

ARTU ÜLIKOOL
Füüsika-keemiateaduskond
Eksperimentaalfüüsika ja tehnoloogia instituut

Imre Mäger

**SPIROANALÜSAATOR SA-03 KUUMTRAATANDUR.
MODELLEERIMINE JA KONSTRUKTSIOONI
TÄIUSTAMISE VÕIMALUSED**

Magistritöö
rakendusfüüsikas

Juhendajad: TÜ Füsioloogia instituudi emeriitdotsent
knd (meditsiin) PEET-HENN KINGISEPP

ja

TÜ Eksperimentaalfüüsika ja tehnoloogia instituudi
meditsiinifüüsika ja biomeditsiinitehnika dotsent,
knd (bioloogia) JÜRI VEDRU

TARTU 2007

Sisukord

1. SISSEJUHATUS.....	4
2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE.....	6
3. METOODIKA, APARATUURI JA OBJEKTIDE KIRJELDUS.....	9
3.1 Uurimisobjektiks oleva kuumtraatanduri ehituse kirjeldus.....	9
3.2 Uurimisobjektiks oleva kuumtraatanduri kalibreerimine.....	10
3.3 Katsekorraldus.....	11
3.4 Töö eesmärk.....	13
4. SA-03 KUUMTRAAATANDURI MUDEL.....	14
4.1 Mudeli struktuur.....	14
4.2 Mudeli kalibreerimine.....	17
4.3 Mudeli piirangud.....	18
5. MODELLEERIMINE JA ANALÜÜSITULEMUSED.....	20
5.1 Anduri sageduskoste lõikesagedus.....	20
5.2 ATS standardkõverate mõõtmise mudeli abil.....	22
5.3 Mudeli sageduskoste lõikesageduse analüüs (eksperimentaalselt määratud mudeli proportsionaalse tagasisideteguri korral).....	24
5.4 Anduri tegeliku lõikesageduse leidmine.....	26
6. MUDELI FÜÜSILISTE PARAMEETRITE MÕJU ANDURI LÕIKESAGEDUSELE.....	28
6.1 Klaaspulga diameetri mõju lõikesagedusele.....	28
6.2 Kuumtraadi temperatuuri mõju lõikesagedusele.....	29
6.3 Lõikesageduse sõltuvus klaaspulga pikkusest, millele on keritud kuumtraat.....	32
6.4 Lõikesageduse sõltuvus klaaspulga materjali erisoojusest, millele on keritud kuumtraat.....	33
6.5 Lõikesageduse sõltuvus proportsionaalse tagasiside tegurist.....	35
6.6 Mõra mõju mudelile erinevate tagasisidetegurite juures.....	36
7. TULEMUSTE ANALÜÜS. ANDURI KONSTRUKTSIOONI TÄIUSTAMINE.....	39
8. KOKKUVÕTE.....	44
9. SUMMARY.....	45
10. KASUTATUD KIRJANDUS.....	46
Lisa 1. Kuumtraatanduri mudeli struktuur.....	49
Lisa 2. Mudeli lõikesageduse sõltuvus klaaspulga diameetrist.....	50
Lisa 3. Mudeli lõikesageduse sõltuvus klaaspulga ja kuumtraadi temperatuurist.....	51
Lisa 4. Mudeli lõikesageduse sõltuvus klaaspulga pikkusest.....	52

Lisa 5. Mudeli lõikesageduse sõltuvus klaaspulga materjali erisoojusest.....	53
Lisa 6. Mudeli lõikesageduse sõltuvus mudeli tagasisidetegurist.....	54
Lisa 7. Müra lisamine kuumtraatanduri mudelisse.....	55
Lisa 8. ATS standardkõvera nr. 8 mudeli poolt mõõdetud signaal erinevate temperatuurimürade ja tagasisidetegurite juures.....	56

1. SISSEJUHATUS

Spiromeetriaks nimetatakse sisse või välja hingatud õhu ruumala (V) registreerimist ajaskaalas ja pneumotahhograafiaks õhu liikumise mahtkiiruse e. õhuvoolu* (\dot{V}) registreerimist aja funktsioonina. Saadud graafikuid nimetatakse siis vastavalt kas spirogrammiks või pneumotahhogrammiks. Kui sisse- või väljahingatavat õhuvoolu registreeritakse samal ajal esineva mahu funktsioonina, siis saadakse graafik, mille ühel teljel on registreeritud õhuvool, teisel teljel sisse- või väljahingatava õhu ruumala s.o. nn voolu-mahu ling (Kingisepp 2003). Spiromeetritelistel uurimustel on meditsiinis palju rakendusi.

Spiromeetria rakenduste ulatus mitmetes olulistes meditsiinivaldkondades on suurendanud tähelepanu nende uuringute standardiseerimise ja mõõtmistäpsuse vastu. Viimasel ajal on ATS (*American Thoracic Society*) ja ERS (*European Respiratory Society*) poolt ilmunud mitmed põhjalikud ülevaated selle kohta, millistele tingimustele peavad spiromeetrias kasutatavad seadmed vastama. Spiromeetrias kasutatavate aparatuuride evalveerimisele on esitatud kindlapiirilised nõuded (ATS 1994, Quanjer *et al* 1983, Quanjer *et al* 1993, Miller *et al* 2005). Käesolevas töös saadud tulemusi analüüsitakse nendest nõuetest lähtuvalt.

Tuntakse mitmeid eri liiki spiromeetreid: a) ruumala registreerivad spiromeetrid (näiteks lõõts-, kuivsulustus- ja vesisulustus e. vesispirograafid); b) õhuvoolu registreerivad spiromeetrid e. pneumotahhograafid (näiteks õhu voolamisel läbi takistuse tekkiva rõhu diferentsi mõõtmisel põhinevad spirograafid, turbiinspiromeetrid, ultraheli spiromeetrid, kuumtraat spiromeetrid). Mainitud spiromeetrite tööpõhimõtet on kirjeldatud käesoleva töö autori bakalaureusetöös, samuti on antud teemal kirjutatud ülevaateartikleid (Mäger 2004, Cooper ja Madsen 2000, Webster 1999).

Käesolevas töös on uurimisobjektiks Emros OÜ ja TÜ füsioloogiainstituudi koostöös väljatöötatud spiroanalüsaatori SA-03 konstantse elektritakistusega kuumtraatandur.

Käesolevas töös uurimisobjektiks olevat andurit on kalibreeritud õhu püsivoolu erinevate tasemete juures. Seega on anduri mõõtmistäpsuse hindamisel olulised anduri omadused püsiva tasemega õhuvoolu jälgimisel. Sama oluline on uurida siirdeprotsesse, mille jooksul andur etteantud õhu

* Õhuvoolu all mõistetakse õhu voolamise mahtkiirust, mida mõõdetakse kas l/s või l/min

püsivoolu taseme saavutab. Need anduri omadused on eriti tähtsad järskude õhuvoolu kiiruste muutuste mõõtmisel, sest nendel juhtudel võetakse näidud ajal, mil dünaamilised protsessid ei pruugi olla veel tasakaalustunud, ning stabiilsete püsivoolude mõõtmistulemuste põhjal koostatud kalibratsioonikõver võib mitte sobida õhuvoolu järskude muutuste registreerimiseks (Morris ja Foss 2003).

Lähtuvalt ülaltoodud asjaoludest ning sellest, et järsud õhuvoolu muutused esinevad forsseeritud hingamise ajal praktiliselt igal pneumotahhogrammil (nt. ekspiratoorne tippvool, kus mahtkiirus 10-15 l/s saavutatakse suurusjärgus 0,1 sekundiga), on käesoleva magistritöö eesmärgiks hinnata anduri konstruktsiooniliste näitajate mõju anduri sageduskostele ja selgitada välja otstarbekad anduri konstruktsiooni muudatused selle löikesageduse tõstmiseks. Eesmärgi täitmiseks püstitati järgmised ülesanded: 1) uurida antud kuumtraatanduri sageduskostet, 2) modelleerida andurit lähtuvalt selle konstruktsioonist, 3) võrrelda anduri mudeli ja anduri enda sageduskostet hingamisnäitajate õigeks esitamiseks vajaliku sageduskostega.

2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Pneumotahhograafide töomadusi hinnatakse enamasti vastavalt ATS standardile. Standardis on esitatud 24 erinevat pneumotahhogrammi, millelt mõõteseade peab etteantud täpsusega registreerima hingamisfunktsiooni teatud parameetreid (näiteks ekspiratoorne tippvool *PEF*, keskmine ekspiratoorne vool *MEF* jt.). Nende spetsiaalsete pneumotahhogrammide loomiseks kasutatakse hingamiskõverate generaatoreid, näiteks patenteeritud seadet *PWG6 (Pulmonary Waveform Generator 6)*. Viimati mainitud seadme abil uuris K. Peedo 24 standardset õhuvoolu kõverat oma magistritöös, et selgitada SA-03 kuumtraatanduri mõõtmistäpsust hingamisnäitajate mõõtmisel. Peedo töö tulemused näitasid, et SA-03 kuumtraatanduri mõõtmistäpsus mahub ATS standardis esitatud lubatud vigade piiridesse (Peedo 2002, Kingisepp *et al* 2006).

Käesoleva magistritöö autori poolt kirjutatud bakalaureusetöös uuriti SA-03 anduri täpsust ja omadusi õhu püsivoolukõverate järgimisel. *PWG6* genereerib õhu püsivoolukõverad järgmisel viisil: 100 ms jooksul kiireneb õhuvool etteantud väärtuseni lineaarselt ja jääb siis konstantseks. Püsivoolukõverate uurimiseks kasutatakse just selliseid lineaarse tõusu ja konstantse nivooga kõveraid, kuna hüppele lähedaselt muutuvat õhuvoolu on mehaaniliselt liikuva pumba abil äärmiselt raske nii suure täpsusega luua (Melikov ja Popiolek 2004).

Autori bakalaureusetöö üheks tulemuseks oli, et u. 100 ms pärast katse algust tekib anduri väljundis signaali ülevise (keskmiselt 5% konstantsest õhuvoolu lõppkiirusest). Üleviske tekkimise aeg langeb kokku maksimaalse ekspiratoorse tippvoolu saavutamise ajaga (Kingisepp 2003), mis teatud tingimustel võib põhjustada ebatäpsusi nimetatud parameetri mõõtmisel. Selle üleviske modelleerimiseks võib kasutada 2. või kõrgemat järku madalpääsfiltrit.

Kuumtraatandurite dünaamikat, sageduskostet ja üleviset on kirjanduses uuritud valdavalt turbulentsete õhuvoolude mõõtmisega seotud rakendustes (Morris ja Foss 2003, Freymuth 1977, Li *et al* 2004, Khoo *et al* 1998). Hingamisuuringutes kasutatavate pneumotahhograafide kuumtraatandurite konstruktsioonilisi omapärasusi neis uuringutes autorile kirjanduses kätte puutunud ei ole. Turbulentsete voolude ja klassikalise konstruktsiooniga kuumtraatandurite analüüsimisel ollakse seisukohal, et anduri sageduskoste on määratud põhiliselt anduri konstruktsiooni, materjali, ülekuumendatuse suhtarvu ja termodünaamiliste omadustega (Morris ja

Foss 2003); suurte turbulentsisageduste mõõtmisel on oma osa ka Wheatstone'i sillal põhineval mõõtesüsteemil ja tagasisidel (Li 2004). ATS vanemas standardis soovitatakse, et õhuvool vs. aeg kõverate spektrid peavad hingamisnäitajate õigeks kirjeldamiseks sisaldama sagedusi kuni 6 Hz (Lemen *et al* 1982), seega mõõtesüsteemi elektriparameetrite uurimine anduri mõõteomaduste täiustamiseks ei ole esmatähtis. Eksperimentide põhjal tehtud hinnangute põhjal peaks aga anduri sageduskoste spekter sisaldama sagedusi kuni 12 Hz (ATS 1994), uusimatel andmetel ekspiraatorse tippvoolu mõõtmiseks kuni 20 Hz (Miller *et al* 2005).

Andurite sageduskoste uurimisel on kasutatud mitmeid erinevaid meetodeid. Üheks meetodiks on kasutada anduri elektrilise mõõtesüsteemi sisendis elektrivoolu või pinge impulsse (Freymuth 1997, 1998, Li 2006). Teise meetonina on võimalik simuleerida anduri sisendis reaalseid õhuvoolu-impulsse (Khoo *et al* 1999, Teo *et al* 2001, Li 2006). Viimast lähenemist on kasutatud selleks, et lahutada mõõtesüsteemi enda sagedusekoste anduri terministest sageduskostest, kuna eriti madalsageduslike mõõtmiste sooritamisel ületab elektrilise mõõtesüsteemi lõikesagedus anduri terminist lõikesagedust olulisel määral (Morris ja Foss 2003). Sageduskostet on hinnatud ka kuumtraadi kuumutamisel laserkiirguse abil (Sarma 1998).

Reaalsete õhuvooluimpulsside kasutamise asemel soovitatakse tulemusi modelleerida, kuna reaalsete õhuvooluimpulsside genereerimise vigade tõttu võidakse sageduskoste määrata ebatäpselt (Melikov ja Popiolek 2004).

Terministest efektidest põhjustatud lõikesagedus sõltub olulisel määral anduri konstruktsioonist. Kui kuumutatava traadi pikkuse ja diameetri suhe on väiksem kui u. 200...400, siis määrab lõikesageduse see, kui suur osa soojust juhatakse andurist välja läbi kuumtraadi ja korpuse kinnituskoha võrreldes õhu voolamisel põhjustatud jahtumisel ilmnevate soojuskadudega. Samuti on oluline fakt, et kuumtraadi temperatuurijaotus erinevate õhuvoolu kiiruste juures on erinev. Sageduskoste määramisel on oluline, kui kiiresti on andur oma temperatuurijaotust võimeline muutma, kuna andurid kalibreeritakse tasakaaluolekus õhu püsivoolukiiruste juures. Rolli mängib ka andurina kasutatavate materjalide soojusmahtuvus. (Li *et al* 2004, Morris ja Foss 2003)

Kuumtraatanduri dünaamikat uuritakse valdavalt eksperimentaalselt või empiirilisel, üksikud

autorid on püüdnud kogu kuumtraatanduri süsteemi kirjeldada ka analüütiliselt ja täisteoreetiliselt (Payne 2001). Teoreetilistes lähenemisviisides on kirjeldatud ainult nn. klassikalist tüüpi kuumtraatandureid, kus mõõteelemendiks ongi üksainus üleskuumutatud traat. Käesolevas uurimistöös uuritava anduri konstruktsiooniga kuumtraatandureid nii põhjalikult autori andmeil uuritud ei ole. Analüütilise lähenemise teeb mõnevõrra keerukaks tõsiasi, et nn. klassikalise konstruktsiooniga andurite sageduskoste sõltub suurel määral anduri kontaminatsioonist (Moss 1992). Sellest tulenevalt on kuumtraatandureid peetud sageduskoste poolest paljudeks rakendusteks sobivaks, kuid kontaminatsioonist tingitud tihe kalibreerimisvajadus on kuumtraatandurite implementeerimisel seadnud piiranguid; käesolevas töös uurimise all oleva anduri korral aga neid probleeme ei ole (Peedo 2002, Kingisepp *et al* 2006).

Kuna kirjanduses puuduvate andmete tõttu ei saa käesolevas töös uuritava anduri konstruktsioonist lähtuvate iseärasuste poolt määratud sageduskostet analüütiliselt uurida, lähtutakse käesolevas töös anduri modelleerimisest.

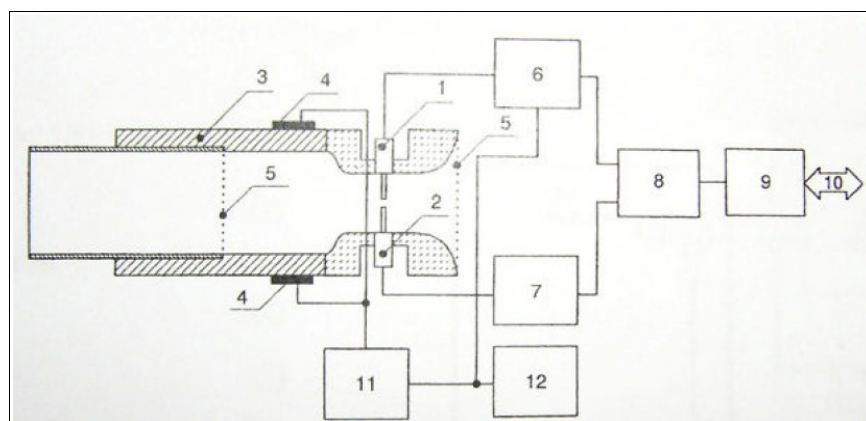
3. METOODIKA, APARATUURI JA OBJEKTIDE KIRJELDUS

Käesolevas peatükis kirjeldatakse uurimisobjektiks olevat kuumtraatandurit ja selle kalibreerimist ning antakse ülevaade katsekorraldusest.

3.1 Uurimisobjektiks oleva kuumtraatanduri ehituse kirjeldus

Käesoleva töö uurimisobjektiks on Emros OÜ ja TÜ füsioloogiainstituudi koostöös väljatöötatud spiroanalüsaatori SA-03 konstantse elektritakistusega kuumtraatandur (Plakk *et al* 1998).

Spiroanalüsaatori SA-03 õhuvoolu mõõtmise kuumtraatanduri skeem on esitatud joonisel 1.

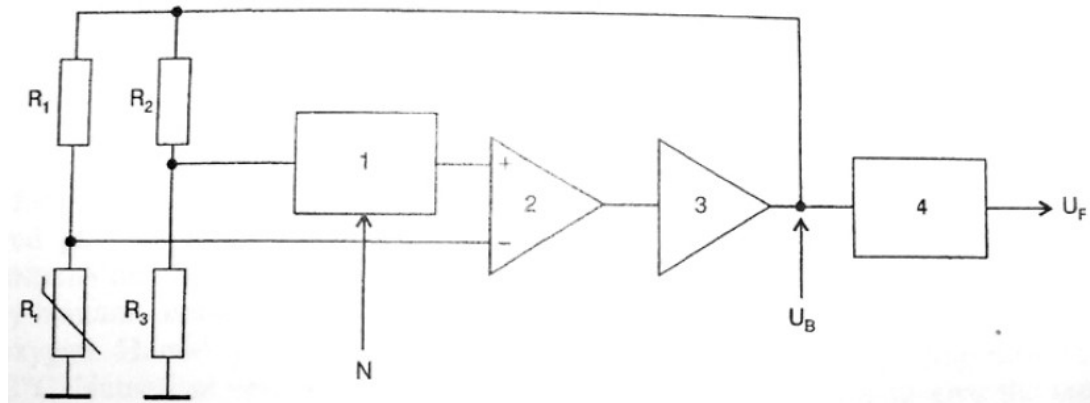


Joonis 1. Kuumtraatanduri skeem. 1 = õhuvoolu andur, 2 = õhutemperatuuri andur, 3 = õhuvoolukanal, 4 = kuumutatavad elemendid, 5 = võrk, 6 = õhuvoolu mõõtmise vooluring, 7 = termomeetri vooluring, 8 = AD muundur, 9 = digitaalne liides, 10 = PC ISA siin, 11 = termostaat, 12 = toiteplokk

Joonisel on kujutatud õhuvoolukanal ja selles olevad andurid. Õhuvoolukanal on torukujuline, milles asuvad õhuvoolu- ja temperatuuriandurid. Õhuvoolutoru mõlemas otsas paiknevad võrgud, mis muudavad õhuvoolu ühtlasemaks ning kaitsevad andureid mehaaniliste vigastuste eest. Andureid ümbritsev õhuvoolutoru on valmistatud pleksiklaasist, ülejäänud toruosa on alumiiniumist. Alumiiniumist toruosa kuumutatakse 35 °C-ni, et vältida väljahingatava õhu veeauru kondenseerumist toru seintele. Nii õhuvoolu- kui temperatuuriandur on ühendatud PC ISA siini

ühendatava kaardi kaudu arvutiga (Plakk *et al* 1998).

Skeem anduri tööõhimõtte selgitamiseks on esitatud joonisel 2.



Joonis 2. Õhuvoolu anduri lihtsustatud skeem. 1 = DA konverter, 2 = diferentsiaalvõimendi, 3 = võimsusvõimendi, 4 = taseme vahetaja, R_f = vooluandur, N = kontrollkood, U_B = silla pinge, U_F = õhuvoolukiiruse anduri väljundpinge

Lisaks õhuvooluandurile on mõõteseadmes ka täiendav temperatuuriandur. See on vajalik õhu liikumise suuna detekteerimiseks, kuna kuumtraatandur ei tee õhu liikumise suunal vahet. (Plakk *et al* 1998). Temperatuuri- ja õhuvooluandurid on konstrueeritud järgmiselt: 1 mm diameetriga 8 mm pikkusele klaaspulgakesele on keritud 20 μm diameetriga plaatinatraat. Klaaspulgakeste pikkus on umbes pool voolukanali diameetrist, mis eeldusel, et kogu toru ulatuses on õhuvool sümmeetriline, integreerivad kogu toru ristlõike õhuvoolu ning õhutemperatuuri (Plakk *et al* 1998).

3.2 Uurimisobjektiks oleva kuumtraatanduri kalibreerimine

Anduri kalibreerimisel registreeriti mõõtesüsteemi väljundpinge U õhuvoolu funktsioonina konstantsel temperatuuril. Registreeriti kolm kõverat: õhu temperatuur oli u. 15°C, 24°C ja 35°C. Andurid kalibreeriti järgmiste õhu püsivoolu väärtuste juures: 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 35, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600 ja 660 l/min. Kalibratsioonitabelites esitatud õhuvoolu väärtused 2, 4, 6 ja 8 ning 720 l/min on leitud ekstrapoleerimise teel. Saadud kõveratest koostati 96 elemendiline maatriks, mille abil vaatluse all olev andur kalibreeritigi. Temperatuurisõltuvuse arvestamiseks kasutati ülalmainitud õhutemperatuuridel saadud kolme kõverat ning lineaarset interpolatsiooni (Plakk *et al* 1998).

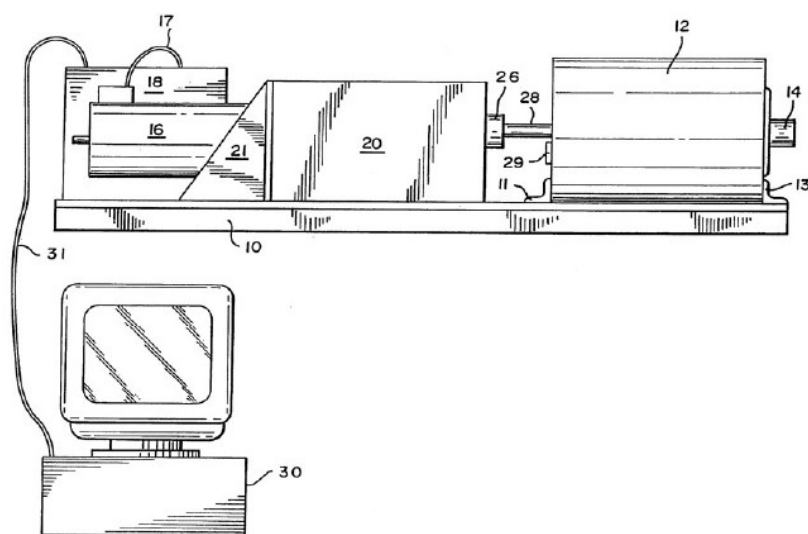
Kalibreerimismatriksi väärtused on saadud õhu püsivoolu tingimustes. Dünaamiliste efektide kompenseerimiseks kasutati 3 l käsipumpa, mille abil hinnati seda, kui täpselt järgib andur ruumala muutusi muutuva õhuvoolu korral (Plakk *et al* 1998).

K. Peedo magistritöös analüüsiti SA-03 kuumtraatanduri omadusi PWG6 abil genereeritud 24 ATS õhuvoolu standardkõvera jälgimisel (Peedo 2002). Saadud tulemused kinnitasid, et sellise konstruktsiooniga õhuvoolu andur vastab nii ATS kui ERS poolt spirograafides kasutatavatele õhuvoolu anduritele esitatud nõudmistele (Kingisepp *et al* 2006).

Lisaks 24 õhuvoolu standardkõverale, mida analüüsis oma töös K. Peedo, registreeriti SA-03 anduri abil ka PWG6 poolt genereeritud õhu püsivoolud. Püsivoolude mõõtmise esialgse analüüsi viis autor läbi oma bakalaureusetöös (Mäger 2004). Neid õhu püsivoolukõveraid analüüsitakse täiendavalt ja võrreldakse modelleerimisel saadud tulemustega käesolevas magistritöös.

3.3 Katsekorraldus

Käesolevas töös analüüsitakse PWG6 abil genereeritud ja SA-03 kuumtraatanduriga registreeritud õhu püsivoolu mõõtmistulemusi. Katsed viidi läbi Kuopios firma Medikro Oy hingamisanalüsaatorite kontrolli laboris MH Custom Design & MFG. L. C. Utah hingamiskõverate generaatori PWG6 abil, mille skeem on esitatud joonisel 3.

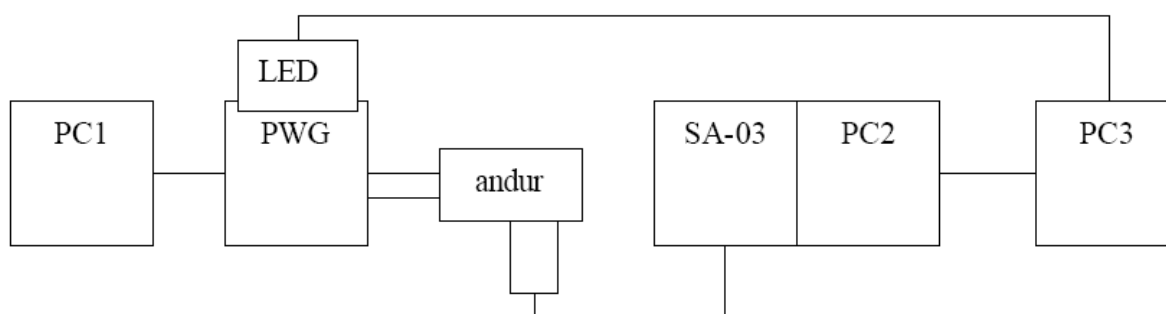


Joonis 3. Hingamiskõverate generaator PWG6

PWG koosneb õhusilindrist (12), maksimaalse ruumalaga 12 liitrit, mille sees oleva kolvi abil suunatakse õhk läbi ava (14) sisse või välja. Pump töötab mootori (16) abil, mis on kaabli (17) kaudu ühendatud juhtimisseadmega (18). Mootoriga on ühendatud pöördliikumist kolvi sirgliikumiseks transformeeriv mehhanism (20). Kogu süsteemi juhib personaalarvuti (30), mis on liidese (31) abil ühendatud mootori juhtimisseadmega. Arvutiprogramm juhib mootori tööd ja genereerib selle abil ATS standardkõveraid (Hoyt *et al* 1995).

Käesolevas töös analüüsitavad õhuvoolud on saadud seadme LIN (lineaarse) funktsiooni abil, st PWG6 andis väljundisse eelnevalt kindlaks määratud õhu püsivoolu väärtuse; õhuvoolu kiirus kasvas lineaarselt ja jõudis etteantud nivoole 100 ms jooksul (PWG User Manual). Katse käigus registreeriti õhu püsivoolu nivoooni jõudmise täpsust ja selle püsimise konstantsust nelja erineva SA-03 anduriga ükshaaval sama katsekorralduse järgi. Käesolevas töös tehtud analüüsis erinevaid andureid ei eristatud, kuna katsetulemused ei sõltu erinevat aega kasutusel olnud konkreetsest andurist (Peedo 2002, Mäger 2004).

Katsekorralduse skeem oli järgmine (vt. joonis 4): PC1 abil juhti PWG tööd. Lõpptulemusi registreeriva PC3 ja PWG tööd sünkroniseeriti valgusdiodi LED abil. PWG signaali mõõdeti SA-03 kuumtraatanduriga, mis oli ühendatud arvutiga PC2, andmed salvestati arvutisse PC3.



Joonis 4. Katsekorralduse skeem

SA-03 kuumtraatanduriga registreeriti hingamiskõverate generaatori PWG6 abil 86 hingamiskõverat, mahtkiiruste vahemikus 2...15 l/s. Mõõtmised ja mudelarvutused tehti ATP (*Ambient Temperature, Pressure*) tingimustel. Inimestel sooritatavate mõõtmiste tulemused esitatakse aga BTPS (*Body Temperature, Pressure, Saturated*) tingimustel. BTPS tingimustele üleminemiseks tuleb ATPS tingimustel saadud mõõtmistulemused korrutada korrigeerimisfaktoriga

$$r_1 = \frac{P_B - P_{H_2O}}{P_B - 47} \cdot \frac{310}{273 + t^{\circ}} \quad (1)$$

kus kus P_B – õhurõhk (mmHg) gaasi ruumala mõõtmise ajal, P_{H_2O} – veeauru osarõhk (mmHg) veeauruga küllastatud gaasisegus (leitakse vastavast tabelist), 310 – 37 °C Kelvini temperatuuriskaalas, 47 – veeauru osarõhk (mmHg) veeauruga täielikult küllastunud allveolaargaasis 37 °C juures, 273 – 0 °C Kelvini temperatuuriskaalas, t° – mõõdetava gaasi temperatuur °C, 760 – 1 atmosfäärile vastav rõhk mmHg.

3.4 Töö eesmärk

Käesoleva töö eesmärgiks on hinnata anduri konstruktsiooniliste näitajate mõju anduri sageduskostele ja selgitada välja otstarbekad anduri konstruktsiooni muudatused selle lõikesageduse tõstmiseks.

Eesmärgi saavutamiseks püstitati järgmised ülesanded:

1. uurida SA-03 originaalse konstruktsiooniga kuumtraatanduri sageduskostet;
2. modelleerida SA-03 kuumtraatanduri dünaamikat ja siirdeprotsesse lähtuvalt selle geomeetriast ja muudest iseärasustest;
3. võrrelda anduri mudeli ja anduri enda sageduskostet hingamisnäitajate õigeks esitamiseks vajaliku sageduskostega.

Eesmärgi täitmisel on võimalik muuta andurit ATS poolt esitatud kõrgendatud nõuetele paremini vastavamaks ning suurendada hingamisnäitajate mõõtmistäpsust. Kirjanduses on näidatud (vt. punkti 2), et klassikalist tüüpi kuumtraatandurite lõikesagedus sõltub anduri konstruktsioonist olulisel määral. Loogilise eeldusena kehtib see ka SA-03 kuumtraatanduri kohta. Modelleerimise abil see välja selgitataksegi.

4. SA-03 KUUMTRAAATANDURI MUDEL

4.1 Mudeli struktuur

Hindamaks SA-03 kuumtraatanduri sageduskoste sõltuvust selle konstruktsioonis olevatest erinevatest komponentidest, koostati arvutustarkvara MATLAB 7.0 modelleerimispaketi Simulink abil uurimise all oleva kuumtraatanduri mudel.

Simulink on MahtWorks'i poolt väljatöötatud programm, mis on mõeldud modelleerimiseks, simulatsioonideks ja dünaamiliste süsteemide analüüsimiseks. Mudelite konstrueerimine toimub plokkdiagrammide abil graafiliselt. Plokkdiagrammide komponente saab valida plokkide andmebaasist, tänu millele on võimalik täpselt disainida, simuleerida, implementeerida ja testida juhtimis-, signaalitöötlus-, kommunikatsiooni- ja muid ajas muutuvaid süsteeme. Simulink on integreeritud programmpaketiga MATLAB, mis muudab nende programmide kasutamisel arvutuste töövoos eriti sujuvaks.

Modelleerimisel võetakse muutujatena arvesse anduri klaaspulgakese diameeter, tihedus, erisoojus ja pikkus; klaaspulgakesele keritud traadi keerdude arv; kuumtraadi diameeter, tihedus ja erisoojus; klaaspulgakese temperatuur, mille juures on Wheatstone'i sild tasakaalustatud, ning traadi eritakistus sellesama temperatuuri juures; voolava gaasi temperatuur, viskoossus, soojusjuhtivus ja Prandtl'i arv. Õhu voolamist iseloomustatakse voolu Nusselt'i arvu abil, seosega

$$Nu = 0,42 Pr^{0,26} + 0,57 Pr^{0,33} Re^{0,45}, \quad (2)$$

kus Nu – Nusselt'i arv, Pr – Prandtl'i arv, Re – Reynolds'i arv (Bruun 1995). Kõik nimetatud parameetrid on võetud temperatuuril

$$T_{film} = T_{kuumtraat} - T_{voolavGaas}. \quad (3)$$

Kuumtraadi modelleerimisel termilise tasakaalu olukorras kasutatakse lihtsat põhimõtet: tasakaaluolekus on anduri küttevõimsus võrdne kuumtraadi jahtumise võimsusega. Antud juhul võetakse arvesse ainult kuumtraadi jahtumist konvektsiooni teel, arvestamata jäetakse soojuskaod soojusjuhtivuse tõttu anduri korpusesse, kuna neid saab kompenseerida anduri kalibreerimise käigus (Morris ja Foss 2003).

Kui anduri küttevõimsus ületab / jääb alla anduri jahtumisel ära antavale võimsusele, siis hakkab kuumtraatanduri temperatuur muutuma. Seega, modelleerides kuumtraati esimest järku süsteemina, mille olekut kirjeldavaks muutujaks on temperatuur, saab temperatuuri muutumise võrrandi panna kirja järgmisel kujul:

$$C_p \frac{dT}{dt} = I^2 R - h(t) A_w (T_w - T_a), \quad (4)$$

kus C_p – sensori summaarne soojusmahtuvus (traat + klaaspulgake), $\frac{dT}{dt}$ – sensori temperatuuri muutumise kiirus, $I^2 R$ – sensori küttevõimsus, $h(t)$ – soojusülekanne koefitsiendi muutumine ajas sõltuvalt õhuvoolu kiirusest, A_w – sensori efektiivne pindala, T_w – kuumtraadi temperatuur, T_a – andurit läbiva õhuvoolu temperatuur (Stainback ja Nagabushana 1997).

Kasutades kuumtraatandurit Wheatstone'i silla ühe õlana ja tagasisidestades seda proportsionaalse tagasisidega (vt. joon. 2), saab temperatuuri muutumise võrrandi kirja panna järgmisel kujul:

$$C_p \frac{dT}{dt} = -k_p (T_w - T_{set}) - h(t) A_w (T_w - T_a), \quad (5)$$

Kus k_p – proportsionaalse tagasiside tegur, T_{set} – kuumtraadi nimitemperatuur (SA-03 korral 250°C). Viimast seost kasutataksegi käesolevas töös kuumtraadi modelleerimisel, kusjuures soojusülekanne koefitsient avaldub kujul:

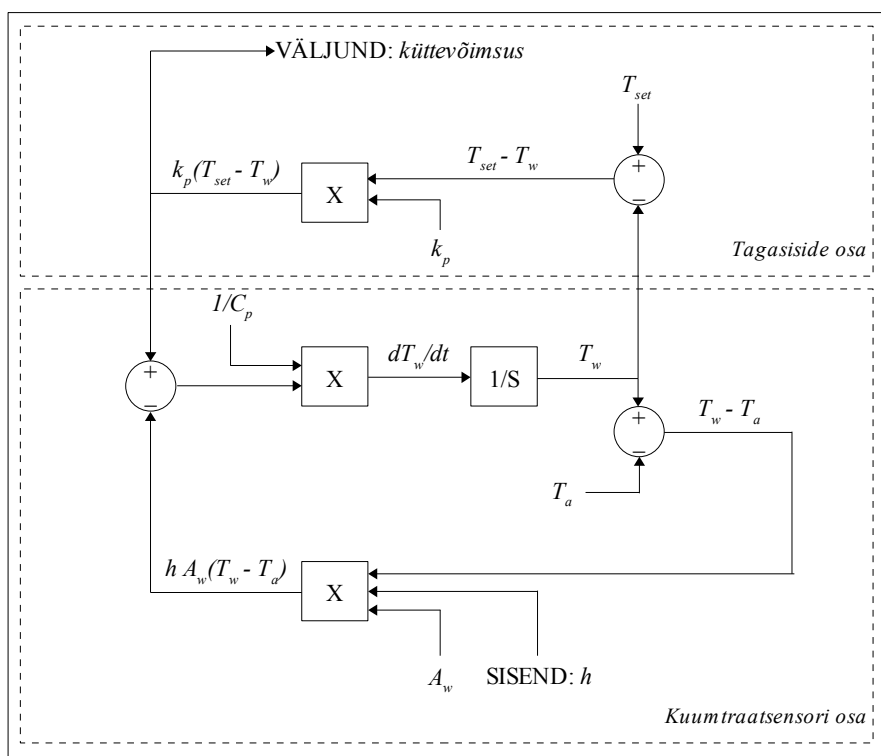
$$h(t) = \frac{Nu k_a}{L}, \quad (6)$$

Kus k_a – õhu soojusjuhtivus, L – sensori karakteristiklik mõõde (pikkus). Viimases seoses esinev Nusselt'i arv on seotud õhu voolamise Reynolds'i arvuga, mis omakorda on otseses seoses õhu voolamise kiirusega.

Kuumtraadi mudeli põhimõtteline skeem on kujutatud joonisel 5. Mudeli *Simulink*'i skeem on ära toodud lisa 1. Mudelisse on sisse viidud ka võimalus kasutada proportsionaalse tagasisideteguri asemel PID-regulaatorit (pole joonisel 5 näidatud, vt. lisa 1).

Modelleerimisel kasutati lugemivõtmissagedust $f_M = 1 \text{ kHz}$. See tagas mudeli andmete

võrreldavuse eksperimendis saadud andmetega, mille lugemivõtmisagedus oli $f_E = 100$ Hz. Kuna SA-03 kuumtraatanduri lugemivõtmise sagedus oli $f_E = 100$ Hz, ei pea tulemuste interpreteerimisel ja anduri dünaamika parandamisel optimaalsete tulemuste saamiseks suurendama anduri lõikesagedust rohkem kui 50 hertsini.



Joonis 5. Kuumtraatanduri mudeli põhimõtteline skeem.

X – korrutusplokk, +/- – liitmis/lahutamisplokk,
 $1/S$ – integreerimisplokk, muud tähistused vastavad
 ülalpool tekstis olevatele tähistustele. Sisend: ajas
 muutuv soojusülekanne koefitsient (vastab õhu voolu
 mahtkiirusele); väljund: kuumtraadi küttevõimsus.

Mudeli väljund (küttevõimsus) piirati küllastumisploki abil 500 W-ni. See väärtus on suurusjärgu võrra suurem kui reaalsete andurite maksimaalne küttevõimsus. Tänu sellele elimineeritakse võimalus, et mudeli lõikesagedus määratakse ekslikult liiga väikse maksimaalse küttevõimsuse tõttu.

Lõikesageduse määramisel kasutati ajas diskreetset õhuvoolumpulssi, mille modelleerimiseks kasutati *Simulink* tarkvarasse sisseehitatud impulsplokki. See *Simulink*'i sisseehitatud impulsplokk

andis ploki väljundisse õhuvoolu kiiruse 0 m/s, v.a. defineeritud ajahetkel, mil ploki väljundis oli ühe lugemivõtmise kestel ühikuline õhuvool. Kalibratsioonisignaali ja ATS standardkõverad loeti sisse numbriliselt, samuti lugemisvõtmisagedusega $f_M = 1 \text{ kHz}$.

4.2 Mudeli kalibreerimine

Muutmaks mudelit võimalikult sarnaseks kuumtraatanduriga, peeti vajalikuks viia läbi mudeli kalibreerimine sarnaselt (SA-03) kuumtraatanduri kalibreerimisele (Plakk *et al* 1998). Esmalt tuli leida tagasisidetegur k_p , mille korral mudeli sageduskoste lõikesagedus vastaks punktis 5.1 katsete põhjal leitavale lõikesagedusele $f_s = 1,90 \text{ Hz}$. Tagasisideteguri leidmiseks kasutati sisendis õhuvoolu ekvivalentssignaalina diskreetset õhuvooluimpulssi. Seejärel koostati arvutusalgortm, mille rakendamisel varieeriti muutujat k_p nii, et Bode diagrammi põhjal määratud lõikesagedus vastaks ülalmainitud väärtusele.

Seejärel leiti kalibratsioonikoefitsiendid, mis seovad omavahel anduri väljundsignaali ja anduri poolt mõõdetava õhuvoolu väärtuse. Nagu reaalsete kuumtraatanduriga anemomeetrite kalibreerimiselgi, otsiti kalibratsioonikordajaid a , b ja c nii, et need rahuldaksid iga mahtkiiruse juures vähimruutude mõttes kõige paremini seost

$$\text{anduri väljundsignaal} = a + b v^c, \quad (7)$$

kus v – anduri poolt mõõdetav mahtkiirus [l/s]. Mudelil lasti piisavalt kaua töötada, et registreerida anduri väljundsignaal siis, kui see oli stabiliseerunud. Stabiliseerumiseks piisas 6 sekundist.

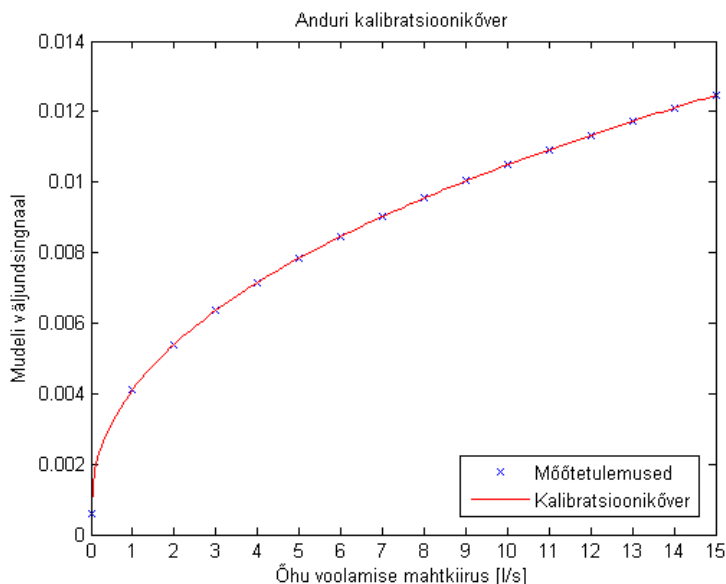
Mudeliga mõõdetud mahtkiirused olid vahemikus 0...15 l/s, sammuga 1 l/s. Leitud kalibratsioonikoefitsiendid olid järgmised:

$$a = 5,97 \cdot 10^{-4}, \quad b = 3,52 \cdot 10^{-3}, \quad c = 4,49 \cdot 10^{-1}; \quad (8)$$

modelleerimistulemusi ja kalibratsioonikordajate põhjal arvutatud kalibratsioonikõverat on kujutatud joonisel 6.

Mudeli kalibreerimine ülalkirjeldatud viisil on muuhulgas oluline ka seetõttu, et erinevates kirjandusallikates kasutatakse mõnevõrra erinevaid Nusselt'i arvu ning Prandtl'i ja Reynolds'i arvu

vahelisi seoseid. Mudeli kalibreerimisel vähendatakse tulemuste sõltuvust erinevatest $Nu = f(Pr, Re)$ funktsioonide täpsest kujust (vt. punkti 4.2.1), mis muudab esitatavad tulemused universaalsemaks.



Joonis 6. Mudeli kalibreerimine. Mõõtetulemused on tähistatud ristidega, leitud kalibratsioonikordajate põhjal arvutatud kalibratsioonikõver on tähistatud pidevjoonega.

Läbi kalibratsioonikõvera punktide joonistati kolmanda astme splain. Seda splaini arvestatakse hiljem ATS õhuvoolu standardkõverate mõõtmise modelleerimisel, samuti mõõtmiste põhjal esitatavate võrdlustulemuste arvutamisel ja anduri testimisel mudeli alusel pärast soovituslike muudatuste sisseviimist konstruktsioonis ja/või materjalides.

4.3 Mudeli piirangud

Modelleerimisel saadud tulemuste tõlgendamisel ja hindamisel tuleb tähele panna, et kasutataval mudelil on mõned piirangud.

- (1) Mudelis eeldatakse, et klaaspulga soojusmahtuvus, ümber mille on keritud kuumtraat, on oluliselt suurem kui kuumutatava traadi soojusmahtuvus.
- (2) Lähtuvalt klaaspulga suurest soojusmahtuvusest eeldatakse ka seda, et anduri temperatuuri jaotus piki klaaspulka jääb katse

jooksul konstantseks, s.t. et arvesse ei võeta temperatuuri jaotuse muutumisest tingitud anduri ajateguri pikenemist. (3) Samuti on oluline silmas pidada, et punktis 5.1 määratud anduri eksperimentaalne lõikesagedus võib olla alahinnatud, kuna eeldatakse, et sisendsignaal on ideaalne, s.t. õhuvool hakkab ajahetkel t_0 lineaarselt kasvama, kasv kestab 100 ms jooksul etteantud nivoo väärtuseni. Reaalselt aga nii järske („nurgelisi“) õhuvoolu muutusi luua ei saa, seega arvutustes kasutatav anduri õhuvoolu sisendsignaal (e. PWG6 õhuvoolu väljundisignaal) võib sisaldada kõrgema sagedusega komponente kui katses PWG6 poolt genereeritava õhuvoolu spektris reaalselt sisaldub, mis muudab ka punktis 5.1 kirjeldatud meetodil määratud lõikesageduse hinnangu tegelikust madalamaks.

5. MODELLEERIMINE JA ANALÜÜSITULEMUSED

Käesolevas peatükis modelleeritakse kuumtraatandurit ja leitakse selle löikesagedus erinevate parameetrite konkreetsete väärtuste juures. Uuritakse anduri eksperimentaalset löikesagedust, esitatakse üksikud ATS standardkõverad, mida kasutatakse saadud tulemuste tõlgendamisel, analüüsitakse eksperimentaalse löikesageduse sobivust standardkõverate mõõtemiseks vajaliku löikesagedusega ning leitakse mõõtesüsteemi sageduskoste tegelik löikesagedus.

5.1 Anduri sageduskoste löikesagedus

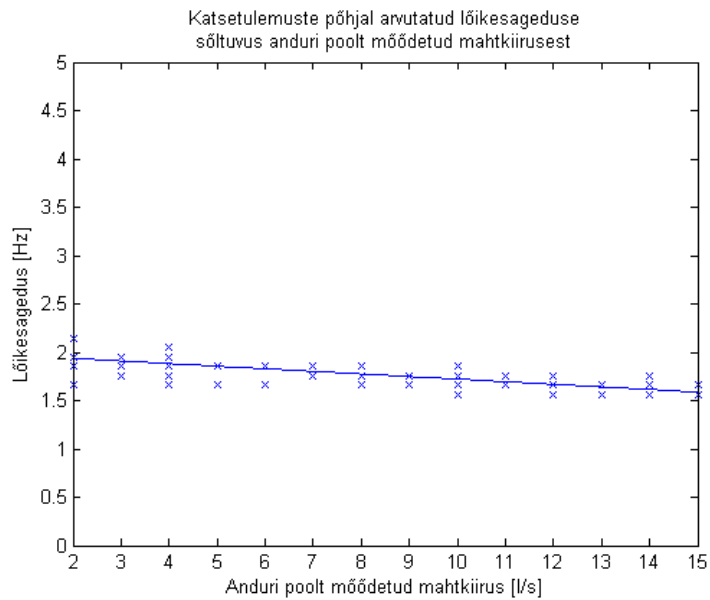
SA-03 anduriga registreeriti hingamiskõverate generaatori PWG6 abil loodud 86 lineaarset hingamiskõverat, mahtkiiruste vahemikus 2...15 l/s. Nimetatud mõõterežiimis tõusis õhuvoolu kiirus lineaarselt etteantud väärtuseni 0,1 s jooksul (vt. punkti 3.3). Anduri sageduskoste löikesageduse määramiseks leiti nii PWG6 sisendsignaali (nn. teadaoleva signaali) Fourier' pööre $S(\omega)$ kui registreeritud mõõtesignaali Fourier' pööre $V(\omega)$. Sageduskoste $H(\omega)$ määrati järgmise seose abil:

$$S(\omega) \cdot H(\omega) = V(\omega) . \quad (9)$$

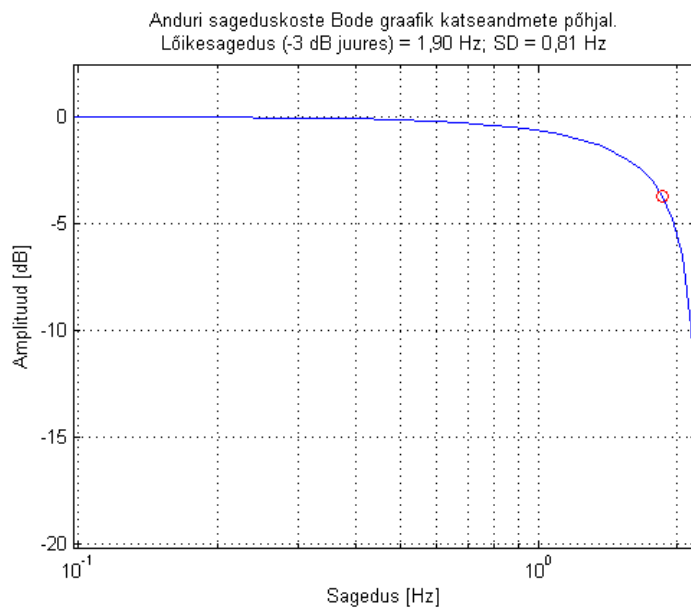
Löikesageduse leidmiseks kasutati anduri sageduskoste põhjal välja joonistatud Bode diagrammi. Löikesageduseks määrati sagedus, mille korral oli sageduskoste moodul vähenenud -3 dB.

Ülalkirjeldatud protseduur viidi läbi kõigi 86 kõvera mõõtmistulemuse korral, iga katse sageduskoste ja löikesagedus arvutati eraldi välja. Kuna katsete sageduskoste kujud olid sarnased ja kuna löikesagedus ei sõltunud oluliselt anduri poolt mõõdetud õhu voolamise mahtkiirusest (vt. joonis 7), määrati anduri summaarne löikesagedus f_l 86 erineva katse löikesageduse aritmeetilise keskmise leidmise teel.

Arvutuste tulemusel saadi löikesageduseks $f_l = 1,90$ Hz, standardhälbega $SD = 0,81$ Hz. Arvutustulemused on kujutatud graafiliselt joonisel 8.



Joonis 7. *Löikesageduse sõltuvus mahtkiirusest. Regressiooni-sirge parameetrid: tõus $k = -0,027 \frac{\text{Hz}}{\text{l/s}}$, algordinaat $b = 1,990 \text{ Hz}$.*



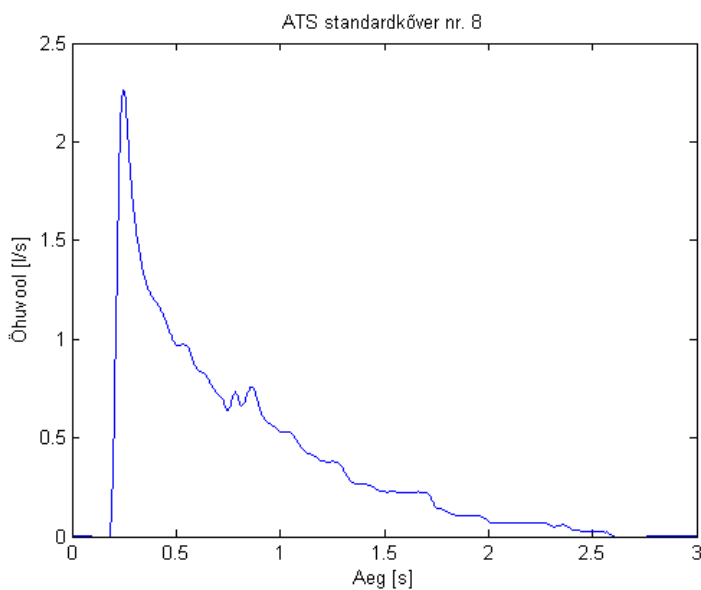
Joonis 8. *Anduri sageduskoste Bode graafik ja löikesagedus katseandmete põhjal. Löikesagedus $f_1 = 1,90 \text{ Hz}$, standardhälve $SD = 0,81 \text{ Hz}$.*

Ülalesitatud tulemusi võrreldakse edaspidi modelleerimise käigus saadud anduri sageduskostega ja iseloomustatakse anduri vastavust ATS standardiga.

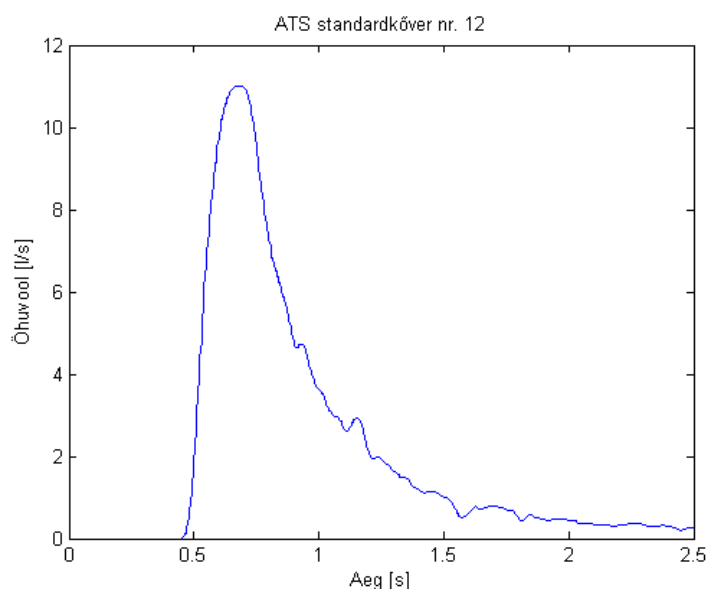
5.2 ATS standardkõverate mõõtmise mudeli abil

Spiromeetrite standardiseerimisel ja nende mõõtmisomaduste kontrollimisel kasutatakse inimese hingamisuuringutes tüüpiliselt esineda võivaid 26 standardkõverat (õhuvool vs. aeg) (Millet *et al* 2005, ATS 1994). K. Peedo leidis oma magistritöös, et SA-03 vastas nende standardkõverate põhjal hinnatavate hingamishäirete mõõtmisel ATS poolt esitatud nõudmistele (Peedo 2002). Käesolevas punktis esitatakse üksikud standardkõverad ja uuritakse nende spektreid, mida võrreldakse mudeli sageduskostega ning mõõdetakse mudeli abil standardkõveraga esitatud õhuvoolu.

Analüüsiks valiti ATS standardkõverad nr. 8 ja nr. 12. Need kõverad katavad autori hinnangul piisava õhuvoolu kiiruste vahemiku (tippvool: 5...11 l/s), samuti on kõverate kujud erinevad: kõveral nr. 8 on õhuvoolu tipp terav, kõveral nr. 12 aga tunduvalt lamedam. Samuti ei lange õhuvoolu kiirus sujuvalt, graafikutel on näha teatavaid õhuvoolu fluktuatsioone, mis annavad parema võimaluse sageduskoste uurimiseks. Vt. ka jooniseid 9 ja 10.



Joonis 9. *ATS standardkõver nr. 8. Õhuvoolu muutus ajas. (Allikas: ATS 1994)*



Joonis 10. *ATS standardkõver nr. 12. Õhuvoolu muutus ajas. (Allikas: ATS 1994)*

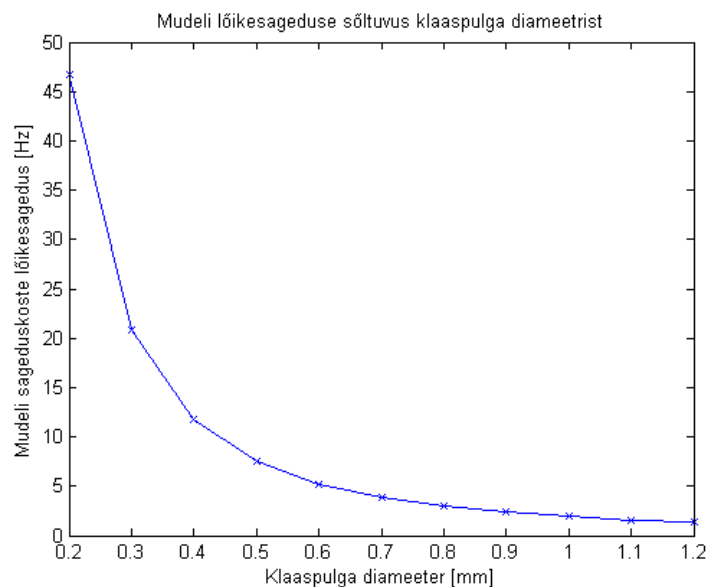
Uurides standardkõverate nr. 8 ja nr. 12 spektreid, selgub, et need sisaldavad sagedusi vastavalt kuni 18,9 Hz ja 11,7 Hz, mis on palju suuremad kui punktis 5.1 leitud anduri lõikesagedus. Tegemaks kindlaks, kas nimetatud erinevus on tingitud ainult sellest, et PWG6 õhuvool lineaarse režiimi algfaasis ei vasta oodatule (s.t. et õhuvoolu kiiruse muutused ei ole nii järsud nagu oodatud), tuleb vaadelda, kas eksperimentaalse lõikesageduse soovitud tasemele tõstmiseks piisab anduri füüsiliste parameetrite mõningast muutmisest. Selleks uuritakse punktis 5.1 leitud tagasisideteguri abil seda, kuidas muutub anduri mudeli sageduskoste lõikesagedus mudeli erinevate parameetrite varieerimisel. Nimetatud analüüs on läbi viidud punktis 5.3.

Kui parameetrite väiksel varieerimisel lõikesagedus u. ühe suurusjärgu võrra ei suurene (et viia eksperimentaalset lõikesagedust paremasse vastavusse ATS standardiga), võib arvata, et viga on tehtud tagasisideteguri valimisel selle tõttu, et PWG6 tekitatud õhuvoolu kiiruse muutused ei ole õhuvoolu lineaarse režiimi algfaasis nii järsud nagu oodatud. Sellele ohule on oma töös tähelepanu juhtinud ka Melikov ja Popiolek (2004).

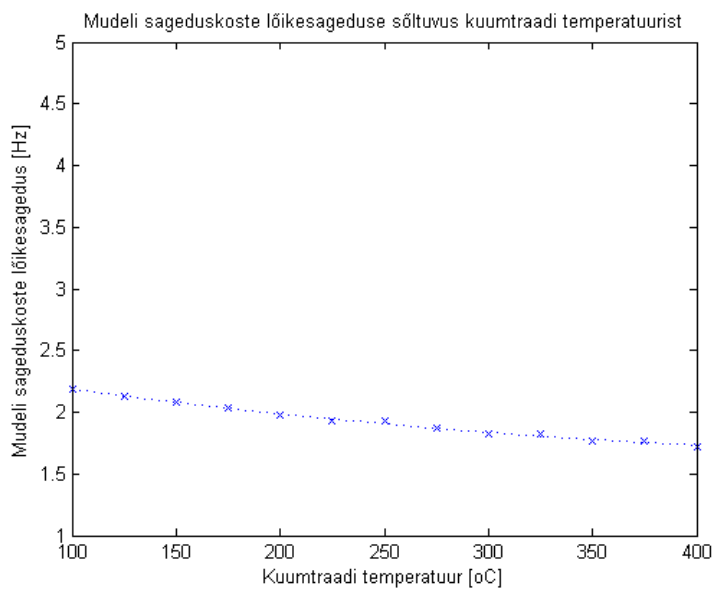
5.3 Mudeli sageduskoste lõikesageduse analüüs (eksperimentaalselt määratud mudeli proportsionaalse tagasisideteguri korral)

Mudeli loomisel lähtuti sellest, et selle sageduskoste lõikesagedus vastaks võimalikult hästi SA-03 kuumtraatanduri lõikesagedusele siis, kui mudeli parameetrid vastavad reaalse kuumtraadi parameetritele (vt. punkti 4.1). Järgnevalt hakati varieerima erinevaid mudeli parameetreid ning hindama selle mõju mudeli sageduskoste lõikesagedusele. Käesolevalgi juhul kasutati lõikesageduse hindamiseks mudeli sisendsignaalina diskreetset õhuvooluimpulssi. Lõikesageduseks määrati Bode diagrammi abil sagedus, mille korral oli sageduskoste moodul vähenenud -3 dB. Viimatimainitud meetodit kasutatakse samuti edaspidi lõikesageduse erinevatest parameetritest sõltuvuse uurimiseks.

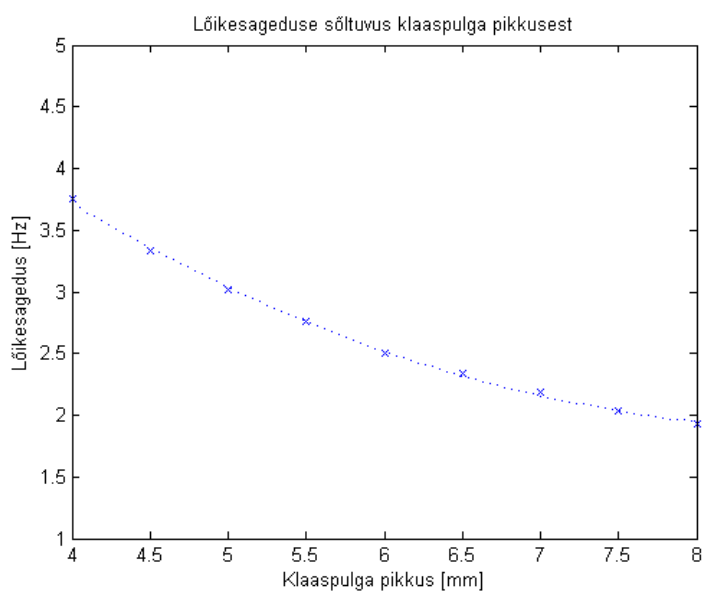
Järgnevalt hinnati, kuidas sõltub mudeli sageduskoste lõikesagedus klaaspulga diameetrist, kuumtraadi temperatuurist, klaaspulga pikkusest ja klaaspulga materjali erisoojusest. Saadud tulemused on ära toodud joonistel 11 – 14. Oluline on mainida, et käesolevas punktis uuriti nimetatud seoseid vaid põgusalt, tegemaks kindlaks, kas antud juhul on eksperimentaalse lõikesageduse erinevus tingitud eeldustele mittevastavast sisendsignaalist või mudeli enda mittesobivusest ATS standardkõveratega.



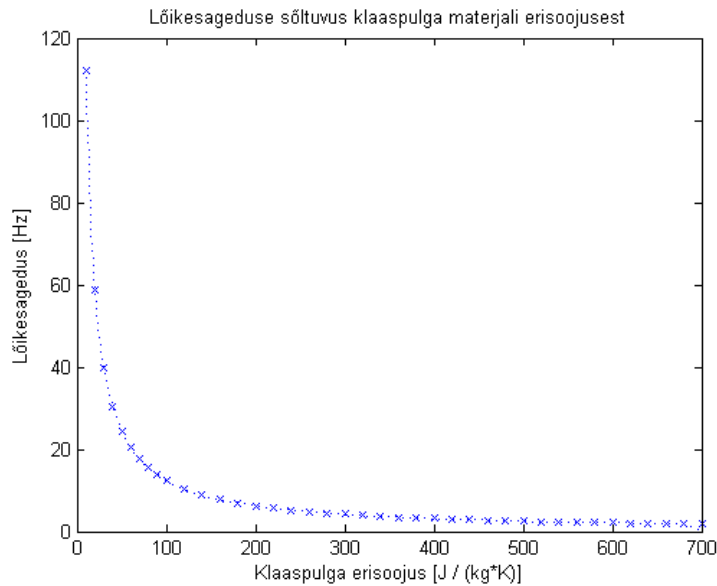
Joonis 11. Mudeli lõikesageduse sõltuvus klaaspulga diameetrist.



Joonis 12. Mudeli lõikesageduse sõltuvus klaaspulga ja kuumtraadi temperatuurist.



Joonis 13. Mudeli lõikesageduse sõltuvus klaaspulga pikkusest.



Joonis 14. Mudeli lõikesageduse sõltuvus klaaspulga materjali erisoojusest.

Modelleerimistulemuste põhjal saadud graafikutelt võib välja lugeda, et ühegi uuritud parameetri varieerimisel ei õnnestu anduri lõikesagedust muuta sobivaks, et mõõta Peedo (2002) töös esitatud täpsusega ATS standardkõveraid.

Seega võib oletada, et PWG6 väljundi (e. anduri eksperimentaalse sisendi) õhuvoolu kiiruse muutused ei ole nii järsud nagu eeldati punktis 5.1 ja et eksperimentaalselt leitud lõikesagedus ei võrdu anduri tegeliku lõikesagedusega. Järgmises punktis uuritakse, milline on anduri tegelik lõikesagedus, et seda kasutada edaspidises analüüsis.

5.4 Anduri tegeliku lõikesageduse leidmine

Anduri tegeliku lõikesageduse leidmiseks muudeti mudeli proportsionaalse tagasiside tegurit ja mõõdeti seejärel ATS standardkõveraid nr. 8 ja nr. 12. Järgnevalt võrreldi mõlemat standardkõverat mudeli väljundiga pärast väljundsignaali teisendamist vastavalt kalibratsioonikõverale, mis saadi punktis 4.2 kirjeldatud viisil. Siis hinnati sisend- ja väljundsignaali erinevuste põhjal veahistogramme. Mudeli tagasisidetegurit (ja seega ka lõikesagedust) muudeti seni, kuni mudeli veahistogrammid sarnanesid K. Peedo töös (2002) esitatud veahistogrammidega. Seejärel määrati mudeli lõikesagedus, kasutades mudeli sisendis diskreetset õhuvooluimpulssi. Tulemuseks saadi, et anduri sageduskoste lõikesagedus on

$$f_L = 10,8 \text{ Hz} . \quad (10)$$

Võrreldes leitud löikesagedust ja punktis 2 esitatud nõudeid, on näha, et see löikesagedus vastab ühele osale ATS vanematele standardite nõuetele, jäädes aga alla uuemates uuringutes esitatud 20-hertsisele soovitusel.

Järgnevates punktides uuritaksegi, mil määral sõltub mudeli põhjal arvatud anduri löikesagedus erinevatest anduri parameetritest ning milline oleks parim viis anduri töömadruste parandamiseks.

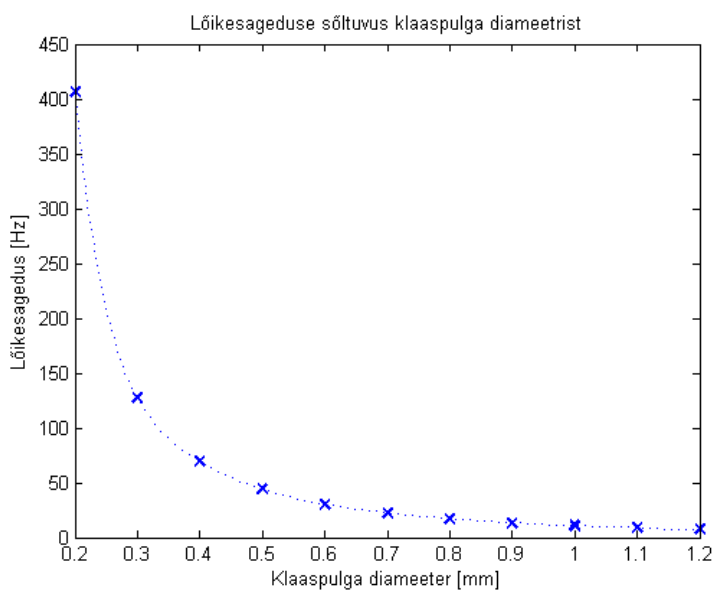
6. MUDELI FÜÜSILISTE PARAMEETRITE MÕJU ANDURI LÕIKESAGEDUSELE

Käesolevas peatükis uuritakse, mil määral sõltub mudeli põhjal arvutatud anduri lõikesagedus erinevatest anduri parameetritest. Mudeli proportsionaalse tagasisideteguri väärtus valiti selline, et mudeli lõikesagedus vastaks punktis 5.4 leitud lõikesagedusele 10,8 Hz. Muud mudeli parameetrid vastasid uuritava kuumtraatanduri parameetritele, muul viisil ei erinenud mudel punktis 4 kirjeldatust.

6.1 Klaaspulga diameetri mõju lõikesagedusele

SA-03 kuumtraatanduri konstrueerimisel on kasutatud klaaspulgakesele keritud platinatraati (vt. punkti 3.1). Kuna täiendavate soojusmahtuvuslike materjalide kasutamine lisab mõõtesüsteemi inertsi, on vaja uurida, mil määral mõjutab klaaspulga mass anduri lõikesagedust.

Uurimise all olevas seadmes kasutatava klaaspulga diameeter on 1 mm. Modelleerimise käigus varieeriti klaaspulga diameetrit vahemikus 0,2 – 1,2 mm, sammuga 0,1 mm, ning analüüsiti süsteemi sageduskoste lõikesagedust. Lõikesagedus määrati Bode diagrammilt (vt. punkti 5.2). Tulemused on kokku võetud joonisel 15 ja lisas 2 olevas tabelis.



Joonis 15. Mudeli lõikesageduse sõltuvus klaaspulga diameetrist.

Mudelis on arvestatud, et klaaspulga diameetri muutumisel muutub ka platinatraadi pikkus eeldusel, et platinatraadi keerdude arv klaaspulgal jääb konstantseks. Platinatraadi lühenemisel väheneb ka platinatraadi soojusmahtuvuse osa süsteemi inertsuse põhjustamisel.

Võiks arvata, et lõikesageduse kasvu väiksemate klaaspulga diameetrite juures põhjustabki platinatraadi enda lühenemisest tingitud soojusmahtuvuse vähenemine, kuid see ei ole nii. Platinatraadi soojusmahtuvus on kõne all olevate parameetrite väärtuste juures ühe suurusjärgu võrra väiksem kui klaaspulga soojusmahtuvus.

Jooniselt 15 on näha, et klaaspulga suurus on oluline parameeter anduri lõikesageduse määramisel – klaaspulga diameetri suurenemisel hakkab lõikesagedus kiiresti kahanema. Klaaspulga diameetri vähendamisel on anduri lõikesagedust kerge muuta vastavamaks kirjanduses toodud soovitudele.

6.2 Kuumtraadi temperatuuri mõju lõikesagedusele

Kirjanduses on esitatud tulemusi, kuidas sõltub kuumtraadi nn. termiline sageduskoste kuumtraadi temperatuurist või ülekuumendatuse faktorist. Uuringud näitavad, et ülekuumendatuse faktori suurenemisel (e. kuumtraadi temperatuuri tõstmisel) süsteemi sageduskoste lõikesagedus liigub suuremate sageduste poole (Li 2004). Nimetatud uuringud on alati läbi viidud traditsiooniliste kuumtraatandurite korral, mille konstruktsioonis kasutatakse ainult traati ennast, mida erinevalt SA-03 kuumtraatandurist pole keritud klaaspulgale. Käesolevas punktis uuritakse ülekuumendatuse faktori mõju SA-03 kuumtraatanduri tüüpi anduritele.

Ülekuumendatuse faktorit a võib defineerida mitmel erineval viisil, näiteks

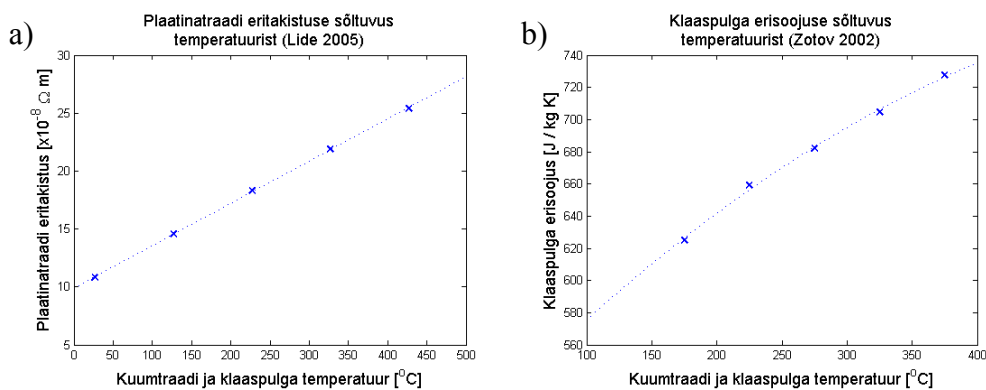
$$a = \frac{R_w - R_0}{R_0} \quad \text{või} \quad a = \frac{T_m - T_a}{T_a}, \quad (11)$$

Kus R_w – kuumtraadi takistus töötemperatuuril, R_0 – kuumtraadi takistus voolava õhu temperatuuril, T_m – kuumtraadi temperatuur, T_a – voolava õhu temperatuur (Li 2004, Payne 2001). Käesolevas punktis esitatakse leitud lõikesagedused sõltuvana kuumtraadi ja klaaspulga temperatuurist ilmutatud kujul. Kuna õhutemperatuur on konstantne (antud juhul 25°C), on ülekuumendamiskahjustuse väärtused traadi temperatuuriga üheselt seotud, ja seega lõikesagedust

sõltuvana ülekuumendamiskordajast kirjeldavat graafikut ei esitata.

Loodud mudel arvestab ühe sisendparameetrina kuumtraatanduri temperatuuri. Anduri temperatuuri muutmisel tuli samaaegselt muuta ka platinatraadi eritakistust ja klaaspulga soojusmahtuvust, et need vastaksid uuele muutunud temperatuurile. Klaaspulga diameetrit ei varieeritud, diameetriks oli reaalses anduris oleva klaaspulga diameeter (1 mm). Platinatraadi soojusmahtuvus loeti konstantseks, kuna antud klaaspulga diameetri juures on klaaspulga soojusmahtuvus platinatraadi soojusmahtuvusest vähemalt 1 suurusjärgu võrra suurem.

Uuritavas temperatuurivahemikus (175 – 400°C) sõltus platinatraadi eritakistus temperatuurist lineaarselt (Lide 2005); klaaspulga soojusmahtuvus sõltus temperatuurist antud vahemikus teise astme polünoomi järgi (Zotov 2002). Vt. ka joonist 16.

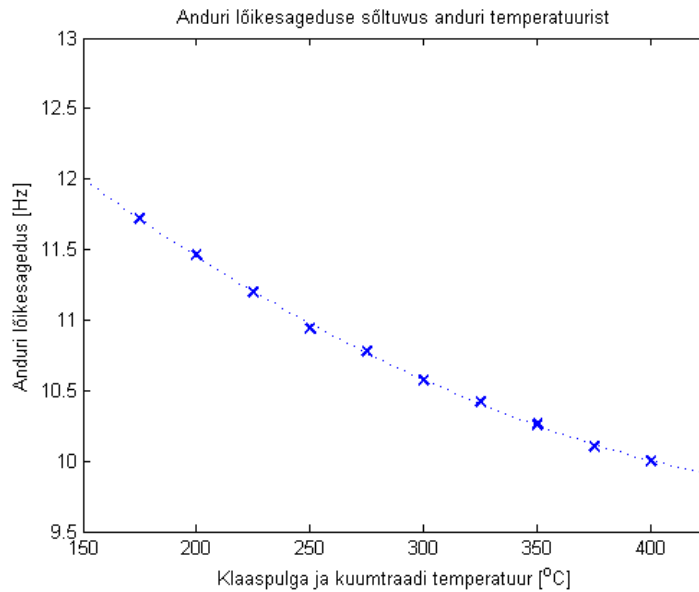


Joonis 16. a) Platinatraadi eritakistuse sõltuvus temperatuurist, b) klaaspulga erisoojuse sõltuvus temperatuurist.

Kasutades diskreetset õhuvooluimpulssi, määrati anduri sageduskoste lõikesagedused Bode diagrammi abil (vt. punkti 5.2). Modelleerimise tulemused on esitatud joonisel 17 ja lisa 3.

Modelleerimise tulemusena on näha, et lõikesagedus sõltub kuumtraadi temperatuurist vähesel määral. Tulemus ei ühti Khoo *et al* (1999) tulemustega, kuid sarnaneb Freymuth'i (1979) ning Morris'e ja Foss'i (2003) poolt esitatud andmetega, kes kõik uurisid klassikalise konstruktsiooniga kuumtraatandureid.

Erinevalt Khoo *et al* (1999) tulemustest, väheneb lõikesagedus temperatuuri tõusul. Seda saab seletada asjaoluga, et temperatuuri tõusul kasvab klaaspulga soojusmahtuvus, mis omakorda suurendab süsteemi inertsi.



Joonis 17. Mudeli löikesageduse sõltuvus klaaspulga ja kuumtraadi temperatuurist.

Uurides arvutustes kasutatavat mudelit, on näha, et selles ei võeta arvesse temperatuuri mittekonstantsust piki kuumtraati ennast. Erinevates artiklites on aga pikalt arutatud kuumtraadi ebaühtlase temperatuuri sõltuvust mõõdetava õhuvoolu kiirusest ja jõutud selgusele, et üks oluline osa kuumtraadi löikesageduse esinemiseks on temperatuurijaotuse muutumise kiirus võrreldes õhuvoolu muutumise kiirusega. Andur kalibreeritakse püsivoolukiiruste juures tasakaaluolekus ning mõõtmisvead tulevad sisse sellest, et temperatuurijaotus piki kuumtraati ei muutu kiiruse muutudes hetkeliselt, vaid teatud ajakonstandiga (Morris ja Foss 2003, Li *et al* 2004).

Autori hinnangul pole viimatimainitud asjaolu antud juhul oluline, kuna esiteks on klaaspulga soojusmahtuvus küllalt suur (ühe suurusjärgu võrra suurem kui pulga kütmiseks kasutatava traadi soojusmahtuvus), et hoida katse jooksul kuumtraatanduri temperatuuri jaotust piki klaaspulka konstantsena; teiseks on traadile keritud traadi pikkuse ja diameetri suhe $l/d = 15 \cdot 10^3$ palju suurem kui kirjanduses soovitatud väärtus 400 (Li *et al* 2004).

Mida suurem on traadi pikkuse ja diameetri suhe, seda väiksem osa soojuskaost antakse ära läbi anduri ja korpuse ühenduskoha, seda rohkem antakse soojust ära õhu voolamisel üle anduri ja seda ühtlasem on temperatuuri jaotus piki kuumtraati ennast; kui $l/d > 400$, on kuumtraadi temperatuur suures ulatuses ühtlane ja õhuvoolu kiiruse muutumisel muutub temperatuurijaotus vähe (Li *et al* 2004).

Temperatuurijaotuse konstantsust suurendab ka suhteliselt suur klaaspulga soojusmahtuvus.

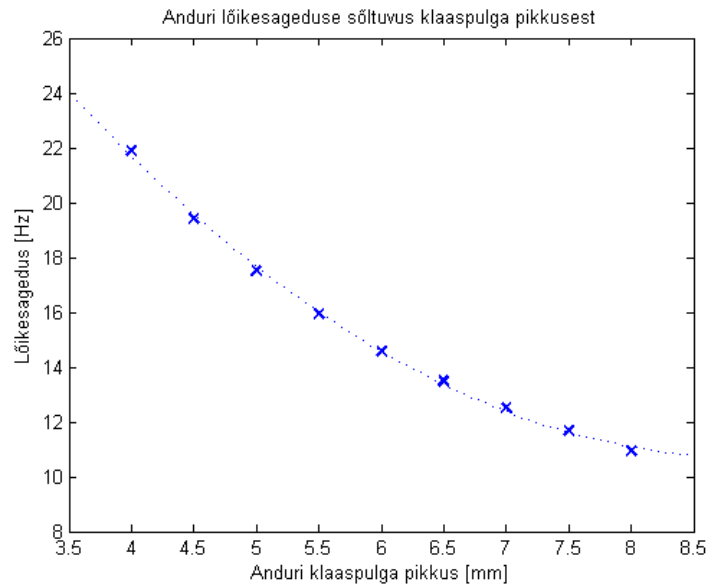
Käesolevas töös uuritava anduri korral on ülaltoodud tingimused kindlalt rahuldatud, seega kasutatav mudel on sobiv, uurimaks ülekuumendamisefaktori sõltuvust anduri temperatuurist. Saadud tulemused on õiged ka siis, kui temperatuuri täpset jaotust piki kuumtraati ei arvestata.

6.3 Lõikesageduse sõltuvus klaaspulga pikkusest, millele on keritud kuumtraat

Järgnevalt varieeriti klaaspulga pikkust, hoides pulgale keritud traadi keerdude arvu konstantsena, ja uuriti klaaspulga pikkuse mõju kuumtraatanduri lõikesagedusele. Klaaspulga lühendamisel väheneb klaaspulga mass ja seega selle soojusmahtuvus, mis muudab kuumtraatanduri ajakonstandi lühemaks. Lõikesagedust hinnati klaaspulga pikkuste juures 4 – 8 mm, sammuga 0,5 mm. Tulemused on ära toodud allpool oleval graafikul (vt. joonis 18) ja lisa 4.

Graafikult on näha, et klaaspulga pikkuse kahekordsel vähenemisel suureneb lõikesagedus 2,0 korda, väärtuseni 21,9 Hz. Võrreldes klaaspulga diameetri vähendamisega mõjutab selle lühendamine lõikesagedust vähem (vt. punkt 6.1). Selle põhjus on lihtne – klaaspulga mass ja soojusmahtuvus vähenevad diameetri vähendamisel kiiremini kui selle lühendamisel.

Klaaspulga edasisel lühendamisel suureneks kasutatava mudeli põhjal hinnanguid tehes lõikesagedus veelgi, kuid lähtudes paraboolsest õhuvooluprofiilist ja soojuskadudest läbi klaaspulga ja anduri korpuse ühenduskoha, ei pruugi olla enam täidetud kütva traadi ja ülessoojendatud klaaspulga temperatuurijaotuse konstantsuse tingimus erinevatel voolukiirustel ja seega klaaspulga edasisel lühendamisel on oht väljuda mudeli rakenduspiirkonnast.



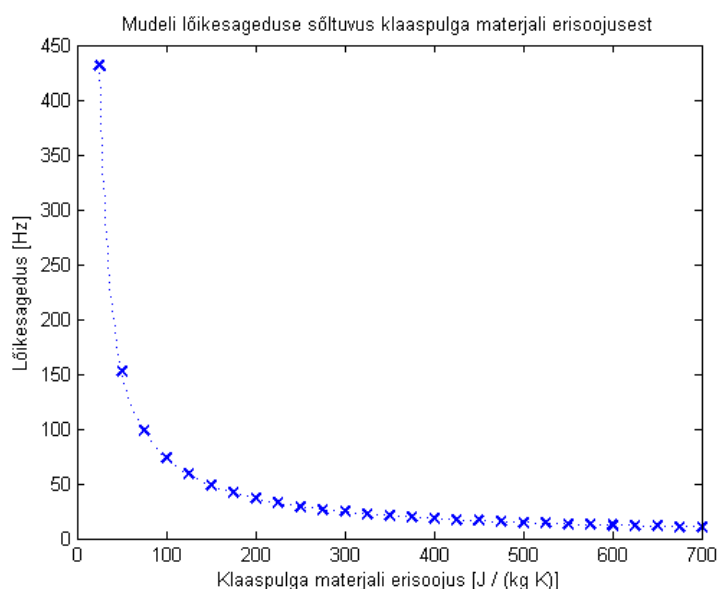
Joonis 18. Mudeli löikesageduse sõltuvus klaaspulga pikkusest.

Olgugi, et löikesageduse sõltuvus klaaspulga pikkusest on võrreldes sõltuvusega selle diameetrist väiksem, on see oluline seaduspära (kombineerides seda klaaspulga diameetri vähendamisega) anduri üldise sageduskoste edasiseks parandamiseks, et viia seda paremini vastavaks ATS standardiga. Optimeerimist kirjeldatakse edasistes peatükkides.

6.4 Löikesageduse sõltuvus klaaspulga materjali erisoojusest, millele on keritud kuumtraat

Varasemates punktides kirjeldatud modelleerimise oluliseks tulemuseks oli, et anduri löikesagedus sõltub kõige enam klaaspulga mõõtmetest, kuna need määravad otseselt klaaspulga massi ning seega ka soojusmahtuvuse. Seetõttu on oluline ka uurida, mil viisil mõjutab klaaspulga materjali soojusmahtuvus ilmutatud kujul anduri löikesagedust, et vajadusel valida klaaspulga asemel mõni muu materjal, ümber mille võiks kuumtraadi kerida. Lisaks erinevate erisoojuste sõltuvuse modelleerimisele uuritakse ka seda, milline on anduri löikesagedus siis, kui klaaspulka üldse mitte kasutada (kui kasutada ainult spiraalset kuumtraati).

Modelleerimisel kasutatakse reaalse anduri parameetreid ja varieeritakse ainult klaaspulga erisoojust. Ka sel juhul hinnatakse löikesagedust diskreetse õhuvoolu impulsi ning Bode diagrammi abil. Tulemused on esitatud joonisel 19 ja lisas 5.



Joonis 19. Mudeli lõikesageduse sõltuvus klaaspulga materjali erisoojusest.

Tulemused näitavad, et reaalses anduris kasutatava klaaspulga erisoojuse $670 \text{ J}/(\text{kg K})$ ümbruses sõltub lõikesagedus materjalist vähe. Lõikesageduse tõstmiseks 2 korda (väärtuseni u. 21 Hz) tuleb kasutada materjali, mille erisoojus on praegusest 2,1 korda väiksem – selles piirkonnas sõltub lõikesagedus erisoojusest lineaarselt. Erisoojuse vähendamisel alates erisoojuse väärtusest $200 \text{ J}/(\text{kg K})$ hakkab lõikesagedus suurenema üha kiiremini. Kui klaaspulka üldse mitte kasutada (erisoojuse $0 \text{ J}/(\text{kg K})$ korral), läheneb lõikesagedus oma nn. ideaalse väärtuseni ($> 400 \text{ Hz}$).

Tulemuste põhjal võiks järeldada, et anduri konstruktsiooni täiustamiseks tuleks eemaldada klaaspulk ja kasutada lihtsalt spiraalset traati, mis ulatuks anduri õhutoru tsentrini. See aga kahjustaks anduri kalibratsiooni stabiilsust, mis on tänu klaaspulga kasutamisele väga püsiv, anduri mõõtmisnäitajad ei halvene oluliselt isegi pärast aastaid tagasi tehtud kalibratsiooni (Plakk *et al* 1998, Peedo 2002, Mäger 2004). Selle tagab arvatavasti klaaspulga suur soojusmahtuvus, võrreldes kuumutatava traadi soojusjuhtivusega – hingamisuringute läbiviimisel andurile kogunevad osakesed ei suurenda oluliselt anduri soojusmahtuvust ning kalibratsioon on seega stabiilne. Samuti on klaaspulga kasutamisel anduri puhastamine lihtsam, andurile aja jooksul kogunenud osakesi on lihtsam maha pesta, kuna anduri koostamisel kattub ka kuumutatav traat ise õhukese klaasikihiga, anduri puhastamisel ei muutu kuumtraadi enda takistus.

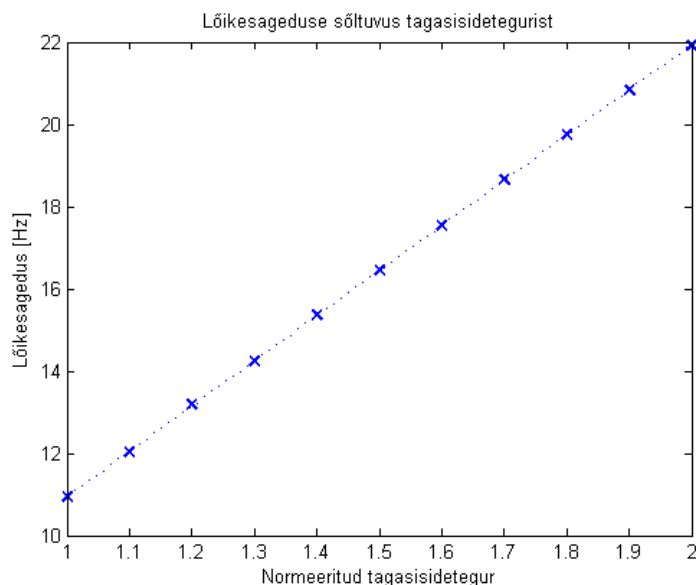
Küll aga tuleks kaaluda klaasi asemel mõne muu, väiksema erisoojusega materjali kasutamist, mille

ümber kerida kuumutatav traat. Vähendades kasutatava pulga materjali erisoojust 2 korda, suureneb löikesagedus samuti 2 korda. Pulga soojusmahtuvus jääks seejuures ikkagi ligikaudu 1 suurusjärgu võrra suuremaks kui traadi soojusmahtuvus. Seega, kalibratsiooni stabiilsus ei kahjustuks, kuna kogu kuumtraatanduri süsteemi (pulk ja traat) soojusmahtuvus oleks võrreldes aja jooksul andurile kogunevate osakeste soojusmahtuvusest ikkagi märksa suurem.

6.5 Lõikesageduse sõltuvus proportsionaalse tagasiside tegurist

On teada, et tagasisidestatud süsteemide sageduskoste sõltub sellest, kui suur on süsteemi tagasisidetegur e , kui palju võimendatakse süsteemi sisendisse tagasi juhivat veasignaali (antud juhul kuumtraadi temperatuuri erinevus etteantud temperatuurist); mida suurem on kasutatav proportsionaalse tagasiside tegur, seda kõrgem on süsteemi löikesagedus (Schwarz ja Oldham 1993).

Käesolevas punktis varieeriti süsteemi tagasisideteguri suurust (vt. lisa 1, süsteemi komponent „P võimendus“), modelleeriti kuumtraatanduri tööd ning mõõdeti süsteemi löikesagedust, nagu eelmistes punktideski. Tulemused on esitatud joonisel 20 (graafikuna) ja lisa 6 (tabelina).



Joonis 20. Mudeli löikesageduse sõltuvus tagasisidetegurist

Tulemuste esitamiseks kasutati normeeritud tagasisidetegurit, kuna tegeliku süsteemi ja mudeli tagasisidetegur ei pruugi ühtida ning hilisemate reaalsete optimeerimisalaste soovitude tegemisel on

normeeritud tagasisidetegur kasulikum kui absoluutne tagasisidetegur. Tagasisidetegur normeeriti järgmisel viisil: mudelis esialgselt kasutatav tagasisidetegur normeeriti väärtusele 1, ülejäänud tagasisidetegurid esitati arvu abil, mis näitas, mitu korda on tagasisidetegur esialgselt suurem.

Nagu oodatud (vt. joonis 20), sõltub löikesagedus tagasisidetegurist lineaarselt – tagasisideteguri kahekordsel suurendamisel suureneb ka löikesagedus kaks korda. Tagasisidetegurit on lihtsam muuta kui anduri muid parameetreid. Pakkudes vähemalt sama efektiivset löikesageduse suurendamise võimalust kui muude parameetrite muutmine, võiks seega tagasisideteguri suurendamine luua kergeima võimaluse löikesageduse suurendamiseks. Tuleb aga silmas pidada, et tagasisideteguri suurendamisel võimendatakse ka signaalis esinevaid mürasid. Järgmises punktis uuritaksegi, mil määral mõjutab müra signaali erinevate tagasisidetegurite juures.

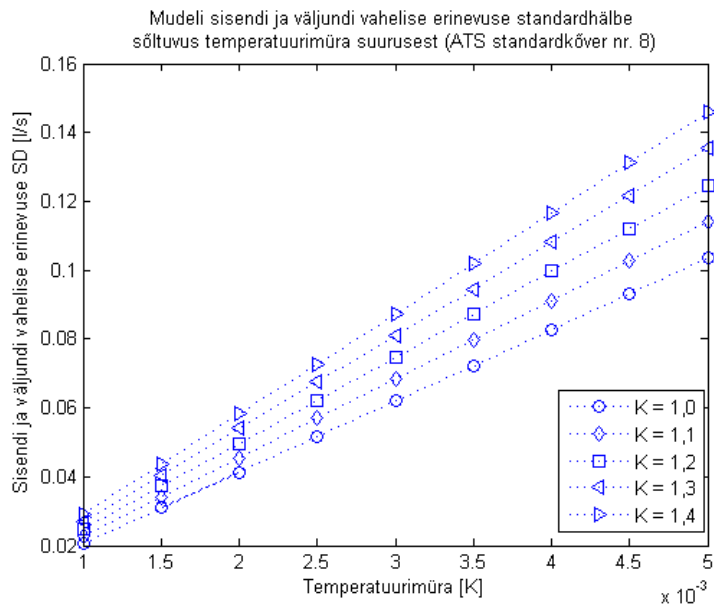
6.6 Müra mõju mudelile erinevate tagasisidetegurite juures

Eelmise punkti tulemused näitasid, et üks potentsiaalseid viise anduri löikesageduse suurendamiseks on suurendada anduri mõõtesüsteemi tagasisidetegurit. Selle tegemisel kasvab aga ka signaalis sisalduvate mürade osakaal tulemuste interpreteerimisel. Käesolevas punktis uuritaksegi, mil määral mõjutavad mürad signaalide mõõtmist erinevate tagasisidetegurite juures.

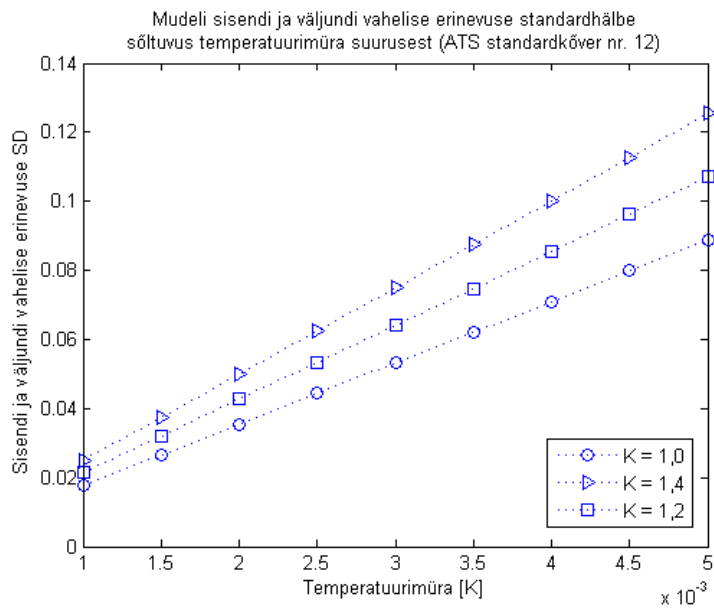
Müra modelleerimiseks kasutati juhuslikke temperatuurifluktuatsioone, mis liideti temperatuuri väärtusele pärast integreerimisblokki (vt. lisa 7). Temperatuurifluktuatsioonid olid juhuslikud, nende keskvärtus = 0 K, standardhälve = 0,001 – 0,005 K.

Sisendsignaalina kasutati ATS standardkõvera nr. 8 ja nr. 12. Müra mõju mõõtesüsteemile hinnati mudeli sisendsignaali ja väljundsignaali vaheliste erinevuste standardhålbega. Mudeli väljund (küttevõimsus) arvutati mahtkiiruseks punktis 4.2 leitud kalibratsioonikõvera alusel.

Tulemused on esitatud joonisel 21 ja 22. Standardkõvera nr. 8 sisend- ja väljundsignaalide graafikud on åra toodud lisa 8. Standardkõvera nr. 12 uurimisel saadud graafikud sarnanevad oma müra iseloomu mõttes lisa 8 toodud kõveratele, ainult et müra suurus oli väiksem. Seetõttu ei peetud vajalikuks neid tulemusi esitada.



Joonis 21. Mudeli sisend- ja väljundsignaali vahelise erinevuse standardhälbe sõltuvus temperatuurimüra suurusest (ATS standardkõver nr. 8).
K – normeeritud tagasisidetegur



Joonis 22. Mudeli sisend- ja väljundsignaali vahelise erinevuse standardhälbe sõltuvus temperatuurimüra suurusest (ATS standardkõver nr. 12).
K – normeeritud tagasisidetegur

Tulemused näitavad, et juba väikeste juhuslike temperatuurimürade lisandumisel mõõtesüsteemi (keskväärtus = 0, standardhälve = 0,001...0,005 K), suureneb sisend- ja väljundsignaali vahelise erinevuse standardhälve. Standardhälve on seda suurem, mida suurem on mudeli mõõtesüsteemi tagasisidetegur. Võrreldes lisas 7 esitatud müraga kõveraid ATS standardkõveraga nr. 8, selgub et väikse temperatuurimüra korral (0,001 K) jälgib süsteem standardkõvera kuju hästi, olgugi et väljundsignaali müra kasvab normeeritud tagasisideteguri kasvuga. Müra suurenemisel kaovad standardkõvera nr. 8 peensused müra sisse ära, eriti suuremate tagasisidetegurite korral.

ATS standardkõvera nr. 12 sisendi ja väljundi vaheline standardhälbe sõltuvus temperatuurimüra suurusest on mõnevõrra väiksem standardkõvera nr. 8 korral saadud tulemustest (standardkõvera nr 12. mõõtetulemuste signaalmüra suhe on suurem kui standardkõvera nr. 8 puhul). See on nii, kuna standardkõvera nr. 12 spektris ei esine nii suuri sagedusi kui standardkõvera nr. 8 spektris, mudel kirjeldab kõverat nr. 12 paremini, samuti on kõvera nr. 12 amplituud suurem kui kõvera nr. 8 amplituud. Tänu sellele on ka müra mõju mõõtetulemustele väiksem, kuid ka sel juhul näha selge trend, et mõõtesüsteemi normeeritud tagasisideteguri kasvul suureneb temperatuurimüra kasvamisel sisend- ja väljundsignaali vahelise erinevuse standardhälve .

7. TULEMUSTE ANALÜÜS. ANDURI KONSTRUKTSIOONI TÄIUSTAMINE

Võrreldes eksperimentaalselt määratud löikesagedust ATS standardkõverate nr. 8 ja nr. 12 spektrites sisalduvate sagedustega, võib arvata, et eksperimentaalset löikesagedust ei ole määratud õigesti. Eksperimentaalse löikesageduse väärta määramise võis põhjustada eksperimendi sooritamisel kasutatud sisendsignaali kohta võetud eeldused. Eeldati, et PWG6 poolt genereeritud õhuvool algab ajahetkel t_0 , kiireneb konstantse mahtkiirusega 0,1 sekundit ning jääb etteantud nivool konstantsele mahtkiirusele. On selge, et selliseid järske õhuvoolu muutusi on füüsikaliselt raske täpselt genereerida. Eeldati siiski, et hingamiskõverate generaator annab oma väljundis nimetatud vooluprofilile küllaldaselt sarnase õhuvoolu. Käesoleva töö tulemused näitavad, et see eeldus ei pidanud paika.

Siinkohal on oluline rõhutada, et hoolimata sellest on PWG6 asjakohane ja praegu ainus vahend õhuvoolude uurimisel ja spirograafide mõõtmistäpsuse hindamisel. Seadme poolt genereeritud standardkõverate sobivust näitavad ka Peedo tulemused (2002). Lineaarses režiimis väljakujunenud õhuvoolu nivoode stabiilsust ja vastavust etteantud väärtustele näitas minu bakalaureuse töö (Mäger 2004). Vead esinevad ainult lineaarse režiimi siirdeprotsessis.

Siinkohal püütakse hinnata, mis võib olla PWG6 töös lineaarses režiimis õhuvoolu kiiruse ebatäpsuse põhjuseks esimese 0,1 sekundi jooksul. Kuna seadme patenteerituse tõttu puudub info selle kohta, kuidas täpselt liigub lineaarses režiimis PWG6 kolb, võib õhuvoolu erinevuste põhjuste suhtes teha ainult oletusi.

On ilmne, et PWG6 pumba kolvis oleval õhul on mass ja seega ka liikumise inerts, lisaks sellele läheb õhk andurisse sisenemisel teatava takistuse ja võib oletada, et ebatäpsused võivad tuleneda kolvi liikumise tagasisidestamise vigadest. Teise võimalusena võib arvata, et kolvi liikumise tagasisidestus toimib õigesti, kuid õhuvoolu lineaarse kasvu ees on prioriteetsem jõuda võimalikult täpselt 0,1 sekundiga etteantud nivoole.

Seega, kuumtraatanduri sageduskoste uurimisel tuleks kasutada kaudseid meetodeid või suurema täpsusega etteantud sisendõhuvoole (Melikov ja Popiolek 2004). Teiseks võimaluseks on anduri modelleerimine. Äsjasaadud tulemuste valguses on selge, miks sageduskoste määramisel

kasutatakse ka otse mõõtesüsteemi antavaid elektripinget impulsse (Freymuth 1997), olgugi et õigem oleks kasutada reaalse mõõtesüsteemi sisendis õhuvooluimpulsse (Melikov ja Popiolek 2004, Morris ja Foss 2003).

Modelleerimistulemustest selgus, et antud töös uurimisobjektiks oleva kuumtraatanduri sageduskostet mõjutavad oluliselt klaaspulga parameetrid, ümber mille on keritud kuumutatav traat. Võrreldes kirjanduses saadud andmetega, on sellise anduri löikesagedus tunduvalt madalam kui traditsioonilise konstruktsiooniga anduri korral, kuid antud juhul ei olegi see nii oluline – hingamisuringutes vajalikud mõõdetavad sagedused ei ületa kindlasti 20 – 40 Hz piiri (Miller *et al* 2005). Nimetatud piir on SA-03 anduri konstruktsioonis vajalikke muudatusi tehes kergesti saavutatav.

Tulemused näitavad, et klaaspulga soojusmahtuvus on oluline parameeter süsteemi sagedusekoste löikesageduse määramisel. Klaaspulga soojusmahtuvuse vähendamiseks ja löikesageduse tõstmiseks on kolm erinevat moodust:

- 1) vähendada klaaspulga diameetrit;
- 2) vähendada klaaspulga pikkust;
- 3) vähendada klaaspulga materjali erisoojust kuumtraadi temperatuuri alandades;
- 4) valida klaaspulga asemele mõni muu väiksema erisoojusega materjal.

Kaks esimest viisi keskenduvad soojusmahtuvuse alandamisele klaaspulga massi vähendamise abil. Klaaspulga ruumala ja seega ka mass on võrdelised klaaspulga diameetri ruuduga, seega löikesageduse tõstmine nimetatud meetodil on efektiivne – diameetri vähendamisel 1,4 korda suureneb löikesagedus 2 korda, viies anduri juba üle ATS standardis nõutud piiri. Diameetri edasisel vähendamisel kasvab löikesagedus kiirelt kuni väärtuseni 400 Hz 0,2 mm diameetri juures (vt. punkti 6.1). Nii suurel löikesageduse tõstmisel pole aga mõtet, seda nii lähtuvalt ATS standardist kui ka anduri tööomaduste parandamise seisukohast. Esiteks on SA-03 mõõtesüsteemi signaali lugemi võtmise sagedus 100 Hz, mis teeb füüsikaliselt mõttekaks mõõta sagedusi kuni 50 Hz. Teiseks on oht klaaspulga diameetri nii suurel vähendamisel väljuda mudeli rakenduspiirkonnast ning mudeli loomisel kasutatud eeldused ei pruugi selles piirkonnas enam kehtida (vt. punkti 4.3).

Löikesageduse tõstmise teiseks võimaluseks on klaaspulga lühendamine. Klaaspulga pikkuse vähendamisel kasvab löikesagedus sarnaselt diameetri vähendamisel saadud tulemustega lineaarselt. Löikesageduse kahekordseks tõstmiseks peaks klaaspulka lühendama 2 korda. Seda

tehes ei ulatuks klaaspulk enam anduri õhuvoolukanali teljele ega integreeriks kokku tervet õhuvooluprofiili, mis on anduri üks eeliseid (Plakk *et al* 1998). Seega, löikesageduse tõstmine 20 hertsini ainult klaaspulga lühendamise teel ei ole soovitav.

Kolmas võimalus löikesageduse tõstmiseks on vähendada klaaspulga soojusmahtuvust selle temperatuuri alandamise teel. Kuna klaaspulga erisoojuse sõltuvus temperatuurist ei ole väga suur, õnnestub klaaspulga temperatuuri alandamisel suurendada löikesagedust vähe – anduri temperatuuri alandamisel 150 K võrra suureneb löikesagedus 10%. Käesolevas töös leitud seos on vastupidine kirjanduses märgitud üldisele seaduspärasusele löikesageduse ja kuumtraadi temperatuuri vahel (Khoo *et al* 1999), sarnanedes mõnevõrra mõningate erijuhtudega (Freymuth 1979, Morris ja Foss 2003). Seda erinevust saab selgitada, analüüsides kirjanduses esitatud seaduspärasuse põhjusi. Nimelt traditsioonilise konstruktsiooniga kuumtraatandurite korral sõltub kuumtraadi temperatuurijaotus voolava õhu kiirusest. See on nii, kuna traadi soojusmahtuvus võrreldes klaaspulgaga on väike, seega soojuskadude suhe, mis tekib soojuse kandumisest soojusjuhtivuse teel anduri korpusesse ja õhu voolamisel toimuval jahtumisel, sõltub õhuvoolu kiirusest (Morris ja Foss 2003). SA-03 kuumtraatanduri soojusmahtuvus on aga küllalt suur selleks, et katse jooksul anduri enda temperatuurijaotus ei muutuks, seega antud juhul prealveerib soojusmahtuvuse sõltuvus temperatuurist, temperatuurijaotuse enda muutumine ajas õhuvoolu kiiruse muutumise tõttu jääb tagaplaanile.

Neljas viis löikesageduse suurendamiseks oleks analüüsitulemuste põhjal pulgakese materjali erisoojuse vähendamine, selleks tuleks e. valida klaasi asemel materjaliks mõni muu, väiksema erisoojusega aine. Käesolevas anduris kasutatava anduri klaaspulga erisoojus on hinnanguliselt

$670 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$. Selle väärtuse ümbruses sõltub mudeli löikesagedus erisoojusest lineaarselt,

lõikesageduse kahekordseks tõstmiseks tuleks langetada erisoojust samuti 2 korda. Väiksemate erisoojuste juures on sõltuvus tugevam. Valides pulgakese materjali, tuleb silmas pidada mudeli piiranguid, materjali erisoojus ei tohiks olla väiksem kui vaja, ja seda, et anduri löikesagedus ei pea 100 Hz proovivõtmisageduse tõttu olema suurem kui 50 Hz. Lõikesageduse suurendamine erisoojuse alandamise teel üle 50 Hz ei oma praktilist väärtust, sest sellega ainult suurendatakse ohtu väljuda mudeli rakenduspiiridest ja samuti varitseb oht väljuda võimalikult suure soojusmahtuvusega anduri eelistest.

Veel üheks viisiks oleks täiustada anduri elektrilise mõõtesüsteemi tagasisidemehhanismi – suurendada tuleks tagasisidetegurit. Lõikesageduse kahekordseks suurendamiseks 20 Hz-ni tuleks proportsionaalset tagasisidetegurit suurendada 1,8 korda. Võiks ju arvata, et tagasisideteguri suurendamine olekski õige tee lõikesageduse suurendamiseks, mida võiks kasutada üksi, muid parameetreid muutmata. Kuid silmas tuleb pidada, et igas mõõtesüsteemis esinevad mürad, mida tagasisideteguri suurendamisel samuti võimendatakse. Seega oleks mõistlik kombineerida tagasisideteguri suurendamist lõikesageduse tõstmiste teiste viisidega.

Ülalkirjeldatud tulemusi aluseks võttes on võimalik parandada anduri dünaamikat. Kasutades praeguse klaaspulga materjali asemel, mille erisoojus on 670 J/(kg K), näiteks flintklaasi, mille erisoojus on 502 J/(kg K) (<http://www.tak2000.com/>), suureneb lõikesagedus modelleerimisel saadud tulemuste põhjal 1,3 korda, väärtuseni 14,69 Hz. See väärtus ületab ATS (1995) standardis nõutud lõikesagedust, kuid jääb Miller *et al* (2005) poolt soovitatud 20-hertsisele lõikesagedusele alla 1,36 korda.

Lõikesageduse 1,36 kordseks tõstmiseks piisab sellest, kui anduri klaaspulga diameetrit vähendada 0,14 mm võrra või kui lühendada klaaspulka 2,1 mm võrra või kui suurendada normeeritud tagasisidetegurit 1,36 korda. Kuumtraadi temperatuuri alandamisel lõikesagedust 1,36 korda ilma mudeli rakenduspiirkonnast väljumata tõsta ei õnnestu. Arvestades asjaoluga, et lühem klaaspulk ei integreeri õhuvoolu kogu õhuvoolukanali ristlõike ulatuses ja et tagasisideteguri suurendamisel kasvab ka müratase, oleks optimaalne lahendus lõikesageduse tõstmiseks muuta klaaspulga diameetrit 0,14 mm võrra väiksemaks. Selle tulemusena tõuseb lõikesagedus soovitatud 20 Hz-ni, mis on hingamisnäitajate mõõtmiseks kohane, samas jääb anduri soojusmahtuvus piisavalt suureks, et kontaminatsioonist põhjustatud hälbed ei mõjutaks ajas anduri kalibratsiooni ning et andur jääks füüsiliselt tugevaks, et puhastamise käigus mitte kahjustuda.

Kuumtraatanduri lõikesageduse suurendamiseks 20 hertsini tuleb käesolevalt kasutatava klaasi asemel, mille erisoojus on 670 J/(kg K), kasutada flintklaasi, mille soojusmahtuvus on 502 J/(kg K), ning vähendada klaaspulga diameetrit 0,14 mm võrra. Selle tulemusena suudab mõõtesüsteem mõõta kõiki erinevate ATS standardi hingamiskõverate nüansse (Miller *et al* 2005), säilitades võimalikult suurest soojusmahtuvusest tulenevad eelised.

Pärast konstruktsiooni täiustamist tuleb tähelepanu juhtida klaaspulga kasutamise veel ühele eelisele. Kui traditsiooniliste kuumtraatandurite lõikesagedus ja muud dünaamilised näitajad

sõltuvad olulisel määral traadi kontaminatsioonist (Moss 1992), mis omakorda nõuab sagedast kalibreerimist. Klaaspulga suur soojusmahtuvus tagab füüsikaliselt konstantsema temperatuuri jaotuse ja seega ka ajas vähem muutuvad mõõtetitingimused; andurile kogunevad osakesed ei mõjuta selle soojusmahtuvust olulisel määral. Samuti muudab klaaspulk andurit ennast tugevamaks, mis lihtsustab selle puhastamist.

Kuumtraatanduri löikesageduse suurendamiseks 20 hertsini tuleb käesolevalt kasutatava klaasi asemel, mille erisoojus on 670 J/(kg K) , kasutada näiteks flintklaasi, mille soojusmahtuvus on 502 J/(kg K) , ning vähendada klaaspulga diameetrit 0,14 mm võrra. Selle tulemusena suudab mõõtesüsteem mõõta kõiki erinevate ATS standardi hingamiskõverate nüansse (Miller *et al* 2005), säilitades võimalikult suurest soojusmahtuvusest tulenevad eelised.

8. KOKKUVÕTE

Käesoleva töö eesmärgiks on hinnata anduri konstruktsiooniliste näitajate mõju anduri sageduskostele ja selgitada välja otstarbekad anduri konstruktsiooni muudatused selle lõikesageduse tõstmiseks. Eesmärgi saavutamiseks püstitati järgmised ülesanded: uurida SA-03 originaalse konstruktsiooniga kuumtraatanduri sageduskostet; modelleerida SA-03 kuumtraatanduri dünaamikat ja siirdeprotsesse lähtuvalt selle geometriast ja muudest iseärasustest; võrrelda anduri mudeli ja anduri enda sageduskostet hingamisnäitajate õigeks esitamiseks vajaliku sageduskostega.

Eksperimentaalselt määratud anduri lõikesagedus osutus alahinnatuks PWG6 väljundis e. anduri sisendis oleva õhuvoolu määramatuse tõttu, mida võib lugeda olulisemaks Peedo (2002) ja Mägeri (2004) tööde tulemuste mõningast erinevust. Seetõttu kasutati anduri sageduskoste uurimiseks MATLAB 7.0 Simulink pakettis loodud mudelit. Mudeli parameetrid vastasid SA-03 kuumtraatanduri parameetritele ja olid muudetavad. Anduri klaaspulga soojusmahtuvus oli suurusjärgu võrra suurem kui kuumtraadi soojusmahtuvus, modelleerimise tulemused ei sõltunud traadi parameetritest ja neid tulemusi töös ei esitatud. Lõikesagedus sõltus anduri klaaspulga soojusmahtuvusest.

Anduri täiustamiseks ja lõikesageduse suurendamiseks praeguselt 10 hertsilt soovitatud 20 hertsini tuli klaaspulga soojusmahtuvust vähendada. Seda saab teha klaaspulga diameetri ja pikkuse vähendamisel, klaaspulga temperatuuri alandamisel ning praeguse klaaspulga materjali asendamisel materjaliga, mille erisoojus on praegusest väiksem.

Kuna lõikesageduse sõltuvus klaaspulga temperatuurist on nõrk ja klaaspulga pikkuse vähendamisel ei integreeritaks õhuvoolu terve kanali diameetri ulatuses, oleks optimaalseks lahenduseks lõikesageduse tõstmisel nõutud tasemele kasutada praegu traadi aluseks oleva materjali asemel madalama erisoojusega flintklaasi ja vähendada klaaspulga diameetrit 0,14 mm võrra.

Lõikesageduse suurendamisel säilivad anduri suurest soojusmahtuvusest tulevad eelised selle kalibratsiooni stabiilsuse, kontaminatsioonist sõltumatuse ja töökindluse osas.

Lõpetuseks sooviksin tänada oma juhendajaid P.-H. Kingiseppa ja J. Vedru selle magistritöö juhendamise eest ning K. Peedot ja P. Plakki abi eest katseandmete kogumisel.

9. SUMMARY

Hot-Wire transducer of SA-03 Spiro Analyzer. Modelling and Improving the Transducer's Construction

The objective of this master thesis was to evaluate transducer's frequency response depending on its construction and to make propositions for improving transducer's construction in order to increase its cut-off frequency and therefore accuracy. In order to do that, the tasks were to model SA-03 hot-wire transducer's dynamics and frequency response depending on its geometry and other characteristics; to compare model's and transducer's frequency response cut-off frequency with cut-off frequency required by ATS standard.

Transducer's cut-off frequency was evaluated based on experimental data. The cut-off frequency was underestimated due to uncertainties in PWG6 output air flows. The latter was also the reason why the results presented by Peedo (2002) and Mäger (2004) slightly differed. In order to overcome this problem SA-03 hot-wire transducer's model was created using MATLAB 7.0 Simulink toolbox. The model's parameters corresponded to transducer ones and were alterable. Heat capacity of the transducer's glass stick over which the hot-wire was coiled up was greater by one order of magnitude than heat capacity of the hot-wire itself. The modelling results were not depending on the hot-wire parameters and these results were not presented in this thesis. The cut-off frequency was dependent solely on heat capacity of the glass stick.

In order to improve construction of the transducer and to increase the cut-off frequency from 10 Hz to 20 Hz the heat capacity of the glass stick must be reduced. This can be done by means of decreasing the diameter of the glass stick; or by shortening it; or by lowering its temperature; or by changing the glass with some other material that has lower specific heat capacity.

Because the dependency between the cut-off frequency and the temperature of the glass-stick is weak; and because shorter glass stick would not integrate the air flow from the whole radius of the air flow channel the optimal solution to increase the cut-off frequency to the desired 20 Hz level is to use flint glass instead of the glass material used at present; and to reduce the diameter of the glass stick by 0,14 mm. These small changes provide sufficient increase of the cut-off frequency while keeping the transducer's heat capacity high and preserving its advantages in sense of its calibration stability, resistance to contamination and reliability.

10. KASUTATUD KIRJANDUS

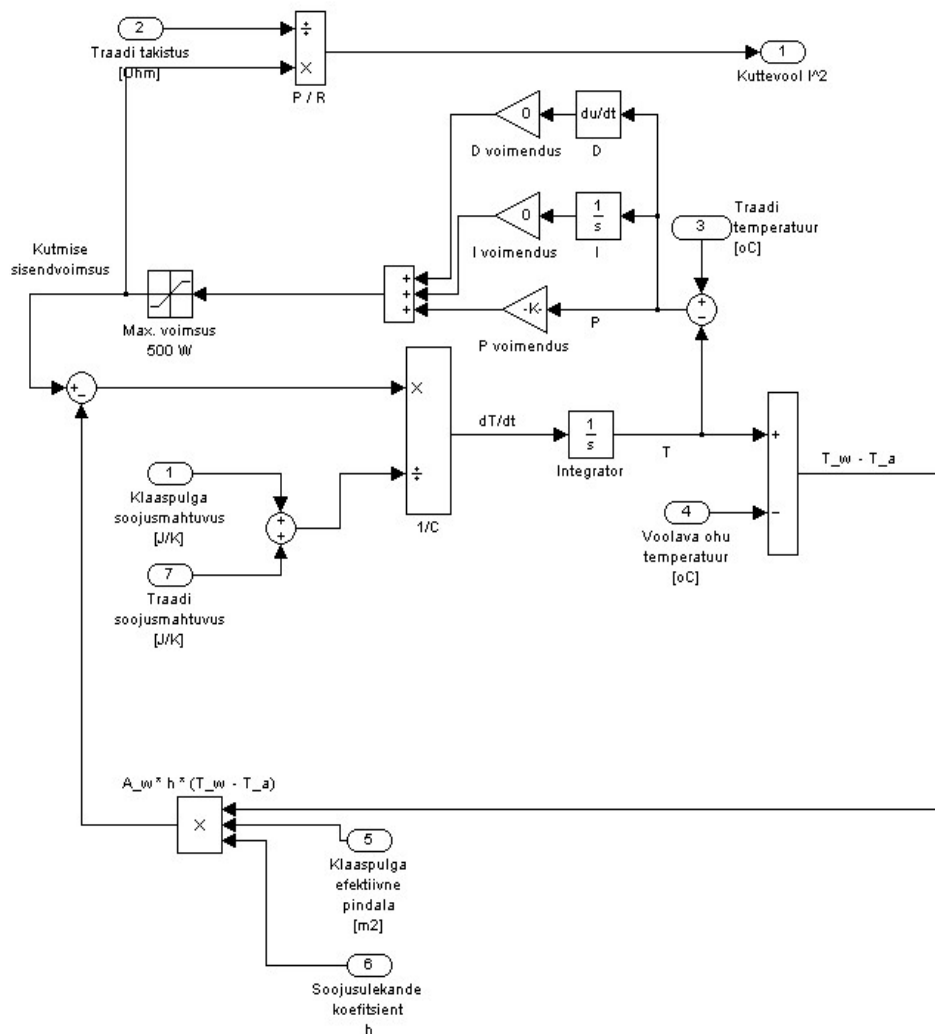
1. American Thoracic Society, „Standardization of Spirometry 1994 Update,“ *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 1995, **152**, 1107 – 1136
2. Bruun, H. H., *Hot-Wire Anemometry – Principles and Signal Analysis*, New-York: Oxford University Press, 1995
3. Cooper B.G., Madsen F., „Spirometry, The buyer’s guide,“ *Official journal of the European Respiratory Society*, 2000, **3**, 40 – 43
4. Freymuth, P., „Frequency response of and electronic testing for constant-temperature hot-wire anemometers,“ *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1977, **10**, 705 – 710
5. Freymuth, P., „Interpretations in the control theory of thermal anemometers,“ *Meas. Sci. Technol.*, 1997, **8**, 174 – 177
6. Freymuth, P., „On higher order dynamics of constant-temperature hot-wire anemometers,“ *Meas. Sci. Technol.*, 1998, **9**, 534 – 535
7. Hoyt *et al*, „Apparatus for testing pulmonary devices,“ *United States Patent*, 1995
8. K&K Associates, „Thermophysical Material Properties Database. Solids,“ <http://www.tak2000.com/> (aprill 2007).
9. Khoo, B. C., Chew, Y. T., Lim, C. P., Teo, C. J., „Dynamic response of a hot-wire anemometer. Part I: A marginally elevated hot-wire probe for near-wall velocity measurements,“ *Meas. Sci. Technol.*, 1998, **9**, 751 – 763
10. Khoo, B.C., Chew, Y. T., Teo, C. J., Lim, C. P., „The dynamic response of a hot-wire anemometer: Part III. Voltage-perturbation versus velocity-perturbation testing for near-wall measurements,“ *Meas. Sci. Technol.*, 1999, **10**, 152 – 169
11. Kingisepp, P.-H. (Toimetaja), *Füsioloogia praktikum I*, Tartu, 2003, 36 – 37
12. Kingisepp, P.-H., Loog, P.-T., Peedo, K., Pohjolainen, O., Plakk, P., „Evaluation of constant temperature hot wire airflow transducers using Pulmonary Waveform Generator,“ *kogumikus Biomedical Engineering. Proceedings of International Conference*, Kaunas University of Technology, 2006
13. Lemen, R. J., Gerdes, C. B., Wegmann, M. J., Perrin, K. J., „Frequency spectra of flow and volume events for forced vital capacity,“ *J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, 1982, **53(4)**, 977 – 984
14. Li, J. D., „Dynamic response of constant temperature hot-wire system in turbulence velocity measurement,“ *Meas. Sci. Technol.*, 2004, **15**, 1835 – 1847

15. Li, J. D., „Dynamic response of constant temperature hot-wire systems under various perturbations,“ *Meas. Sci. Technol.*, 2006, **17**, 2665 – 2675
16. Li, J. D., McKeon, B. J., Jiang, W., Morrison, J. F., Smits, A. J., „The response of hot wires in high Reynolds-number turbulent pipe flow,“ *Meas. Sci. Technol.*, 2004, **15**, 789 – 798
17. Lide, D. R., ed., *CRC Handbook of Chemistry and Physics, Internet Version 2005*, <<http://www.hbcpnetbase.com>>, CRC Press, Boca Raton, FL, 2005.
18. Melikov, A., Popiolek, Z., „Comparison of different methods for the determination of dynamic characteristics of low velocity thermal anemometers,“ *Meas. Sci. Technol.*, 2004, **15**, 1709 – 1715
19. Miller, M. R., Hankinson, J., Brusasco, V., Burgos, F., Casaburi, R., Coates, A., Crapo, R., Enright, P., van der Grinten, C. P. M., Gustafsson, P., Jensen, R., Johnson, D. C., MacIntyre, N., McKay, R., Navajas, D., Pedersen, O. F., Pellegrino, R., Viegi, G., Wanger, J., „Standardisation of spirometry,“ *Eur Respir J*, 2005, **26**, 319 – 338
20. Morris, S. C., Foss, J. F., „Transient thermal response of a hot-wire anemometer,“ *Meas. Sci. Technol.*, 2003, **14**, 251 – 259
21. Moss, R.W., *The effects of turbulence length scale on heat transfer*, doktoritöö, University of Oxford 1992
22. Mäger, I., *Spiroanalüsaator SA-03 kuumtraat anduri mõõtmistäpsuse iseloomustamine õhu püsivoolu standardkõverate jälgimisel: bakalaureusetöö rakendusfüüsikas*, juhendaja: P.-H. Kingisepp ; Tartu Ülikool 2004, Füüsika-Keemiateaduskond, Eksperimentaalfüüsika ja Tehnoloogia Instituut
23. Payne, S. J., „Chapter 4. Hot Wire Anemometry,“ doktoritöös *Unsteady Loss in a High Pressure Turbine Stage*, University of Oxford 2001, Trinity College, Department of Engineering Science
24. Peedo, K., *Spiroanalüsaatori SA-03 evalveerimine hingamiskõverate generaatori abil: magistritöö rakendusfüüsikas*; juhendaja: P.-H. Kingisepp ; Tartu Ülikool 2002, Füüsika-Keemiateaduskond, Eksperimentaalfüüsika ja Tehnoloogia Instituut
25. Plakk, P., Liik, P., Kingisepp P.-H., „Hot wire anemometry for spirometry,“ *Med. Biol. Eng. Comput.*, 1998, **36**, 17 – 21
26. PWG User Manual
27. Quanjer, P. H., Tammeling, G. J., Andersen, L. H., Cotes, J. E., Matthys, H., Nissardi, G., „Standardized lung function testing. Report working party,“ *Bull. Eur. Physiopathol. Respir.*, 1983 Jul, **19** Suppl 5, 1 – 95
28. Quanjer, P. H., Tammeling, G. J., Cotes, J. E., Pedersen, O. F., Peslin, R., Yernault, J. C., „Lung volumes and forced ventilatory flows. Report Working Party Standardization of Lung Function

Tests, European Community for Steel and Coal. Official Statement of the European Respiratory Society," *Eur Respir J Suppl*, 1993 Mar, **16**, 5 – 40

29. Sarma, G. R., „Transfer function analyses of the constant voltage anemometer," *Rev. Sci. Instrum.*, 1998, **69**, 2385 – 2381
30. Schwarz, S. E., Oldham, W. G., *Electrical Engineering: An Introduction. Second Edition*," Saunders College Publishing, Fort Worth, Philadelphia, San Diego, New York, Orlando, Austin, San Antonio, Toronto, Montreal, London, Sydney, Tokyo, 1993
31. Stainback, P. C., Nagabushana, K. A., „Review of Hot-Wire Anemometry Techniques and the Range of their Applicability for Various Flows," *Electronic Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 1997
32. Zotov, N., „Heat capacity of sodium silicate glasses: comparison of experiments with computer simulations," *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2002, **14**
33. Teo, C. J., Khoo, B. C., Chew, Y. T., „The dynamic response of a hot-wire anemometer: IV. Sine-wave voltage perturbation testing for near-wall hot-wire/film probes and the presence of low-high frequency response characteristics," *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**, 37 – 51
34. Webster, J.G., *Measurement, instrumentation and sensors handbook*, Chapman & HALL/CRCnetBASE, 1999, ptk 28.1 Nguyen, N.-T., „Thermal Mass Flow Sensors," 99 – 117; ptk 77 Basano L., Ottonello P., „Ventilation measurement," 1 – 15

Lisa 1. Kuumtraatanduri mudeli struktuur



Mudeli sisendparameetrid: soojusülekanne koefitsiendi h muutus ajas (kajastab õhuvoolu kiirust), klaaspulga efektiivne pindala A_w , voolava õhu temperatuur T_a , traadi soojusmahtuvus C_{Pt} , klaaspulga soojusmahtuvus C_{Kl} , traadi temperatuur T_w ja traadi takistus R_w . Mudeli väljundparameeter: küttevõimsus P .

Märkus 1: Küttevõimsus seotakse õhuvoolu kiirusega punktis 4.2 leitud kalibratsioonikõvera abil.

Märkus 2: Mudeli sisendparameetrid arvutatakse punktis 4 kirjeldatud viisil klaaspulga diameetri, pikkuse, tiheduse, erisoojuse abil; klaaspulgale keritud traadi keerdude arvu alusel; traadi diameetri, tiheduse, takistuse, temperatuuri ja erisoojuse abil; voolava õhu temperatuuri abil; õhu viskoossuse, soojusjuhtivuse ja Prandtl'i numbril abil.

Märkus 3: Mudeli komponentide tähistused vastavad MATLAB 7.0 simulatsioonipaketi Simulink tähistustele.

Lisa 2. Mudeli lõikesageduse sõltuvus klaaspulga diameetrist

Klaaspulga diameeter [mm]	Mudeli sageduskoste lõikesagedus [Hz]
0,20	405,90
0,30	127,03
0,40	69,17
0,50	43,91
0,60	30,42
0,70	22,34
0,80	17,14
0,90	13,54
1,00	10,94
1,10	9,06
1,20	7,60

Lisa 3. Mudeli löikesageduse sõltuvus klaaspulga ja kuumtraadi temperatuurist

Klaaspulga ja kuumtraadi temperatuur [°C]	Mudeli sageduskoste löikesagedus [Hz]
175	11,72
200	11,46
225	11,20
250	10,94
275	10,78
300	10,57
325	10,42
350	10,26
375	10,10
400	10,00

Lisa 4. Mudeli lõikesageduse sõltuvus klaaspulga pikkusest

Anduri klaaspulga pikkus [mm]	Mudeli sageduskoste lõikesagedus [Hz]
4,0	21,87
4,5	19,43
5,0	17,50
5,5	15,94
6,0	14,58
6,5	13,49
7,0	12,50
7,5	11,67
8,0	10,94

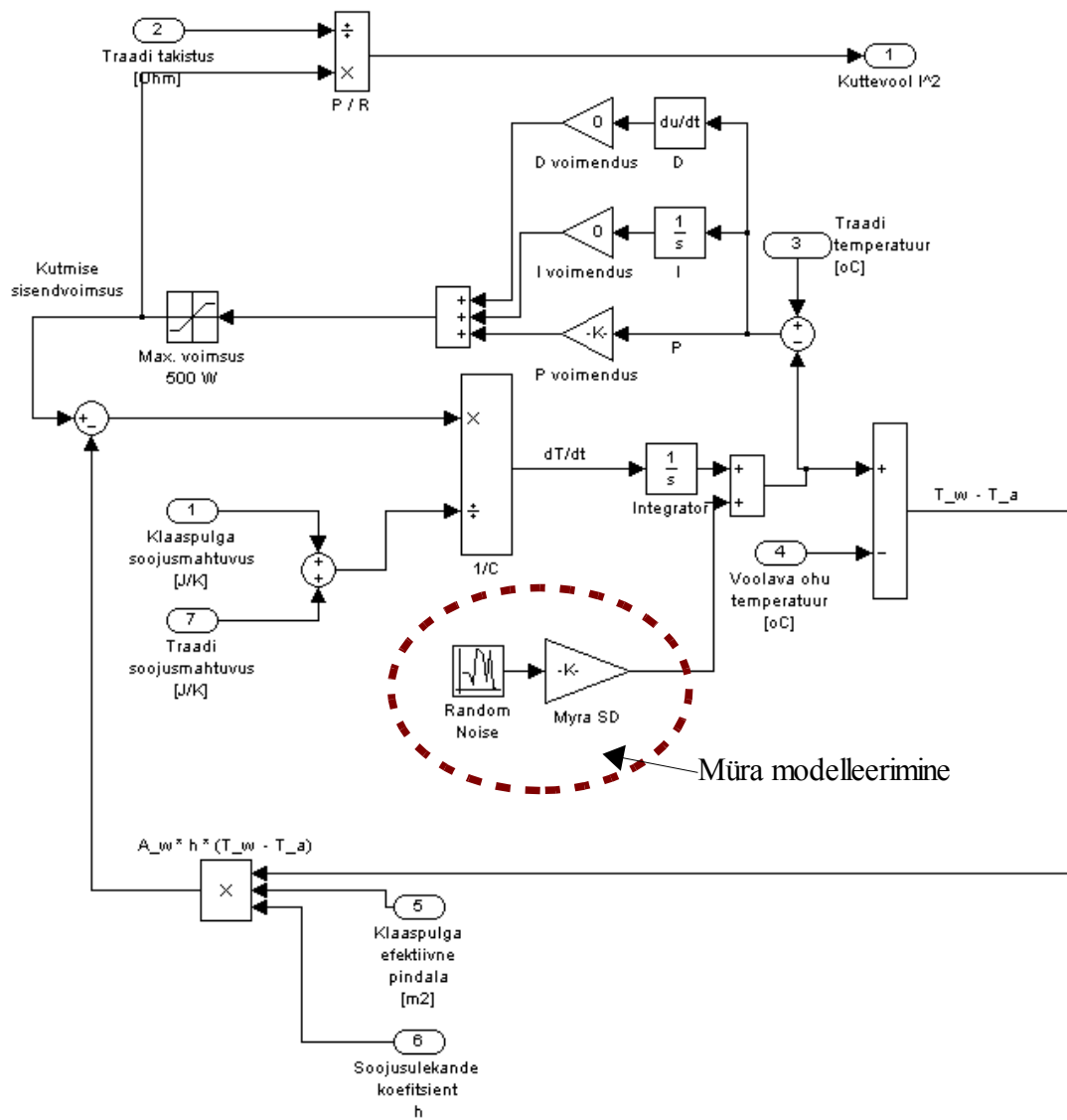
Lisa 5. Mudeli lõikesageduse sõltuvus klaaspulga materjali erisoojusest

Klaaspulga materjali erisoojus [J / (kg K)]	Mudeli sageduskoste lõikesagedus [Hz]
25	430,94
50	152,66
75	98,80
100	73,49
125	58,64
150	48,80
175	41,82
200	36,61
225	32,55
250	29,27
275	26,61
300	24,43
325	22,55
350	20,94
375	19,53
400	18,33
425	17,24
450	16,30
475	15,42
500	14,69
525	13,96
550	13,33
575	12,76
600	12,24
625	11,77
650	11,30
675	10,88
700	10,47

Lisa 6. Mudeli lõikesageduse sõltuvus mudeli tagasisidetegurist

Normeeritud tagasisidetegur	Mudeli sageduskoste lõikesagedus [Hz]
1,0	10,94
1,1	12,03
1,2	13,18
1,3	14,24
1,4	15,36
1,5	16,46
1,6	17,55
1,7	18,65
1,8	19,74
1,9	20,83
2,0	21,93

Lisa 7. Müra lisamine kuumtraatanduri mudelisse



Märkus: Mudeli tähistused vastavad lisa 1 tähistustele.

Lisa 8. ATS standardkõvera nr. 8 mudeli poolt mõõdetud signaal erinevate temperatuurimürade ja tagasisidetegurite juures

