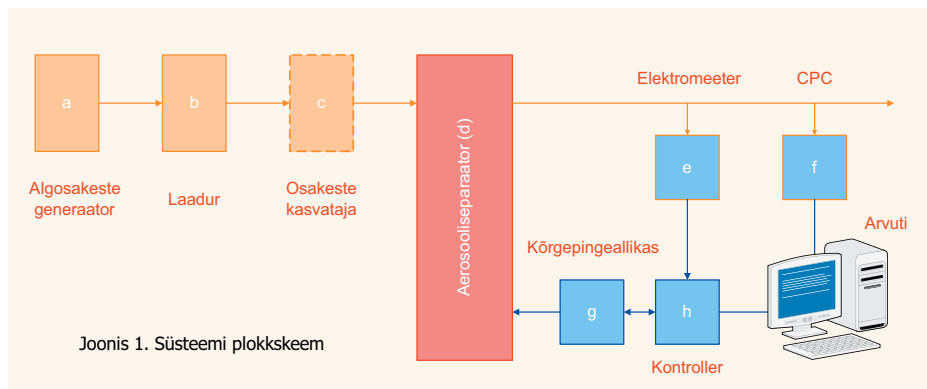
Kõrgepingeallikas (g) kujutab endast pingekordstit, mille väljundpinge on sisendpinge kordne väärtus. Oma sisendpinge saab kõrgepingeallikas Lawson 201 kontrolleri (h). Viimase ülesandeks on lisaks perioodiline aerosoolielektrometri (e) väljundi ning

kõrgepingeallika tagasisideahela mõõtmine ning andmeside personaalarvutiga.

Arvuti töötab spetsiaalselt antud süsteemi vajadustest lähtuvalt koostatud mahukas tarkvara, mille tööks on kogu süsteemi sünkroonne juhtimine ning mõõtmistulemuste kogumine ja esitamine reaajas. Programmi konkreetsete ülesannete hulka kuuluvad Lawson-i kontrolleri töörežiimi seadmine (AD-muunduri parameetrid jms.), andmevahetus CPC ja kontrolleri - vastavate käskude saatmine kõrgepingeallika tüürimiseks ja AD muundamistulemuste vastuvõtt ning saadud andmete töötlus ja esitamine kasutajale sobivas vormis (fail, graafik jne.).



Joonis 2. Aerosooliseparaator

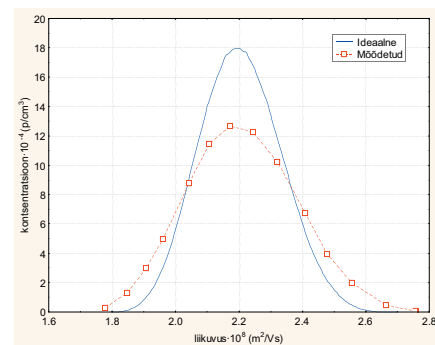


Joonis 1. Süsteemi plokk skeem

Programm võib töötada nii tava- kui ka nn. skaneerivas režiimis. Esimesel juhul määrab kasutaja kõrgepingeallika väljundpinge (DMA väljund aerosooli osakeste keskmise liikuvuse) ning sooritab aerosooli kontsentratsiooni üksikmõõtmisi. Skaneeriva režiimi korral aga sooritab programm automaatselt etteantud pingete (liikuvuste) vahemikus ning etteantud intervallidega rea mõõtmisi.

Programm on kirjutatud nii, et seda on võimalik lihtsalt kohandada mõõteseadmete teistsuguse konfiguratsiooni jaoks. Näiteks on tarkvarasse juba sisse ehitatud võimalus kahe aerosooliseparaatoriga nn. tandem-DMA eksperimendi juhtimiseks. Sellisel juhul töötab esimene DMA nagu tavalisel - väljastab kindlate omadustega aerosooli (analoogia valguse monokromaatoriga spektroskoopias) ning teise DMA-ga (analüsaator) saab määrata võimalikke muutusi selle aerosooli liikuvusspektris (osakeste laadumine, suuruse muutus jne.).

Joonisel 3 on näitena esitatud süsteemi väljund aerosooli suurusjaotus, mõõdetuna teise DMA abil eespool kirjeldatud tandemkonfiguratsioonis (algosakeste generaatori temperatuur: 1150 °C, sisendosakeste suurusjaotuse keskväärts: 57 nm, pinge esimese DMA elektrodidel: 5,7 kV, millele vastavad osakesed keskmise raadiusega 54,5 nm ning liikuvusega $21,8 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$).



Joonis 3. Süsteemi väljund aerosooli jaotus

Graafikul on esitatud arvutatud (ideaalne) (sinine joon) ning mõõdetud (punane joon) jaotus. Aerosooliosakeste mõõdetud jaotuse laienemine on põhjustatud difusioonist - DMA väljundpilusse jõuab difusiooni tõttu ka osakesi, mis oma liikuvuse järgi ei peaks sinna jõudma ning osa "õige" liikuvusega osakestest ei jõua väljundpilusse. Realse jaotuse tipp on aga ideaalsest madalam kadude tõttu.

On näha, et genereeritud aerosool on monodispersne ning kitsa jaotusega - poollaiusega $\pm 6\%$ keskväärtselt.

Käesolevat tööd on toetanud Eesti Teadusfond grantidega nr. 5387 ja nr. 5855.