

Magistrsko delo

Kandidat: Mitja Vardjan, univ. dipl. inž. el.

Naslov:

Nadgradnja elektronike in programske opreme merilnika trdnih delcev v ozračju

Besedilo:

Črni ogljik je v obliki trdnih delcev v zraku onesnaževalec, ki neposredno škoduje zdravju, in zaradi močne optične absorpcije in sipanja vpliva na optične in termične razmere v atmosferi. Eden od pogosteje uporabljenih instrumentov za optično merjenje črnega ogljika je aethalometer, ki meri slabljenje svetlobe pri prehodu skozi sito, na katerem se nabirajo delci, in na podlagi izmerjene vrednosti izračuna ekvivalent masne koncentracije delcev črnega ogljika v ozračju.

Predstavite problematiko merjenja trdnih delcev v ozračju. Opišite delovanje aethalometra, analizirajte njegovo merilno negotovost in predlagajte izboljšave za večjo točnost in hitrost meritev. S tem namenom nadgradite obstoječe elektronsko detektorsko vezje in izdelajte programsko opremo za upravljanje celotnega instrumenta, ki bo omogočala povezljivost navzven po vmesniku Ethernet.

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

Mitja Vardjan

**NADGRADNJA ELEKTRONIKE IN PROGRAMSKE OPREME
MERILNIKA TRDNIH DELCEV V OZRAČJU**

MAGISTRSKO DELO

Mentor: prof. dr. Andrej Žemva

Ljubljana, 2008

ZAHVALA

Najlepše se zahvaljujem mentorju prof. dr. Andreju Žemvi za mentorstvo in pomoč pri izdelavi magistrskega dela. Zahvaljujem se Ministrstvu za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo za financiranje podiplomskega raziskovalnega usposabljanja po pogodbi št. 3211-05-000548 in podjetju Optotek za podporo pri študiju. Prav tako se zahvaljujem mentorju za mladega raziskovalca iz gospodarstva dr. Alexisu Zrimcu, nekdanjima sodelavcema dr. Griši Močniku in mag. Damjanu Zadniku, vodji razvoja v podjetju mag. Matjažu Zalarju, nekdanjemu partnerju podjetja in izumitelju aethalometra dr. Anthony D. A. Hansen-u, ter avtorju dosedanje programske opreme aethalometra mag. Andreju Nagodetu.

Številnim podpornikom in razvijalcem prostega programja (angl. free software) po vsem svetu se zahvaljujem za mnoge kakovostne projekte, ki so prosto dostopni vsakomur. Kot uporabljene primere programja naj omenim BusyBox, Comedi, GNU gettext in Gnuplot.

Zahvala gre tudi staršem, ki sta mi vseskozi pomagala, da sem se lahko bolj posvečal delu in študiju.

Kazalo

1. Povzetek.....	1
2. Uvod.....	5
2.1 Metode merjenja delcev.....	6
2.2 Etaloni in referenčne metode.....	11
3. Predstavitev aethalometra.....	13
3.1 Princip delovanja in fizikalno ozadje.....	13
3.2 Kalibracija.....	17
3.3 Merilna negotovost.....	18
3.3.1 Izvori negotovosti.....	18
3.3.2 Eksperiment v temperaturni komori.....	21
3.3.3 Skupna negotovost.....	25
4. Elektronika.....	30
4.1 Detektorsko vezje.....	31
4.1.1 Opis obstoječega vezja.....	31
4.1.2 Razvoj novega vezja.....	32
4.1.2.1 A/D pretvorba.....	33
4.1.2.2 Napajalne in referenčne napetosti.....	41
4.1.2.3 Multipleksiranje signalov.....	42
4.2 Računalnik.....	46
5. Programska oprema.....	47
5.1 Vgrajeni Linux.....	48
5.2 Program za delovanje aethalometra.....	52
5.2.1 Dnevniška sporočila.....	55
5.2.2 Delo z datotekami in konfiguracija programa.....	57
5.2.2.1 Splošno delo z datotečnimi sistemi in datotekami.....	57
5.2.2.2 Konfiguracija programa.....	58
5.2.2.3 Stanje naprave.....	60
5.2.2.4 Spletni vmesnik.....	60
5.2.3 Zaslona in tipkovnica.....	62
5.2.4 Digitalni vhodi in izhodi.....	64
5.2.5 Datum in čas.....	68
5.2.6 Zaklep programa.....	69
5.2.7 Internacionalizacija.....	70
5.2.8 Meni in upravljanje na višjem nivoju.....	73
5.2.9 Prevajanje in namestitvev programa.....	76
6. Rezultati in diskusija.....	78
6.1 Primerjava A/D pretvornikov DDC101 in DDC112.....	78
6.2 A/D pretvornik ADS8341.....	86
6.3 Stabilizacija napajalnih in referenčnih napetosti.....	87
6.4 Spletni vmesnik.....	87
7. Zaključek.....	89
8. Priloge.....	90
8.1 Dnevniški izpis.....	90
8.2 Datoteka s konfiguracijo programa za delovanje aethalometra.....	92
9. Seznam uporabljenih virov.....	98
10. Izjava o avtorstvu.....	103

Kazalo slik

Slika 1: Merjenje z optično refleksijo.....	8
Slika 2: Merjenje z optično transmisijo.....	9
Slika 3: Sipanje svetlobe [17].....	9
Slika 4: Optična metoda s preletom delcev.....	10
Slika 5: Shema aethalometra.....	13
Slika 6: Optični princip aethalometra.....	14
Slika 7: Aethalometer (foto: Mitja Vardjan).....	16
Slika 8: Notranjost aethalometra (foto: Mitja Vardjan).....	17
Slika 9: Enodnevna meritev s časovno bazo $T = 5$ minut.....	19
Slika 10: Test temperaturne občutljivosti: temperatura.....	23
Slika 11: Test temperaturne občutljivosti: signali na fotodiodah.....	23
Slika 12: Test temperaturne občutljivosti: difference signalov na fotodiodah.....	24
Slika 13: Test temperaturne občutljivosti: izmerjena koncentracija BC.....	24
Slika 14: Bločna shema elektronike aethalometra.....	30
Slika 15: A/D pretvorba v starem detektorskem vezju.....	32
Slika 16: Časovni potek meritev optičnih signalov s starim detektorskim vezjem.....	32
Slika 17: A/D pretvornik Burr-Brown DDC112U (SO ohišje) [28, stran 4].....	34
Slika 18: Branje podatkov iz DDC112 [28, stran 21].....	35
Slika 19: Nestalen in stalen način delovanja DDC112 [28, stran 19].....	37
Slika 20: Shema vezja za A/D pretvornik DDC112.....	38
Slika 21: Prenos podatkov pri vsakem branju iz ADS8341.....	39
Slika 22: A/D pretvornik Texas Instruments ADS8341 [31, stran 11].....	39
Slika 23: Opis priključkov ADS8341 [31, stran 2].....	40
Slika 24: Signali med branjem iz ADS8341 pri notranji uri [31, stran 14].....	40
Slika 25: Stabilizacija napajanja detektorskega vezja.....	41
Slika 26: Referenčna napetost za DDC112 [28, stran 11].....	41
Slika 27: Multiplekser SN54F157A.....	42
Slika 28: Demultiplekser SN74S139A.....	43
Slika 29: Glavni del detektorskega vezja.....	45
Slika 30: Shema celotne programske opreme.....	47
Slika 31: Razvojno okolje KDevelop.....	53
Slika 32: Sledenje različicam s Subversion in grafičnim pregledovalnikom Kompare.....	54
Slika 33: Modularizacija programske kode.....	55
Slika 34: Hierarhija konfiguracije programa.....	59
Slika 35: Spletni vmesnik.....	61
Slika 36: Dostop do DIO.....	64
Slika 37: Ustvarjanje ključa za zaklep programa.....	69
Slika 38: Lokalizacija z GNU gettext.....	72
Slika 39: Lokalizacija programa s KBabel.....	73
Slika 40: Delovanje glavne funkcije programa.....	74
Slika 41: Dokumentacija strukture za meritve, ustvarjena z Doxygen.....	75
Slika 42: Prototipa novega aethalometra z zaslonom Ampire (foto: mag. Damjan Zadnik).....	78
Slika 43: Meritve z DDC101 v temi.....	79
Slika 44: Meritve z DDC112 v temi.....	80
Slika 45: Meritve z DDC101 pri prižgani IR LED diodi.....	81
Slika 46: Meritve z DDC112 pri prižgani IR LED diodi.....	82
Slika 47: Meritve z DDC101 pri prižgani UV LED diodi.....	83
Slika 48: Meritve z DDC112 pri prižgani UV LED diodi.....	84

Kazalo tabel

Tabela 1: Kalibracija $\sigma(\lambda)$ [6, stran 40].....	18
Tabela 2: Posamezne relativne standardne negotovosti za konkreten primer.....	28
Tabela 3: Primerjava A/D pretvornikov.....	33
Tabela 4: Kontrolni bajt A/D pretvornika ADS8341.....	39
Tabela 5: Kontrolni bajt in izbira kanala med nediferencialnimi vhodi ADS8341.....	40
Tabela 6: Združevanje digitalnih signalov A/D pretvornikov.....	42
Tabela 7: Pravilnostna tabela multiplekserja SN54F157A.....	43
Tabela 8: Pravilnostna tabela demultiplekserja SN74S139A.....	44
Tabela 9: Stopnje kritičnosti za dnevniški izpis.....	56
Tabela 10: Komunikacijski protokol za zaslon Ampire.....	64
Tabela 11: Razpored digitalnih linij na DIO vmesniku.....	67
Tabela 12: DIO kanali za A/D pretvornike.....	68
Tabela 13: Varianca signala iz A/D pretvornika za NDDC101 = 10, NDDC112 = 120.....	85
Tabela 14: Varianca signala iz A/D pretvornika za NDDC101 = 38, NDDC112 = 240.....	85
Tabela 15: Faktor izboljšave DDC112 glede na DDC101.....	86
Tabela 16: Šum napajalnih napetosti.....	87
Tabela 17: Šum referenčnih napetosti.....	87

SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV

ADEOS – Adaptive Domain Environment for Operating Systems

ARSO – Agencija Republike Slovenije za okolje

ATN – Attenuation

BC – Black Carbon

CF – Compact Flash

COMEDI – Control and Measurement Device Interface

CR – Carriage Return

CRC – Cyclic Redundancy Check

CSV – Comma Separated Values

DIO – Digital Input/Output

EC – Elemental Carbon

EPA – U.S. Environmental Protection Agency

EPIC – Embedded Platform for Industrial Computing

FTP – File Transfer Protocol

GPIO – General Purpose Input/Output

HTML – Hypertext Markup Language

HTTP – Hypertext Transfer Protocol

IDE – Integrated Drive Electronics

IP – Internet Protocol

KDE – K Desktop Environment

LAN – Local Area Network

LF – Line Feed

LIBS – Laser Induced Breakdown Spectroscopy

MAAP – Multi Angle Absorption Photometer

NAAQS – National Ambient Air Quality Standards

OC – Optical Carbon

PAH – Polycyclic Aromatic Hydrocarbon

PCR – Polymerase Chain Reaction

PDIP – Plastic Dual In-line Package

PM – Particulate Matter

PNG – Portable Network Graphics

PSAP – Particle Soot Absorption Photometer

QFN – Quad Flat No Leads

RTAI – Real-Time Application Interface

SDL – Simple DirectMedia Layer

SMD – Surface Mounted Device

SO – Small Outline Plastic Package

SSOP – Shrink Small-Outline Package

TELNET – Telecommunication Network

TSP – Total Suspended Particles

UTF-8 – 8-bit Universal Character Set/Unicode Transformation Format

VFAT – VxD File Allocation Table, Virtual File Allocation Table

VGA – Video Graphics Array

XML – Extensible Markup Language

1. Povzetek

Trdni delci v zraku so onesnaževalec, ki neposredno škoduje človeškemu zdravju in vpliva na atmosferske lastnosti. Večina sodobnih in hitrih metod merjenja temelji na optičnih lastnostih delcev. Pri teh metodah je črni ogljik operativno definiran kot vrsta delcev, ki močno absorbira svetlobo. Na področju merjenja delcev, kjer glede referenčnih metod in kalibracij ni splošnega soglasja, je eden najpogosteje uporabljenih instrumentov aethalometer, ki po določenem času nalaganja delcev na sito izmeri optično slabljenje skozi sito in iz časovnega prirastka slabljenja izračuna ekvivalent masne koncentracije delcev črnega ogljika.

Prvi cilj magistrske naloge je analiza merilne negotovosti ter izboljšava točnosti in hitrosti meritev aethalometra. Prispevki k skupni merilni negotovosti so razdeljeni v tri skupine: sistematske napake, ki jih je možno enostavno kompenzirati; sistematske napake, ki jih zaradi pomanjkanja širšega soglasja strokovne skupnosti glede referenčnih metod in kalibracij ni možno ali ni smiselno kompenzirati; ter naključne napake. K naključnim napakam največ prispeva slabljenje svetlobe, ki se izračuna iz meritev električnih tokov skozi dve fotodiodi.

Zasnovana je bila nova različica merilnega vezja, ki omogoča večjo hitrost in točnost meritve slabljenja svetlobe. Ključna izboljšava je zamenjava eno-kanalnega analogno-digitalnega pretvornika za branje fotodiodnih tokov z dvo-kanalnim, ki meri oba kanala sočasno. Tako motilne veličine vplivajo na meritve obeh fotodiodnih tokov podobno in se v izračunu optičnega slabljenja kompenzirajo. Posledično se zmanjša merilna negotovost koncentracije črnega ogljika pri enakih ostalih pogojih oziroma se zmanjša čas meritve pri enaki negotovosti. Dvo-kanalni A/D pretvornik je z obema fotodiodama povezan neposredno in ne preko analognega stikala kot v prejšnji različici merilnega vezja, zato se čas meritve dodatno zmanjša za čas preklopa in stabilizacije po preklopu stikala. To najbolj pride do izraza pri izjemno majhnih časih meritve (reda nekaj sekund). Dodatna izboljšava je nov vgrajeni računalnik, ki izpolnjuje sodobne zahteve po povezljivosti.

Drugi cilj magistrske naloge je izgradnja in namestitvev posebej prilagojenega vgrajenega Linuxa ter programiranje aplikacije za neposredno komunikacijo z vsemi segmenti instrumenta, med katerimi so A/D in D/A pretvorniki na merilnem vezju, multiplekser za izbiro vira svetlobe, elektronika za samodejno menjavo sita in vmesnik do vgrajenega

alfanumeričnega zaslona in vgrajene tipkovnice. Program preko dodatnih aplikacij, kot so hotplug, tthttpd, vsftpd in BlueZ, komunicira tudi preko USB, Ethernet in Bluetooth povezav. Program je napisan v programskem jeziku C in je razdeljen na smiselne module, ki so medsebojno dovolj neodvisni, da je možno obravnavati in spreminjati vsakega posebej. V primeru zamenjave določene strojne opreme se, v kolikor sprememba programskih nastavitev in makrojev ne zadostuje, zamenja samo ustrezni programski modul.

Ključne besede: Črni ogljik, optične metode merjenja delcev, aethalometer, merilna negotovost, merilno vezje, digitalni vhodi-izhodi, vgrajeni Linux, programski jezik C.

Abstract

Particulate matter pollutes our environment, adversely affects human health and influences atmospheric properties. Most of the modern and quick measurement methods are based on optical properties of particles. Black Carbon (BC) is operationally defined as strongly optically absorptive particulate matter and is measured by some optical methods. In this area where no definitions, calibrations and reference methods are generally accepted, aethalometer is one of the most often used instruments for measuring BC concentration. It samples particles on a filter tape, calculates attenuation of light passing through the filter and calculates equivalent of BC mass concentration from speed of attenuation increase.

This M. Sc. thesis analyzes aethalometer's measurement uncertainty and suggests steps to improve measurement accuracy and speed. Errors that add to combined standard uncertainty are grouped into: systematic errors that can be easily compensated; systematic errors compensation of which is either too hard or pointless due to the lack of common agreement over reference methods and calibrations; and random errors. The random errors arise above all from the optical attenuation which is calculated from measurements of electric currents through two photodiodes.

To accomplish greater speed and accuracy of attenuation measurement, the detector circuit was partially redesigned. The essential change was the replacement of 1-channel A/D converter with a 2-channel A/D converter that samples both channels simultaneously. This way various disturbances in the circuit affect measurements of both photodiode currents in a similar way and are compensated when attenuation is calculated. This results either in decreased measurement uncertainty of BC concentration at unchanged measurement conditions, or in decreased time of measurement with same uncertainty. The photodiodes are directly connected to the 2-channel A/D converter and not through an analog switch as was the case with previous detector circuit version. This additionally shortens measurement time by the length of stabilization period after switching the source for A/D converter's analog input. This effect is the most obvious when the time of BC concentration measurement is set extremely short (a few seconds). Also, a new embedded computer was chosen to meet the modern needs for connectivity.

Another goal of this work is to configure, build and install embedded Linux, and to program an application to directly communicate to all components of aethalometer, including A/D and

D/A converters in the detector circuit, multiplexer for light source selection, electronics for automated filter tape advance, and interface to built-in keyboard and alphanumeric screen. The application communicates through USB, Ethernet and Bluetooth by using other applications like hotplug, tftpd, vsftpd and BlueZ. The application is programmed in the C programming language and is modularized. The modules are independent enough to be analyzed or changed separately from the rest of the source code. If a piece of hardware is to be replaced in future and the changes in program configuration and macros cannot compensate for the hardware upgrade, only the appropriate module needs to be changed.

Key words: Black Carbon, optical measurement methods for particulate matter, aethalometer, measurement uncertainty, detector circuit board, digital input/output, embedded Linux, C programming language.

2. Uvod

Snovi, s katerimi je onesnažen zrak, v grobem delimo na pline in aerosole. Slednje nadalje delimo na razpršene kapljevine in trdne delce (PM, particulate matter), od katerih trdni delci prevladujejo tako po razširjenosti, masi, kot po škodljivem učinku na zdravje in jim je zato v strokovni javnosti posvečeno največ pozornosti. Trdne delce nadalje klasificiramo:

- po biološki sestavi na nežive delce, bakterije, viruse, glive in odpadle delce večceličnih organizmov (npr. odmrli delci kože, dlaka),
- po kemijski sestavi na ogljik, organske spojine (npr. policiklični aromatski ogljikovodiki ali PAH – polycyclic aromatic hydrocarbons) in anorganske snovi (npr. težke kovine),
- po velikosti, glede na aerodinamični premer¹, na večje od 10 μm , grobe (coarse particles, 2,5-10 μm), fine (fine particles, do 2,5 μm) in ultrafine (ultrafine particles, do 0,1 μm). Za delce z aerodinamičnim premerom, manjšim ali enakim X μm , je v uporabi oznaka PMX. Tako fine delce označujemo s PM2.5. Delce vseh velikosti skupaj označujemo s TSP (total suspended particles).

Manjši delci prodrejo globlje v dihalno pot [1], fini delci (PM2.5) prodrejo v pljuča in so zdravju ljudi bolj škodljivi kot večji delci [2]. Škodljivost manjših delcev je zaradi večje površine na maso lahko še dodatno povečana zaradi večje adsorpcije težkih kovin, PAH-ov in drugih škodljivih snovi [2, stran 711].

Poleg negativnih posledic na zdravje imajo delci v zraku lahko vpliv tudi na formiranje oblakov in padavin [3 in 4], zaradi povečane optične absorpcije in sipanja svetlobe v atmosferi prihaja do temnenja neba (global dimming, zelo opazno v Indiji in na Kitajskem), na sneg adsorbirani delci zmanjšajo albedo snega in lahko povečajo topljenje in globalno segrevanje [5].

Črni ogljik (black carbon, BC) je produkt nepopolnega zgorevanja, tipično velikosti 0,03-0,3 μm [6, stran 59] in je zdravju zelo škodljiv [7, 8 in 9]. Zaradi grafitne strukture ima v infrardečem (IR) in vidnem območju svetlobe zelo močno absorpcijo, ostali delci v zraku pa imajo v primerjavi z BC večinoma zanemarljivo absorpcijo [6, stran 20]. Poleg BC so za razne

¹ Aerodinamični premer delca - premer krogle z gostoto 1g/cm^3 z enako gravitacijsko končno hitrostjo (terminal velocity) v mirujočem zraku, kot jo ima delec [1, stran 1].

oblike ogljika v zraku v uporabi še druge oznake: elementarni ogljik (EC, elemental carbon) in optični ogljik (OC, optical carbon), ki se med seboj po definicijah² razlikujejo. Pri meritvah je OC v večini primerov enak ali skoraj enak BC, EC pa je dobro koreliran.

Predlog direktive EU vsebuje regulacijo PM z zelo nizko določenimi največjimi dovoljenimi povprečnimi koncentracijami PM_{2.5}: največ 25 µg/m³ kjerkoli [10, stran 5], in zmanjšanje za 20% od 2010 do 2020 [10, stran 55]. V ZDA je na tem področju v veljavi Environmental Protection Agency (EPA) Clean Air Act [11], iz katerega izhajajo standardi National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) [12].

2.1 Metode merjenja delcev

V osnovi ločimo tri skupine metod za merjenje koncentracije PM: gravimetrične, optične in električne. Slednje so manj razširjene, temeljijo pa na naelektritvi delcev in odvajanju elektrine s preletom naelektrenih delcev, kar ima za posledico merljivo spremembo elektrine oziroma napetosti na elektrodah. Zgodovinsko so se najprej uveljavile gravimetrične metode in zato razne definicije in regulacije s strani okoljskih agencij ponavadi temeljijo na njih.

Pri gravimetrični metodi se zaradi majhne mase delcev v zraku delce nabira dalj časa, da se akumulira količina, ki zagotavlja dovolj točno meritev. Za nabiranje delcev se največkrat uporablja sito iz kremenčevih ali celuloznih vlaken. Kremenčeva vlakna so kemijsko nereaktivna in odporna na visoke temperature, zato so takšna sita primerna za merjenja, kjer je poleg meritev koncentracije zaželeno tudi dodatna analiza, npr. kemijska analiza, LIBS³, PCR⁴. Njihovi slabosti sta mehanska krhkost in visoka cena. Za najboljše rezultate mora biti sito pred meritvijo čisto. Lahko se ga segreje v peči do visoke temperature, da nečistoče izparijo. Čisto sito se stehta in izvede vzorčenje s črpanjem merjenega zraka čez sito. Po določenem času se sito ponovno stehta in masni prirastek sita predstavlja maso nabranih delcev. Masno koncentracijo se izračuna iz mase delcev na situ in količine zraka, ki se je ob konstantnem volumskem pretoku Φ_v v časovnem obdobju Δt prečrpala čez sito:

2 Povsem točne in splošno sprejete definicije za BC, OC in EC kot onesnaževalce zraka pravzaprav sploh ne obstajajo.

3 Laser induced breakdown spectroscopy – Lasersko segrevanje snovi do visokih temperatur, kjer snov razpade na ione in atome, ki sevajo. Ker imajo le-ti značilne spektre, je z analizo spektra možno določiti elementarno sestavo snovi.

4 Polymerase chain reaction – Umetna replikacija DNA, uporablja se lahko za ugotavljanje vrste mikroorganizma v vzorcu. Modifikacija metode, ki omogoča tudi ugotavljanje količine v prvotnem vzorcu, je QPCR (Quantitative PCR).

$$C_m = \frac{m_2 - m_1}{\Phi_v \cdot \Delta t} \quad (1)$$

Poglavitna slabost gravimetrične metode je zahtevnost natančnega tehtanja in menjave sita, zaradi česar je ta metoda počasna in neprimerna za avtomatizacijo. Še vedno se uporablja v nekaterih situacijah, kjer so enostavnost, majhne dimenzije in masa merilnega sistema pomembnejši faktorji izbire kot hitrost, časovna ločljivost in samodejnost meritev, sicer pa se bolj uporablja kot referenčna metoda, za kalibracijo ostalih metod, ali kot vzporedna kontrolna meritev.

Optične metode delimo nadalje na 2 skupini:

- z nabiranjem delcev na situ, ki izhaja iz gravimetrične,
- in z direktnim merjenjem delcev v zraku.

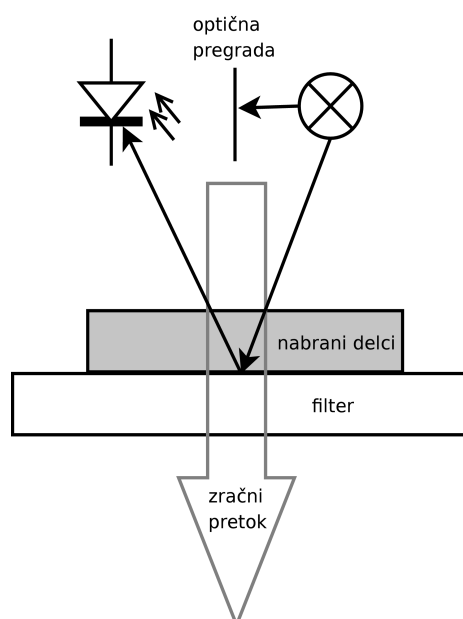
Optična metoda z nabiranjem delcev na situ je podobna gravimetrični, bistvena razlika je le v določanju nabrane količine delcev na situ, kjer se namesto tehtanja mase uporabi optično transmisijo ali pa refleksijo. V obeh primerih ima meritve teoretično podlago v absorpciji svetlobe v nabranih delcih in Beer-Lambertovem zakonu, ki opisuje zmanjšanje intenzitete svetlobe z valovno dolžino λ iz I_0 na I pri prehodu skozi medij z optično globino τ :

$$\tau(\lambda) = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (2)$$

Iz meritev intenzitete svetlobe pri čistem situ in intenzitete svetlobe pri situ z nabranimi delci se torej izračuna optično globino ali atenuacijo svetlobe, ki je osnova za nadaljnji izračun koncentracije delcev v zraku. Prednost metode izhaja iz integracije merilnega signala, saj se kot pri gravimetrični metodi z nalaganjem merjenca na račun povečanega časa meritve zmanjšuje meja detekcije. Posebnost optičnih metod je odvisnost od valovne dolžine, kar zahteva dodatno kalibracijo, a omogoča pridobitev več informacije o merjenih delcih, saj različne snovi izražajo različno odvisnost absorpcije od valovne dolžine. Metoda meritve optične refleksije je prikazana na sliki 1, izračun pa je podan z enačbo (3), kjer a označuje t.i. absorpcijski koeficient⁵. Podrobno jo opisuje standard ISO 9835:1993 [15]. Posebnost metode

5 Absorpcijski koeficient je po nekaterih definicijah [13, stran 219; 14, stran 110] lastnost snovi, v drugih virih [15, stran 1; 16, stran 1447] pa se pojavlja kot veličina, sorazmerna s količino nabrane snovi in s tem tudi s koncentracijo delcev v zraku. Smiselno razlago drugega primera daje obravnavanje nabranih delcev kot

je dvakratni prehod svetlobe skozi merjeno snov na traku, kar se odraža s faktorjem $\frac{1}{2}$ v enačbi (3), s čimer se tudi meja detekcije in šum, ki izvira iz fotodetektorja, teoretično prepolovita. Vendar se delci pri nalaganju na sito ne ustavijo takoj na skrajni zgornji točki sita, temveč delno prodrejo skozi vlakna v notranjost sita, pri čemer je globina prodora, s tem pa tudi refleksija, odvisna od velikosti in oblike delcev, strukture vlaken sita (odvisnost od proizvodne serije in kvalitete izdelave), zračnega pretoka skozi sito, ter od časa, saj ni možno predpostaviti, da vsi delci po pristanku na trak kljub zračnemu pretoku stalno mirujejo.



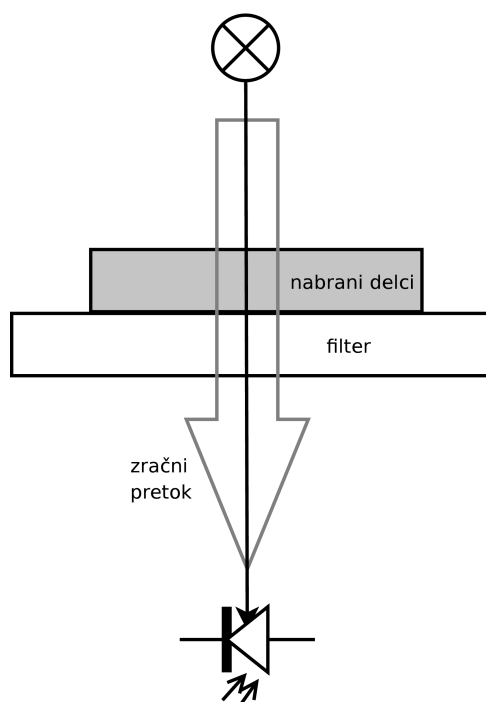
Slika 1: Merjenje z optično refleksijo

$$c_m \propto a = \frac{A}{2 \cdot V} \ln \frac{I_0}{I} \quad (3)$$

Zato sodobne optične metode, ki merijo na situ akumulirano snov, namesto refleksije merijo transmisijo. Na tej metodi temelji delovanje pogosto uporabljenih instrumentov Particle Soot Absorption Photometer (PSAP), Aethalometer in Multi Angle Absorption Photometer (MAAP)⁶.

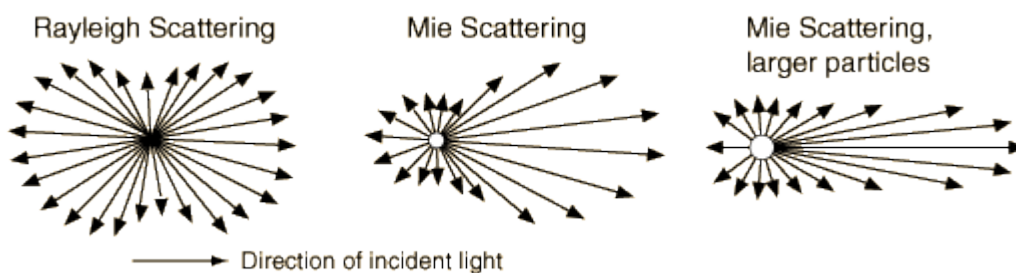
enotne snovi z zanemarljivo spremenljivo debelino, pri čemer se z nalaganjem novih delcev spreminja koncentracija in optična prepustnost te snovi.

6 MAAP meri tudi refleksijo, vendar so te meritve namenjene pridobivanju dodatnih informacij o sipanju in ne o absorpciji, na kateri temelji izračun koncentracije delcev.



Slika 2: Merjenje z optično transmisijo

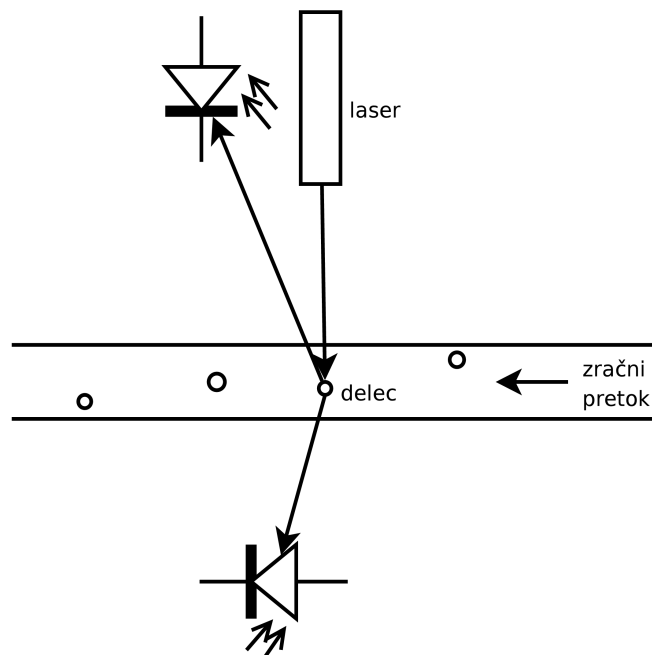
Enačba (2), ki je osnova vseh optičnih metod z nabiranjem delcev na situ, poleg absorpcije zajema tudi sipanje. Pri teh metodah temelji izračun masne koncentracije na povezavi med maso določenih delcev (npr. BC) in absorpcijo, sipanje pa pri tem predstavlja neželen pojav. Še posebej moteče so spremembe sipanja na vlaknih sita zaradi nalaganja novih delcev.



Slika 3: Sipanje svetlobe [17]

Optična metoda z direktnim merjenjem delcev v zraku je popolnoma drugačna in temelji prav na sipanju. Čeprav se zaradi zgodovine in medsebojne primerljivosti tudi pri optičnih metodah rezultat velikokrat preračuna v ng/m^3 ali $\mu\text{g}/\text{m}^3$, kot rezultata ta metoda praviloma ne podaja masne koncentracije, ampak številčno koncentracijo (število delcev na enoto

prostornine). Zato se takšne naprave imenujejo števci delcev (particle counter). Delovanje prikazuje slika 4. Skozi ozko cev se črpa zrak in ko pravokotni snop laserja za trenutek prekine delec, se svetloba siplje v vse smeri. Fotodetektor je zato lahko nameščen kjerkoli, razen v snopu laserja. Vendar se s postavitvijo fotodetektorja v kot, v katerem se pričakuje največjo jakost sipanja, doseže manjša potrebna moč laserja za zadovoljivo zanesljivost detekcije, oziroma se meja detekcije fotodetektorja sploh preseže. Pri delcih, zanemarljivo majhnih v primerjavi z valovno dolžino svetlobe, je sipanje dobro aproksimirano z Rayleigh-jevim sipanjem, sicer je potrebno upoštevati Mie-jevo teorijo⁷ [13, strani 759-789], ki je grafično in poenostavljeno prikazana na sliki 3. Tako se z uporabo več detektorjev in razmerjem signalov iz njih lahko pridobi dodatno informacijo o velikosti delca.



Slika 4: Optična metoda s preletom delcev

Omenim naj še eno izvedbo metode z direktnim merjenjem delcev, kjer je fotodetektor postavljen v laserski snop in zaznava zmanjšanje jakosti svetlobe zaradi absorpcije in sipanja delca, ki preleti snop. Ker absorpcija na delec narašča z velikostjo delca, je takšna metoda primerna za merjenje večjih delcev (1 μm in več), za merjenje bolj škodljivih manjših delcev

⁷ Mie-jeva teorija (Mie theory) – konkretna rešitev Maxwellovih enačb za primer elektromagnetnega valovanja na homogeni in izotropni krogli z danim radijem. Če je radij v primerjavi z $\lambda / (2\pi)$ zelo majhen, preide rešitev v Rayleigh-jev model sipanja, druga skrajnost (neskončen radij), pa preide v geometrijsko optiko [14, strani 775-779].

pa ne.

Koncentracijo se izračuna iz števila zaznanih pulzov na fotodetektorjih:

$$c_N = \frac{N}{\phi_v \cdot \Delta t} \frac{1}{P(\text{zadetek})} \quad (4)$$

Če laserski žarek ni razširjen po celotnem preseku cevi, po kateri se pretakajo delci, je potrebno v izračunu koncentracije upoštevati verjetnost zadetka delca z laserskim snopom. Ob predpostavki homogene razpršenosti delcev po preseku cevi in zanemarljive velikosti delcev v primerjavi s premerom cevi je to kar razmerje površin laserskega snopa in preseka cevi.

V strokovni literaturi se večinoma ugotavlja koreliranost meritev z različnimi instrumenti in koreliranost meritev s sprejemom bolnikov ter z umrljivostjo ljudi. V prid optičnim metodam govori dejstvo, da so njihovi rezultati občutno bolj povezani z negativnim vplivom na zdravje ljudi kot rezultati gravimetričnih metod za merjenje TSP. Poleg tega vse optične metode omogočajo večjo hitrost in lažjo avtomatizacijo meritev.

2.2 Etaloni in referenčne metode

Etaloni ne obstajajo niti za koncentracije PM (TSP, PM10, PM2.5, PM1, PM0.1) niti za koncentracije BC. Obstajajo generatorji delcev (npr. Palas GfG 1000), ki generirajo določeno vrsto delcev (npr. kerozinske saje kot model delcev z visoko absorpcijo, amonijev sulfat kot model delcev, ki svetlobo samo sipajo in je ne absorbirajo) in jih nekateri avtorji uporabljajo za preizkus delovanja ali za kalibracijo merilnikov. Vendar takšni delci niso enaki delcem v atmosferi in njihova uporaba za etalon ali referenčno koncentracijo za umerjanje je vprašljiva. Glede na povezavo vpliva na zdravje in velikosti delcev, ter glede na velikostno distribucijo delcev v urbanem okolju, bi bilo za etalon potrebno generirati delce, manjše od 1 μm . Tako majhnih delcev se ne da generirati z enostavnimi mehanskimi postopki [18]. Poleg tega se tako majhni sveži delci hitro prilepijo na površine, se medsebojno združujejo in adsorbirajo še manjše delce, ki prosto plavajo v zraku. Delci v atmosferi s kemijskim staranjem sčasoma izgubijo to lepljivost [18]. Na stene naloženi delci se lahko zaradi kroženja zraka ali drugih mehanskih vplivov iz površin tudi resuspendirajo in spremenijo koncentracijo. Poleg tega vse metode, ki posredno ali neposredno merijo masno koncentracijo, nekaj delcev pri meritvi

odstranijo iz zraka (količina odstranjenih delcev narašča z želeno natančnostjo meritve), s čimer se koncentracija v končno velikem zaprtem prostoru spremeni in četudi bi obstajal etalon, bi se uničil s prvo primerjavo z neko drugo merjeno koncentracijo.

Tudi pri metodah merjenja ni neke absolutne reference, vsaj ne za optične metode. Za merjenje koncentracije BC obstaja več metod in več optičnih instrumentov, vendar nobena metoda ni splošno sprejeta ali standardna [19]. So pa nekatere bolj pogosto uporabljane, npr. izmed optičnih metod za merjenje BC je najbolj pogosto uporabljan aethalometer [16], oziroma vsaj eden najbolj pogosto uporabljanih [20].

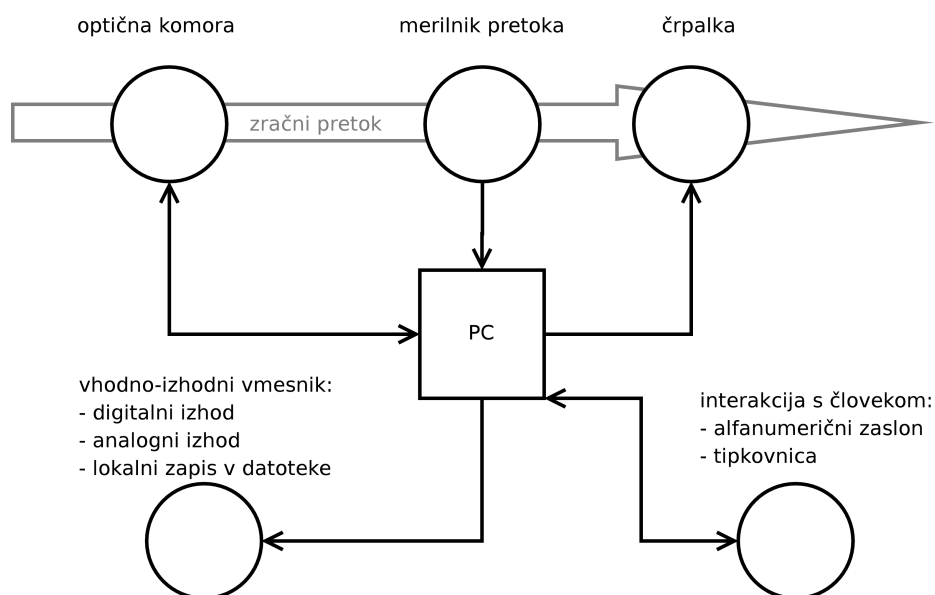
Kot referenčne metode in za umerjanje tistih optičnih metod, ki prikazujejo rezultat kot masno koncentracijo, se uporabljajo gravimetrične metode.

Težava je tudi v definiciji koncentracij, ki so v standardih in predpisih podane kot masne koncentracije. Optične metode dajejo rezultat, ki se ga sicer da pretvoriti v masno koncentracijo, a sta natančnost in pogrešek pretvorbe ob nepoznanih ostalih parametrih (vlaga, biološko kemijska sestava delcev, velikostna distribucija delcev, oblika delcev, staranje delcev, spreminjanje agregatnega stanja) slabo predvidljiva, različne optične metode pa prav tako niso direktno primerljive. Med rezultati različnih merilnih instrumentov vedno obstaja neka korelacija, vendar razlik ni možno izničiti s splošno kalibracijo, saj so razlike v meritvah različnih instrumentov, tudi tistih, ki temeljijo na podobnih metodah, odvisne od merilnih pogojev. Močan vpliv na te razlike imata običajno lokacija in letni čas (drugačne vrste aerosolov, klimatski pogoji, itd.).

3. Predstavitev aethalometra

Aethalometer z optično metodo, z meritvijo optične transmisije skozi na situ nabrane delce, meri koncentracijo črnega ogljika.

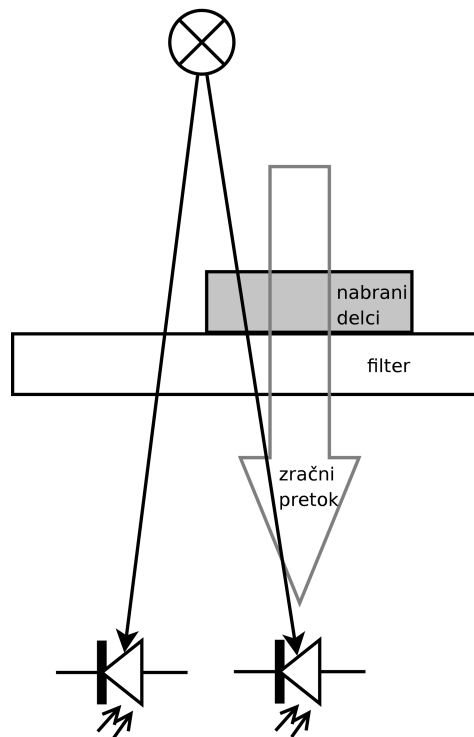
3.1 Princip delovanja in fizikalno ozadje



Slika 5: Shema aethalometra

Delovanje instrumenta shematsko prikazuje slika 5, optično komoro pa slika 6. Povratna zanka s črpalko in merilnikom pretoka zagotavlja konstanten zračni pretok skozi sito iz kremenčevih vlaken v optični komori, na katero se nabirajo delci iz zraka. V prvih instrumentih iz osemdesetih let 20. stoletja je bila v optični komori kot vir svetlobe uporabljena širokospektralna žarnica, ki so jo v kasnejših izvedbah nadomestile LED diode. Na drugi strani sita se meri intenziteto svetlobe na dveh mestih:

- Neposredno pod površino, skozi katero se pretaka zrak in kamor se nalagajo delci. To detektorsko mesto se označi s „s“ kot „sense“.
- Pod površino, skozi katero ni zračnega pretoka in zato ostaja svetlobno enako prepustna ves čas meritve. To detektorsko mesto se označi z „r“ kot „reference“.



Slika 6: Optični princip aethalometra

Iz Beer-Lambertovega zakona (2) se izrazi intenziteto svetlobe na vsaki fotodiodi posebej:

$$I_s = I_0 \cdot e^{-\tau_s} \quad (5)$$

$$I_r = I_0 \cdot e^{-\tau_r} \quad (6)$$

V izračunu slabljenja svetlobe se uporabi razmerje I_s/I_r . To razmerje je pri konstantnih optičnih lastnostih sita z nabranimi delci neodvisno od I_0 . S tem se v veliki meri kompenzira nestalnost svetlobnega vira in z njim povezan merilni pogrešek.

Pred začetkom serije meritev se sito samodejno zamenja in se za „sense“ in „reference“ fotodiodi izmeri temna tokova s_z in r_z . Zatem se vklopi LED diodo in se v rednih intervalih meri tokova s_b in r_b čez fotodiodi pri prižgani LED. Optična atenuacija se označi z ATN in je v skladu z Beer-Lambertovim zakonom definirana z enačbo (7), pri čemer je argument logaritma obrnjen (če odštejemo vpliv sita, signal referenčne fotodiode ustreza I_0), faktor 100 pa dodan zaradi človeku lažjega obravnavanja števil v tipičnem razponu med 0 in 75. Izračun masne koncentracije BC iz atenuacije podaja enačba (8).

$$ATN = -100 \ln \frac{s_b - s_z}{r_b - r_z} \quad (7)$$

$$c_m = \frac{A}{\sigma(\lambda) \cdot \Phi_V \cdot \Delta t} \frac{\Delta ATN}{100} \quad (8)$$

Oznake v enačbi (8):

- c_m – Masna koncentracija BC.
- A – Površina mesta na situ, čez katerega se črpa zrak in na katerem se nalagajo delci.
- $\sigma(\lambda)$ – Specifična atenuacija. Odvisna je od valovne dolžine svetlobe in od snovi. BC ima v bližnjem infrardečem območju bistveno višjo od ostalih aerosolov, npr. 100-1000 krat višjo v primerjavi z mineralnim prahom⁸ [6, stran 21]. V primeru BC je odvisnost od valovne dolžine hiperbolična: $\sigma_{BC}(\lambda) = k/\lambda$. V bližnjem IR območju je σ_{BC} velikostnega razreda $10 \text{ m}^2/\text{g}$.
- Φ_V – Volumski pretok zraka čez sito.
- Δt – Časovni interval med dvema zaporednima meritvama intenzitete svetlobe.

Kaj dejansko predstavljata vrednosti števca in imenovalca logaritma v enačbi (7), niti ni pomembno, dokler je imenovalec sorazmeren intenziteti svetlobe pred nabranimi delci (med virom svetlobe in delci), števec pa intenziteti svetlobe na drugi strani delcev. Kakršnekoli konstante, s katerimi bi bili pomnoženi intenziteti svetlobe, se prenesejo pred logaritem kot aditivne konstante in v enačbi (8) medsebojno odštejejo. Zato se za s_b , s_z , r_b , in r_z lahko uporabijo kar gole celoštevilске vrednosti iz A/D pretvornika.

Večkanalni instrumenti imajo več LED diod, ki jih med meritvijo znotraj enega časovnega intervala Δt preklaplajo in izmerijo ekvivalent koncentracije BC pri različnih valovnih dolžinah. Ko ATN za katerokoli valovno dolžino preseže nastavljeni prag, ki je običajno 75, solenoid dvigne optično komoro, ki sicer zaradi tesnjenja pritiska na filtrirni trak, nakar motor premakne trak, optična komora se spusti nazaj na trak in po ponovni inicializaciji se meritve nadaljujejo na svežem situ.

⁸ Mineralni prah (mineral dust) – atmosferski aerosol, ki se suspendira iz mineralov, kemijsko so to večinoma oksidi in karbonati. Glavna vira sta Sahara in puščava Gobi.



Slika 7: Aethalometer (foto: Mitja Vardjan)

Izračunane koncentracije se sproti zapisujejo v lokalno datoteko na disketi (v nekaterih primerih je disketa nadomeščena s pomnilniško kartico CF, priklopljeno preko PCMCIA pretvornika), na serijski vmesnik (RS-232) in na analogni napetostni izhod kot napetostni ekvivalent koncentracije ali kot alarm pri preseženi mejni koncentraciji. V lokalno datoteko se zapisujejo tudi nekatere vmesne vrednosti, kot so Φ_v , s_z , Γ_z , s_b , r_b in ATN. Z omenjenimi vmesniki je omogočena vključitev v večji samodejni nadzorni sistem, vendar sodobnejši načini prenosa podatkov po Ethernetu in USB niso na voljo. Spreminjanje konfiguracije in nadzor naprave se izvaja preko vgrajene tipkovnice in alfanumeričnega zaslona velikosti 4×20 znakov.



Slika 8: Notranjost aethalometra (foto: Mitja Vardjan)

3.2 Kalibracija

Optično meritev se pretvori v masno koncentracijo po enačbi (8), pri čemer se za $\sigma(\lambda)$ predpostavi funkcijo k/λ . V uporabi so trije pristopi:

- Magee kalibracija je privzeta v aethalometru. Temelji na metodah, razvitih in objavljenih v 80-ih letih 20. stoletja [21]. Rezultat: $\sigma = 14625 \text{ (nm} \cdot \text{m}^2 / \text{g)} / \lambda$ [6, stran 40].
- Harvard School of Public Health je iz vzporednih večletnih meritev na različnih lokacijah s termalno-optičnimi metodami razvila kalibracijo za EC. Rezultat: $\sigma = 11115 \text{ (nm} \cdot \text{m}^2 / \text{g)} / \lambda$ [6, stran 40].
- Nekateri avtorji člankov aethalometer sami kalibrirajo z umetnimi delci.

Tabela 1: Kalibracija $\sigma(\lambda)$ [6, stran 40]

Svetloba	λ / nm	σ / (m ² /g) (BC, Magee Scientific)	σ / (m ² /g) (EC, Harvard)
UV	370	39,5	30,0
Modra	470	31,1	23,6
Zelena	520	28,1	21,3
Rumena	590	24,8	18,8
Rdeča	660	22,2	16,8
IR	880	16,6	12,6
IR	950	15,4	11,7

Z zunanjim preciznim merilnikom pretoka se lahko kalibrira tudi merilnik pretoka v aethalometru.

Če dodatnih instrumentov za umerjanje ni na voljo, je pa na voljo več instrumentov enakega tipa, se lahko uporabi rezultate meritev, kjer vsi instrumenti vzorčijo zrak na istem mestu. Rezultate iz instrumentov, ki stalno izmerijo premalo ali preveč, se pomnoži z ustreznim faktorjem, da se rezultate različnih instrumentov približa. Kot merilo podobnosti se uporabi srednja kvadratna napaka, razlike v povprečnih vrednostih, razlike v mediani, itd. Pri tem se pričakuje zmanjšanje sistematskih napak. Pri tem je posebno pozornost potrebno posvetiti vzorčenju in zagotoviti, da instrumenti vzorčijo čimbolj podoben zrak. Moteč vpliv ima lahko že različna orientacija cevi za zajem, različno gibanje zraka okoli cevi, ipd.

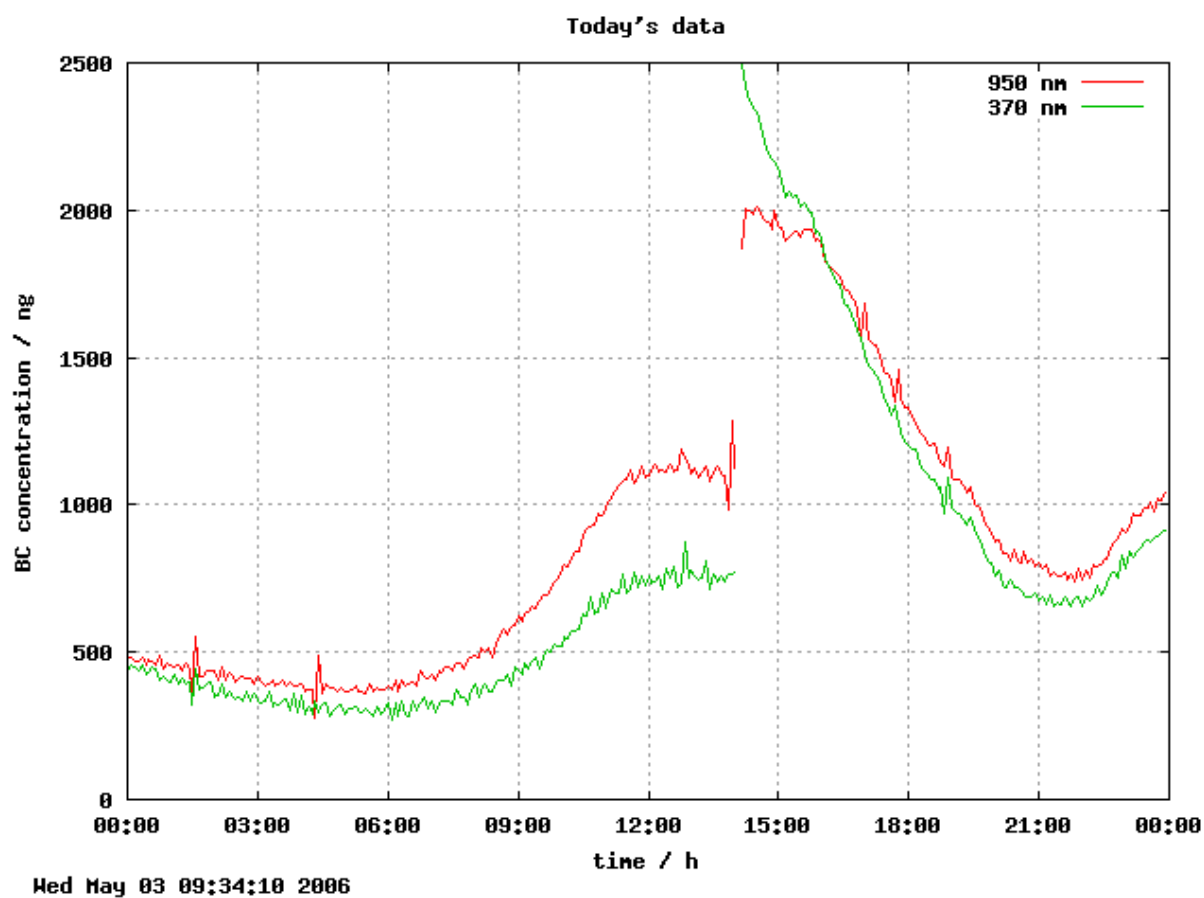
3.3 Merilna negotovost

3.3.1 Izvori negotovosti

Večina večjih naključnih odstopanj v izmerjenih koncentracijah izvira iz ene slabe meritve ATN, kar se v rezultatih odraža v dveh sosednjih napakah različnih predznakov. Na sliki 9 sta takšna primera za IR kanal (950 nm) ob 1:30 in 4:30.

Druga večja napaka je sistematskega značaja in je opazna ob menjavi sita ob 14:00 na sliki 9. Zaradi sprememb večkratnega sipanja filtrirnih vlaken izmerjena vrednost z nalaganjem delcev sčasoma upada. Na sliki 9 je ob menjavi sita hkrati prišlo še do dejanskega močnega povečanja koncentracije, a sistematska napaka je prisotna vsaj za UV kanal. Podrobna

teoretična obravnava te napake in predlagane kompenzacije so opisane drugje [16, 22 in 23].



Slika 9: Enodnevna meritev s časovno bazo $T = 5$ minut

Vpliv relativne vlage je zanemarljiv [24]⁹, tako kot vpliv vibracij, primerljivih z vibracijami avtomobilskega ali letalskega sedeža [18]. Vpliva adsorpcije plinov ni [24]. Vpliv hlapljivih aerosolov na časovno zmanjševanje izmerjene vrednosti BC ni enostavno določljiv in pride do izraza le v redkih primerih, ko vzorčeni zrak vsebuje takšne snovi.

V aethalometru je uporabljen merilnik masnega pretoka. Volumski pretok se izračuna iz meritve masnega pretoka in predpostavljene (stalne) gostote zraka. Iz plinske enačbe ter relacije med masnim in volumskim pretokom izhaja enačba (9), iz katere se lahko ob predpostavljeni povsod enaki molski masi zraka M oceni vpliv temperature T in tlaka P na

⁹ Vpliv vlažnosti je zanemarljiv dokler ne pride do kondenzacije v optičnem sistemu, do česar lahko pride v ekstremnih razmerah, kar pa je malo verjetno glede na to, da so aethalometri praviloma postavljeni v laboratorijih ali kontejnerjih z regulirano temperaturo. Običajno zadostuje, da relativna vlažnost ne presega 80%.

negotovosti Φ_V in posledično c_m iz enačbe (10).

$$\Phi_V = \frac{\Phi_m}{\rho_{zrak}} = \frac{\Phi_m \cdot R \cdot T}{P \cdot M} \quad (9)$$

$$c_m = \frac{A M}{100 R \Delta t} \frac{1}{\sigma(\lambda)} \frac{P}{\Phi_m \cdot T} (ATN_{t2} - ATN_{t1}) \quad (10)$$

Temperatura zraka se od mesta zajema do merilnika pretoka v večini primerov poviša. Ne glede na temperaturo zraka v aethalometru pa je masni pretok na vseh mestih enak. Na negotovost rezultata, podanega v masi BC na prostornino merjenega (običajno zunanjega) zraka, zato vpliva temperatura na mestu zajema, temperatura na mestu merilnika pretoka pa ne. Za zračni tlak se predpostavlja, da je na celotni merilni poti enak. Ob dobro definirani površini A, molski masi zraka M, plinski konstanti R in časovnem intervalu Δt na negotovost opazno vplivajo:

- specifična atenuacija $\sigma(\lambda)$,
- masni pretok zraka Φ_m ,
- zračni tlak P,
- temperatura merjenega (običajno zunanjega) zraka T,
- prirastek atenuacije $\Delta ATN = ATN_{t2} - ATN_{t1}$.

Relativna standardna negotovost σ bi lahko bila izračunana iz razlike v kalibracijah Magee Scientific in Harvard School of Public Health. Vendar je kakršnakoli predpostavka o distribuciji in parametrih distribucije (npr. pravokotna distribucija med vrednostma obeh kalibracij) slabo utemeljena. Podobno dvomljiv je izračun standardne negotovosti s standardno deviacijo iz zgolj dveh podatkov. Poleg tega sta bili kalibraciji izvedeni za različni snovi in ta negotovost bo iz izračuna izpuščena.

Merilnik masnega pretoka Omron D6F-05N2-000, ki je uporabljen v aethalometru, ima v specifikaciji vse podatke preračunane na volumski pretok. Merilno območje je 0-5 L/min in ponovljivost meritev v okviru $\pm 3\%$ polnega obsega, torej $\pm 0,15$ L/min. Merilnik masnega pretoka Sierra Instruments, Inc., model 824-RFQ-2340, ki je uporabljen v starejših aethalometrih, ima podano merilno območje 0-10 L/min in natančnost $\pm 1,5\%$ polnega obsega, kar prav tako znaša $\pm 0,15$ L/min. Ob predpostavki pravokotne porazdelitve je standardna

negotovost masnega pretoka podana z enačbo (11).

$$u_{\phi_m} = \frac{0,15 L}{\min} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,086603 \frac{L}{\min} \quad (11)$$

Negotovost zračnega tlaka je ocenjena iz dvomesečnih podatkov treh vremenskih postaj ARSO, med njimi je ena na višji lokaciji, na kateri je srednja vrednost približno normalne porazdelitve zračnega tlaka 826 mbar. Relativna standardna negotovost tipa A, izračunana kot standardni odklon, deljen s srednjo vrednostjo, znaša 0,073679. Standardna negotovost povprečne vrednosti je nepomembna, ker pri zaporednih meritvah tlaka ne gre za ocenjevanje istega tlaka ampak za ocenjevanje razpršenosti tlaka skozi daljše časovno obdobje, ki v posamezno meritev koncentracije delcev vnaša negotovost.

Relativna standardna negotovost temperature je ocenjena iz istih dvomesečnih podatkov vremenskih postaj ARSO in znaša 0,037406. Obdobje zaporednih meritev z aethalometri redko presega nekaj mesecev in ocena negotovosti iz celoletnih vremenskih podatkov bi bila previsoka. Na tem mestu se predpostavlja, da se rezultate meritev umeri glede na tipično temperaturo v obdobju in mestu meritev ter da ta del negotovosti izvira samo iz razpršenosti temperature v tem obdobju. Sistematski pogrešek, ki izvira iz tlaka in temperature, katerih vrednost se razlikuje od normalnih pogojev, se lahko kompenzira z upoštevanjem plinske enačbe po enačbi (12). Sistematski vpliv tlaka je smiselno kompenzirati pri meritvah na višjih legah, npr. pri merjenju ozračja iz letala. Če uporabnika zanima masni delež BC v zraku ali koncentracija BC pri normalnih pogojih za plin, se kompenzacija vplivov tlaka in temperature ne izvede.

$$C_{m,komp} = C_m \frac{T_{normal}}{T_{zunaj}} \frac{P}{P_{normal}} \quad (12)$$

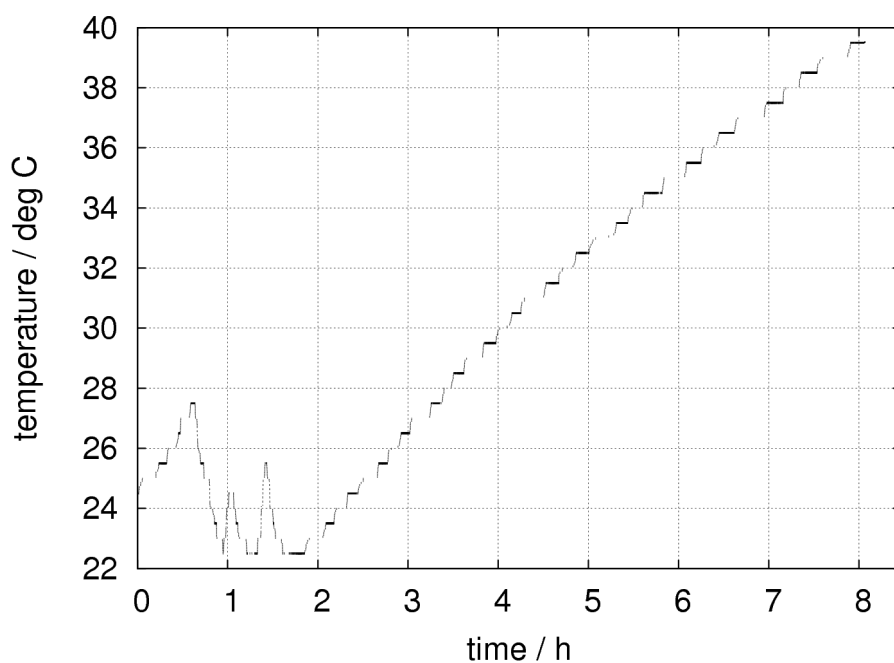
3.3.2 Eksperiment v temperaturni komori

Vsak element, ne samo merilnik pretoka, je do neke mere temperaturno občutljiv (temperaturno raztezanje, električne lastnosti, itd.). Vpliv temperature na celoten merilni instrument je bil eksperimentalno določen z merjenjem v nadzorovanih pogojih v temperaturni komori. Uporabljen je bil 2-kanalni aethalometer s časovno bazo 5 minut.

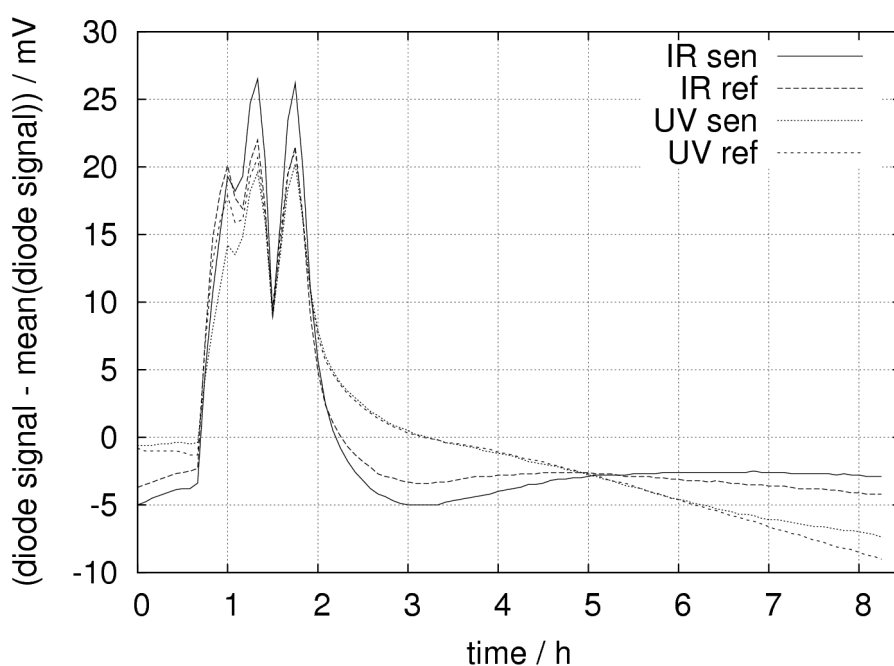
Koncentracija delcev v prostoru stalno niha, pri čemer je težko ugotoviti, katere spremembe v izmerjenih vrednostih so posledica temperature in katere posledica dejanske spremembe koncentracije. Možni so trije pristopi k problemu:

- Vzporedno merjenje z instrumentom, ki ni izpostavljen temperaturnim spremembam. Vrednosti iz obeh instrumentov se potem odšteje. Predpostavlja se, da bodo vrednosti podobne in rezultat odštevanja zato dvomljiv.
- Merjenje brez dejanskega zračnega pretoka, kjer se pretok simulira z neko fiksno vrednostjo, tako da se na vhodu A/D pretvornika izhodni signal merilnika pretoka zamenja z referenčno napetostjo, npr. z elementom REF3040, ali pa se meritev pretoka v programu nadomesti z neko konstanto. Ta pristop ne zajema vpliva merilnika pretoka, ki meri namesto volumskega masni pretok, vendar je ta vpliv že teoretično dovolj dobro obdelan in bi v eksperimentu samo otežil analizo rezultatov.
- Namestitev sita na mestu vzorčenja zraka, ki odstrani delce. Učinkovita sita, ki izločijo tudi manjše delce, slabo prepuščajo zrak in predstavljajo upornost za zračni pretok, vendar se z regulacijo pretoka ta težava izniči. Tudi ta pristop ne zajema vpliva merilnika pretoka.

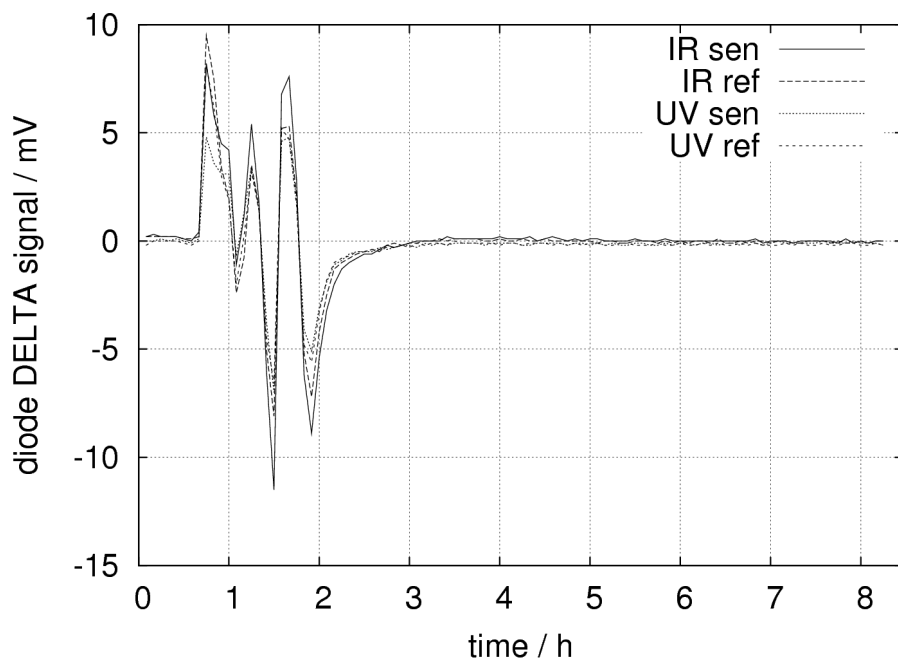
Zadnji pristop je po električnih razmerah v instrumentu bolj podoben pravemu delovanju kot drugi pristop in je bil zato izbran. Na vzorčevalnik je bilo nameščeno sito Buffalo Filter BILF101 in zračni pretok nastavljen na 4 L/min. Rezultati so prikazani na slikah 10 do 13. Ker se skozi sito v instrumentu pretaka že filtriran zrak in se nanj delci ne nalagajo, bi morale biti razmerje signalov iz fotodiod za vsak kanal (IR ali UV) konstantno in izmerjena koncentracija 0 ng/m³. Temperatura je bila merjena s kalibriranim multimetrom Voltcraft VC840 z ločljivostjo 1°C, ki na serijska vrata računalnika pošlje podatek ob vsaki spremembi temperature. Tudi pri stabilni temperaturi se lahko izhod stalno spreminja med dvema sosednjima vrednostma (t.i. dither). Na sliki 10 je signal zglajen s postopkom „simple moving average“, kjer se vrednost signala v vsaki točki nadomesti s povprečjem okoliških 29 vrednosti. Zaradi zgodovinskih razlogov in možnosti direktne primerjave s prikazanimi vrednostmi signalov na aethalometru v meniju „Signals & Flow“ je na slikah 11 in 12 signal iz fotodiod podan v mV, čeprav gre za tokovno meritev.



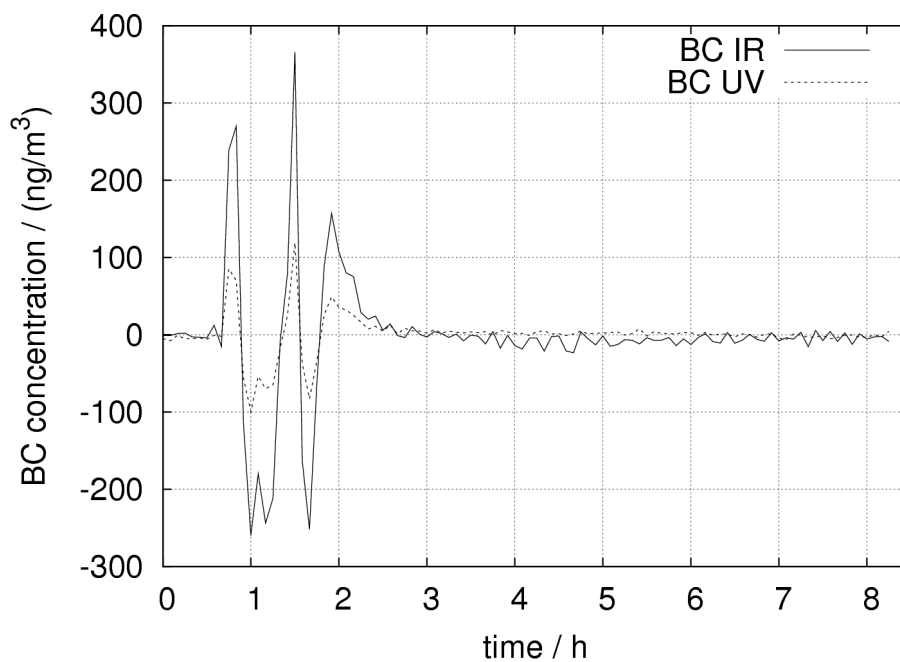
Slika 10: Test temperaturne občutljivosti: temperatura



Slika 11: Test temperaturne občutljivosti: signali na fotodiodah



Slika 12: Test temperaturne občutljivosti: difference signalov na fotodiodah



Slika 13: Test temperaturne občutljivosti: izmerjena koncentracija BC

Vpliv absolutne vrednosti temperature v okviru običajnih vrednosti človeškega bivalnega

okolja je zanemarljiv, kar poleg meritev v temperaturni komori¹⁰ potrjujejo tudi drugi viri [24]. Po drugi strani je aethalometer občutljiv na nenadne spremembe v temperaturi, kar je razvidno na slikah 10 do 13 v območju med 1. in 2. uro. Ta efekt je na primer izrazit, če je aethalometer postavljen neposredno pod klimatsko napravo z on/off regulacijo pri visoki zunanji temperaturi. Kasneje se je izkazalo, da je ta vpliv slabo določljiv in odvisen od konkretnega primera, zato bo iz izračuna negotovosti izpuščen. Izvor te napake je najverjetneje v raztezanju mehanskih in optičnih delov in ne v temperaturni občutljivosti elektronike.

3.3.3 Skupna negotovost

Za funkcijo $f(\alpha, \beta, \dots, \omega)$ se skupna standardna negotovost $u_{\alpha, \beta, \dots, \omega}$ izračuna po splošni enačbi (13) iz posameznih standardnih negotovosti $u_\alpha, u_\beta, \dots, u_\omega$, ki pripadajo veličinam $\alpha, \beta, \dots, \omega$, od katerih je odvisna funkcija f . Pri tem je c_α parcialni odvod f po α , c_β parcialni odvod f po β , itd. Pri posebnem primeru funkcije $f = \alpha \cdot \beta \cdot \dots \cdot \omega$ in deljenju enačbe (13) z f izhaja, da je skupna relativna negotovost enaka korenu vsote kvadratov posameznih relativnih negotovosti $w_\alpha, w_\beta, \dots, w_\omega$.

$$u_{\alpha, \beta, \dots, \omega} = \sqrt{(c_\alpha u_\alpha)^2 + (c_\beta u_\beta)^2 + \dots + (c_\omega u_\omega)^2} \quad (13)$$

Skupna relativna standardna negotovost Φ_m, P in T je podana z enačbo (15). V tej enačbi predstavlja $\Phi_{m,V}$ masni pretok, kot ga izmeri naprava in preračunanega v L/min poda poleg vsake meritve c_m . Praviloma se pretoka med meritvami ne spreminja. Pogosto ostane nastavljen na isto vrednost tudi med različnimi kampanjami. Tako desna stran enačbe (15) postane številska konstanta.

$$w_{P,T} = \sqrt{w_P^2 + w_T^2} = \sqrt{0,073679^2 + 0,037406^2} = 0,082631 \quad (14)$$

$$w_{\Phi_{m,P,T}} = \sqrt{w_{\Phi_m}^2 + w_P^2 + w_T^2} = \sqrt{\left(\frac{0,086603 \text{ L min}^{-1}}{\Phi_{m,V}}\right)^2 + 0,082631^2} \quad (15)$$

Negotovost prirastka atenuacije ΔATN izvira iz negotovosti posamezne vrednosti ATN , ta pa iz izmerjene jakosti svetlobnega toka. Ta jakost je produkt naslednjih faktorjev, ki so vsi,

¹⁰ Iz omenjenih meritev ni možno sklepati na občutljivost merilnika pretoka, ki ga eksperiment ni zajel.

razen zadnjega, odvisni od valovne dolžine svetlobe:

- jakost svetlobnega toka vira,
- optična prepustnost sita,
- optična prepustnost ostalih komponent,
- spektralni odziv detektorja,
- funkcija A/D pretvorbe; negotovost, ki izvira iz kakovostnega 20-bitnega A/D pretvornika Burr-Brown DDC101, je zanemarljiva, saj so ostali pretvorjeni signali bistveno bolj stabilni.

Prezapleten izračun negotovosti z upoštevanjem zgoraj navedenih faktorjev se poenostavi z direktnim izračunom negotovosti ΔATN s statističnimi metodami (negotovost tipa A). Poleg tega tako ni potrebno upoštevati soodvisnosti dveh zaporednih vrednosti ATN. Negotovost ΔATN je najlažje oceniti v razmerah brez nalaganja delcev na sito, ker se tako izloči vpliv koncentracije. To je možno izvesti z izločitvijo zračnega pretoka skozi sito ali pa s pretokom predhodno filtriranega zraka. Zaradi delovanja črpalke je slednja možnost vsaj v smislu električnih razmer v merilnem sistemu bolj podobna realni situaciji in zato je bila uporabljena. Meritve so bile izvedene z dvokanalnim aethalometrom tipa AE-21 z zračnim pretokom 1,2 L/min, pri normalnih in stabilnih pogojih v zaprtem prostoru, kjer se je sicer opravljalo testiranje instrumentov (t.i. clean air test). Povprečna vrednost 48-urnih meritev c_m v 5-minutnih intervalih je bila 18 ng/m³ na IR kanalu in 84 ng/m³ na UV kanalu. To pomeni, da se je na sito nalagalo zanemarljivo malo delcev, saj so tipične koncentracije BC v Sloveniji velikostnega reda nekaj tisoč ng/m³. Standardna negotovost ΔATN kot standardni odklon ΔATN znaša 0,0070565 za IR kanal in 0,0130980 za UV kanal.

Iz enačbe (13) za poseben primer $f = \alpha \cdot \rho$ sledi enačba (16), pri čemer je za veličino α znana absolutna standardna negotovost u_α , za veličino ρ pa relativna standardna negotovost w_ρ . Iz te formule sledi enačba (17) za končni izračun standardne negotovosti c_m .

$$u_{\alpha, \rho} = \sqrt{(f w_\rho)^2 + (\rho u_\alpha)^2} \quad (16)$$

$$u_{c_m} = \sqrt{\left(c_m w_{\phi, P, T} \right)^2 + \left(\frac{c_m}{\Delta ATN} u_{\Delta ATN} \right)^2} \quad (17)$$

V primeru zelo majhne koncentracije c_m je potrebna pozornost pri izračunu negotovosti, ker je tudi ΔATN blizu 0. Pri dovolj velikih koncentracijah ($c_m \gg 0$, $\Delta ATN \gg 0$) se lahko relativna standardna negotovost izračuna neposredno po enačbi (18).

$$w_{cm} = \sqrt{\left(w_{\phi m, P, T}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta ATN}}{\Delta ATN}\right)^2} \quad (18)$$

Primer modela aethalometra z zbiralno površino sита $A = 1,67 \text{ cm}^2$, nastavitvijo na Magee BC kalibracijo za $\sigma(\lambda)$, časovno bazo $\Delta t = 5$ minut, izmerjenim pretokom 4 L/min in koncentracijo na IR kanalu 3000 ng/m^3 :

Iz enačbe (8) sledi: $\Delta ATN = 0,59641$.

Iz enačb (11) in (15) sledi:

$$w_{\phi m} = \frac{0,086603 \text{ L min}^{-1}}{4 \text{ L min}^{-1}} = 0,021651 \quad (19)$$

$$c_m w_{\phi m, P, T} = 3000 \frac{\text{ng}}{\text{m}^3} \sqrt{0,021651^2 + 0,082631^2} = 256,26 \frac{\text{ng}}{\text{m}^3} \quad (20)$$

Del, ki ga k skupni standardni negotovosti prispeva ΔATN :

$$\frac{c_m}{\Delta ATN} u_{\Delta ATN} = \frac{3000 \text{ ng m}^{-3}}{0,59641} 0,0070565 = 35,495 \frac{\text{ng}}{\text{m}^3} \quad (21)$$

Z vstavitvijo vrednosti izrazov (20) in (21) v enačbo (17) končno sledi skupna standardna negotovost:

$$u_{cm} = \sqrt{256,26^2 + 35,495^2} \frac{\text{ng}}{\text{m}^3} = 258,71 \frac{\text{ng}}{\text{m}^3} \approx 260 \frac{\text{ng}}{\text{m}^3} \quad (22)$$

Rezultat se lahko zapiše z razširjeno merilno negotovostjo s faktorjem razširitve 2:

$$c_m = 3000 \frac{\text{ng}}{\text{m}^3} \pm 520 \frac{\text{ng}}{\text{m}^3} \quad (23)$$

Enačba (23) velja pri predpostavljenih normalnih distribucijah za nivo zaupanja 95,5 %, v najslabšem primeru z upoštevanjem neenakosti Čebiševa pa za nivo zaupanja 75 %.

Tabela 2: Posamezne relativne standardne negotovosti za konkreten primer

W_{cm}	$W_{\Phi m}$	W_P	W_T	$W_{\Delta ATN}$
0,087	0,022	0,074	0,038	0,012

Tabela 2 podaja posamezne prispevke k skupni relativni standardni negotovosti. Prispevek temperature in tlaka k negotovosti je bil ocenjen zelo konservativno. Poleg tega gre pri tlaku, temperaturi in v veliki meri tudi pri masnem pretoku za sistematske pogreške. Standardna negotovost merilnika pretoka Sierra 824-RFQ-2340, izmerjena kot negotovost tipa A pri pretoku od 1 do 1,8 L/min, znaša od 0,0075 do 0,014 L/min (odvisno od pretoka), kar je samo 9-16% standardne negotovosti tipa B, ki je bila uporabljena v izračunu skupne negotovosti. Omenjene sistematske pogreške se lahko kompenzira s:

- kalibracijo merilnika pretoka,
- hkratno meritvijo tlaka in temperature; na merilnih mestih nekaterih okoljskih organizacij sta ta podatka že tako ali tako prisotna in dodatni instrumenti sploh niso potrebni.

Prispevek negotovosti ΔATN k skupni negotovosti je lahko že brez kompenzacij sistematskih pogreškov večji kot v tabeli 2, kar dokazuje prejšnji primer aethalometra, ki se mu časovno bazo $\Delta t = 5$ minut zmanjša na $\Delta t / k$:

Iz enačbe (8) sledi, da se tudi ΔATN zmanjša z enakim faktorjem na $\Delta ATN / k$. Izraz (20) ostaja enak, izraz (21) pa se poveča z istim faktorjem na $k \cdot 35,495 \text{ ng/m}^3$. Skupna standardna negotovost tako znaša:

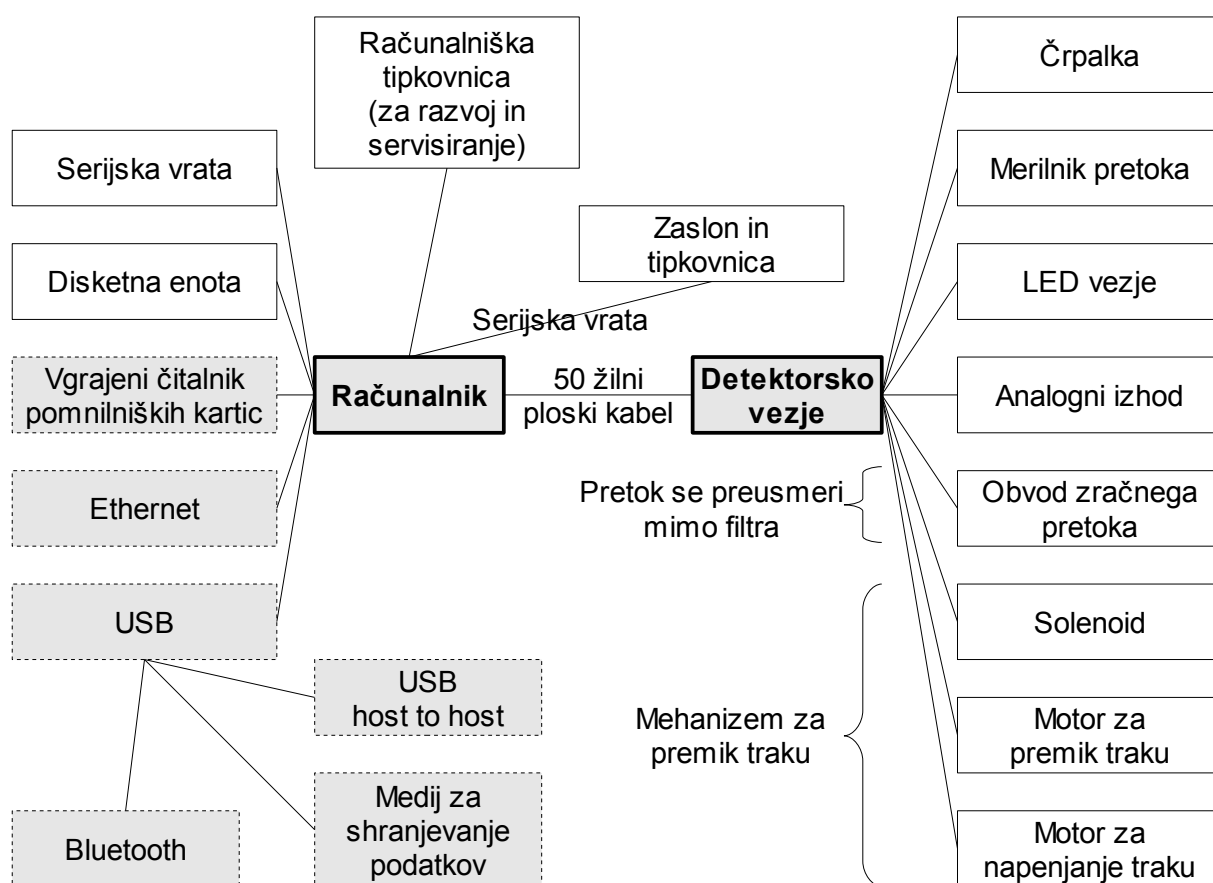
$$u_{cm} = \sqrt{256,26^2 + (k \cdot 35,495)^2} \frac{\text{ng}}{\text{m}^3} \quad (24)$$

V praksi glavni delež prispeva negotovost, ki izvira iz meritev optičnih signalov, torej negotovost ΔATN . Negotovost ΔATN se močno poveča z zmanjšanjem časovne baze in/ali uporabo več različnih svetlobnih virov (npr. aethalometer s 7 LED diodami), saj se s tem

skrajša čas za stabilizacijo opto-elektronskega merilnega sistema po preklopu svetlobnega vira. Ravno povečanje hitrosti meritev pa je ena glavnih zahtev pri izboljšavi aethalometra.

4. Elektronika

V prejšnjem poglavju je bilo ugotovljeno, da k merilni negotovosti aethalometra prispevajo sistematski vplivi, ki jih je po potrebi možno enostavno kompenzirati, sistematski vplivi, ki so prezahtevni za obravnavo v tem delu in zahtevajo tudi soglasje širše strokovne skupnosti, ter naključni vplivi, ki v največji meri izvirajo iz ΔATN . Zato je najboljši pristop za izboljšanje merilne točnosti izboljšava meritev signalov fotodiod. Dodaten razlog je, da so pri merjenju koncentracije delcev naključni vplivi bolj problematični kot pri meritvah nekaterih drugih veličin, ker je njihovo odpravljanje s ponavljanjem meritev zaradi stalnega spreminjanja koncentracije vprašljivo. Poleg tega pri nekaterih dodatnih obdelavah podatkov iz več aethalometrov (omenjeno na sliki 30 v poglavju 5) naključni pogreški predstavljajo velik problem, sistematski pa nikakršnega.



Slika 14: Bločna shema elektronike aethalometra

Na sliki 14 je bločna shema elektronike aethalometra, na kateri so predlagane spremembe označene s sivino. Poleg izboljšave detektorskega vezja, ki vsebuje A/D pretvornik za branje

signalov fotodiod, je za modernizacijo celotnega instrumenta hkrati izbran tudi nov računalnik, ki še vedno podpira disketno enoto, na katero so navajeni dosedanji uporabniki, podpira pa tudi sodobne vmesnike.

4.1 Detektorsko vezje

Detektorsko vezje vsebuje celotno elektroniko za delovanje črpalke, merilnika pretoka, LED diod in ostalih komponent aethalometra, razen komunikacije z zunanjim svetom. Z računalnikom je vezje povezano po 50 žilnem ploskem kablu. Razdeljeno je na dva logična sklopa, ki se nahajata vsak na svojem delu tiskanine:

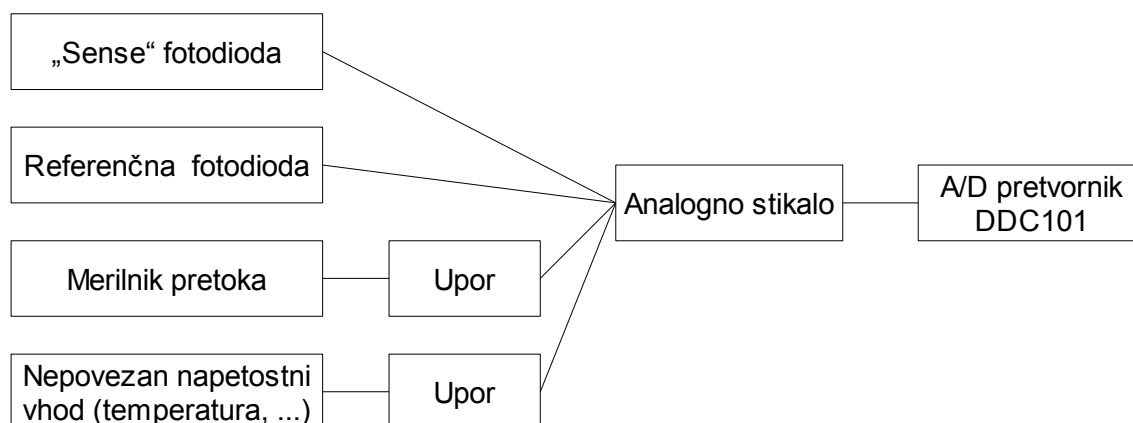
- Močnostni del, ki vsebuje napajalni del, komponente za krmiljenje solenoida in motorjev, kondenzatorje (1000 μ F in več) za stabilizacijo napajalnih napetosti za večje porabnike, ipd. Motnje v napajalni napetosti bi lahko vplivale tudi na občutljivi merilni del vezja, zato je bila napajalna napetost dodatno stabilizirana, sicer pa ta del deluje dobro in večjih sprememb ni bilo.
- Merilni del, ki zajema bolj občutljive komponente: A/D in D/A pretvornike, fotodiodi, generatorje referenčnih napetosti ter vso digitalno elektroniko. Glavnina tega dela vezja je skupaj s svojimi spremembami opisana v nadaljevanju.

4.1.1 Opis obstoječega vezja

Osrednji del detektorskega vezja predstavlja A/D pretvornik Burr-Brown DDC101, ki ima en tokovni merilni vhod. Za delovanje aethalometra je potrebno meriti tri analogne veličine: dva tokova iz fotodiod Hamamatsu S1336 in izhodno napetost merilnika pretoka. Vse tri veličine so preko analognega stikala Maxim DG308 povezane na isti vhod A/D pretvornika, kar je prikazano na sliki 15. Ta pristop ima naslednji slabosti:

- Fotodiodi na A/D pretvornik nista priklopljeni neposredno.
- Pred A/D pretvorbo je potrebno preklopiti analogno stikalo, razen če gre za serijo meritev iste veličine. To ima še bolj usodne posledice: po preklopu je potrebno zakasniti začetek meritve A/D pretvornika za 100 ms, da se signal stabilizira. Meritvi tokov čez fotodiodi sta časovno tako oddaljeni, da lahko upravičeno sumimo, da zaradi nihanja jakosti vira svetlobe in ostalih motenj v merilnem vezju nista izvedeni

pri enakih pogojih. Poleg tega se podaljša tudi čas celotne meritve koncentracije BC. To je problematično zlasti pri zelo kratkih časovnih bazah (do približno 1 minute), kjer časovna razlika med meritvami signalov iz obeh fotodiod v primerjavi s časovno bazo ni več zanemarljiva, čeprav enačba (7) predpostavlja sočasnost meritev svetlobnih signalov.



Slika 15: A/D pretvorba v starem detektorskem vezju



Slika 16: Časovni potek meritev optičnih signalov s starim detektorskim vezjem

Vse elektronske komponente so v ohišju PDIP in nameščene v podnožja na tiskanini. Izjema je A/D pretvornik, ki ga proizvajalec dobavlja samo v SMD pakiranju in se nahaja na svoji ločeni tiskanini, ki je prav tako nameščena v podnožje na glavni tiskanini. Tako se večina komponent vezja ob okvari lahko zamenja, čeprav se v praksi to ne dogaja pogosto in je običajno enostavneje in hitreje zamenjati celotno vezje kot najti in zamenjati nedelujoč element.

4.1.2 Razvoj novega vezja

Shema novega vezja je načrtana s programom gschem iz paketa gEDA 20070216 [25]. Vse sheme na slikah v tem poglavju, pri katerih ni naveden vir, so izdelane z gschem.

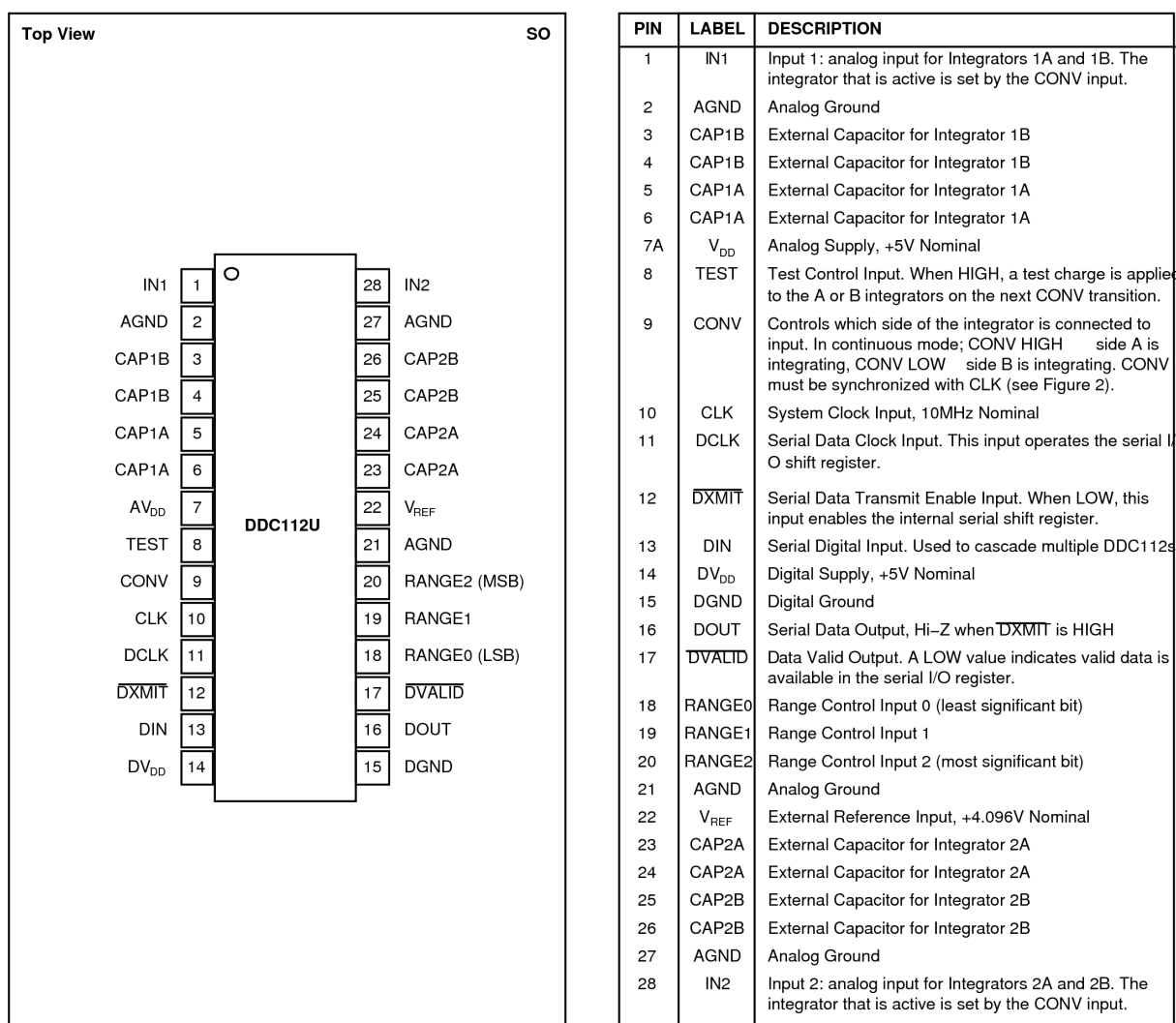
4.1.2.1 A/D pretvorba

Ključna sprememba je zamenjava enega eno-kanalnega A/D pretvornika z rešitvijo, ki ima merilne signale povezane na vhode neposredno in skrajša časovno oddaljenost meritev obeh optičnih signalov. Ker je obstoječi A/D pretvornik sicer kakovosten, preverjen in primeren za neposredno merjenje majhnih tokov, se kot prve opcije ponujajo rešitve s sorodnimi Burr-Brown A/D pretvorniki:

Tabela 3: Primerjava A/D pretvornikov

A/D pretvornik	Cena / \$ [26]	Dolgoročna dobavljivost [26]	Srednja kvadratna vrednost šuma pri enakih ali podobnih pogojih / ppm polnega obsega
2 × Burr-Brown DDC101 v kaskadi 1 × cenejši napetostni, npr. ADS8341	2 × 42 + 8	Ne	1,6 – 2,1 [27, stran 4]
1 × Burr-Brown DDC112 1 × cenejši napetostni, npr. ADS8341	16 + 8	Da	4,2 [28, stran 3]
1 × Burr-Brown DDC114	24	Da	5,2 – 5,5 [29, stran 3]

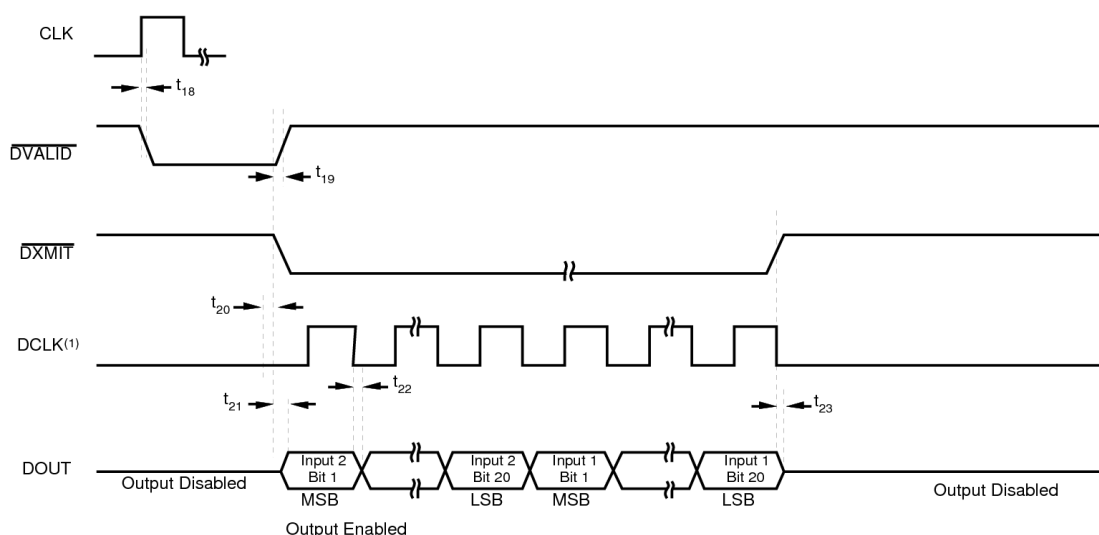
Manj kritična je meritev pretoka, ki se lahko izvede kot tokovna meritev preko upora na istem A/D pretvorniku ali pa se izvede z dodatnim, cenejšim A/D pretvornikom. Čeprav je DDC101 bolj natančen kot DDC112 ali DDC114 (tabela 3), so glede na nihanja izmerjenih signalov (slike 43 do 48 v poglavju 6.1) vsi pretvorniki dovolj natančni. Dva pretvornika DDC101 v seriji sta manj primerna rešitev, ker proizvajalec izdelek umika iz tržišča in priporoča DDC112 kot nadomestilo [26]. Manj pomemben argument proti DDC101 je tudi cena. DDC114 je na voljo samo v ohišju QFN [30], ki je za manjše serije in za ročno spajkanje manj primerno. Možnost za nadgradnjo v prihodnosti je dodatek senzorjev tlaka in temperature (za kompenzacijo sistemskih napak masnega merilnika pretoka), ki bi bila na A/D pretvornik povezana enako kot merilnik pretoka. Zato je bil izbran DDC112 z dodatnim 16 bitnim 4-kanalnim A/D pretvornikom Burr-Brown ADS8341. Tako je tudi ob predpostavljenih senzorjih temperature in tlaka en kanal še vedno prost za morebitno dodatno nadgradnjo.



Slika 17: A/D pretvornik Burr-Brown DDC112U (SO ohišje) [28, stran 4]

Pretvorba se v DDC112 začne s polnitvijo vgrajenega kondenzatorja na referenčno napetost V_{ref} . Vhodni tok v DDC112 prazni kondenzator. Po določenem času se napetost na kondenzatorju primerja z V_{ref} in razliko digitalizira. Vsak vhod v DDC112 ima po dva integratorja, označena z A in B. Medtem, ko se tokovni signal integrira, se prejšnji integral digitalizira. Integraciji obeh kanalov potekata sočasno. Čas integracije je stalen in znan, saj ga določi uporabnik kot polovico periode zunanega signala CONV. Tako se lahko DDC112 obravnava tudi kot merilnik elektrine. Merilni obseg je tako v specifikaciji podan kot elektrina v pC. Največja vrednost elektrine, ki jo meri DDC112, se nastavi z vgrajenimi kondenzatorji od 50 do 350 pC v korakih po 50 pC, ali pa z zunanji kondenzatorji do 1000 pC, če so kapacitivnosti zunanjih kondenzatorjev 250 pF [28, stran 3]. Kondenzatorje se izbere z

vhodnimi signali RANGE0 do RANGE2. Pri izbiri vgrajenih kondenzatorjev so le-ti za vsak integrator vsakega kanala enakih kapacitivnosti [28, stran 11]. Vhod TEST omogoča, da se vhodna analogna signala spelje na maso in na integratorje prenese elektrina 13 pC [28, stran 12]. Za večino notranje digitalne elektronike je uporabljena ura iz vhodnega signala CLK, ki določa hitrost A/D pretvorbe [28, stran 13]. Z izbrano 10 MHz uro (CLK) se digitalizacija izvrši v 220 μ s [28, stran 8]. Podatki se pošljejo zunanji napravi po serijskem vmesniku. A/D pretvornik najprej javi dostopnost podatka s preходом izhodnega signala DVALID v nizko stanje. Zatem naprava, ki bere podatke, s preходом signala DXMIT v nizko stanje javi začetek branja, sproži uro DCLK in prebere 40 bitni podatek na izhodu DOUT. Prebrani podatek vsebuje zaporedni 20 bitni vrednosti obeh kanalov. Vhod DIN je namenjen hkratnemu delovanju več pretvornikov DDC112 in v tem vezju ni uporabljen. Proces A/D pretvorbe in dostavljanja podatkov zunanji napravi sta neodvisna in DCLK je lahko drugačne frekvence kot CLK, določi pa jo zunanja naprava [28, stran 13]. V nasprotju z DDC101 pretvornika DDC112 ni potrebno inicializirati in vpisovati parametrov integracije kot serijskih podatkov pred prvo uporabo po vklopu napajanja, temveč se nastavitve določijo strojno ali z zunanji signali (frekvenci CLK in CONV, vrednosti RANGE0, RANGE1 in RANGE2).



NOTE: (1) Disable DCLK (preferably hold LOW) when DXMIT is HIGH.

Slika 18: Branje podatkov iz DDC112 [28, stran 21]

Tipične najvišje izmerjene vrednosti tokov čez fotodiode (prižgana LED dioda z najvišjim odzivom fotodiode, čisto sito) znašajo okoli 0,5 μ A. Vsaka meritev optičnega signala, ki

nastopa v enačbi (7), je v praksi statistični parameter več zaporednih meritev. Tipično število meritev je 10-250, odvisno od časa, ki je na razpolago za meritve. Čas ene meritve naj zato ne bi bil daljši od približno 1 ms, lahko je tudi manjši. Tako bo tudi pri kratki časovni bazi aethalometra reda nekaj sekund še dovolj časa za meritve signalov. S krajšim časom integracije se zmanjša točnost posamezne meritve. V enakem časovnem intervalu je lahko krajših meritev več, vendar čas komunikacije z računalnikom za posamezno meritev ostaja enak in delež časa, namenjen sami meritvi, se zmanjšuje na račun večjega časa za prenos podatkov do računalnika. Statistične metode pri naknadni obdelavi podatkov lahko torej le delno kompenzirajo manjšo točnost posamezne meritve pri seriji več meritev v istem času. Če se za želeni čas integracije izbere 0,5 ms, znaša elektrina, ki odteče iz kondenzatorja v A/D pretvorniku v tem času pri toku 0,5 μA :

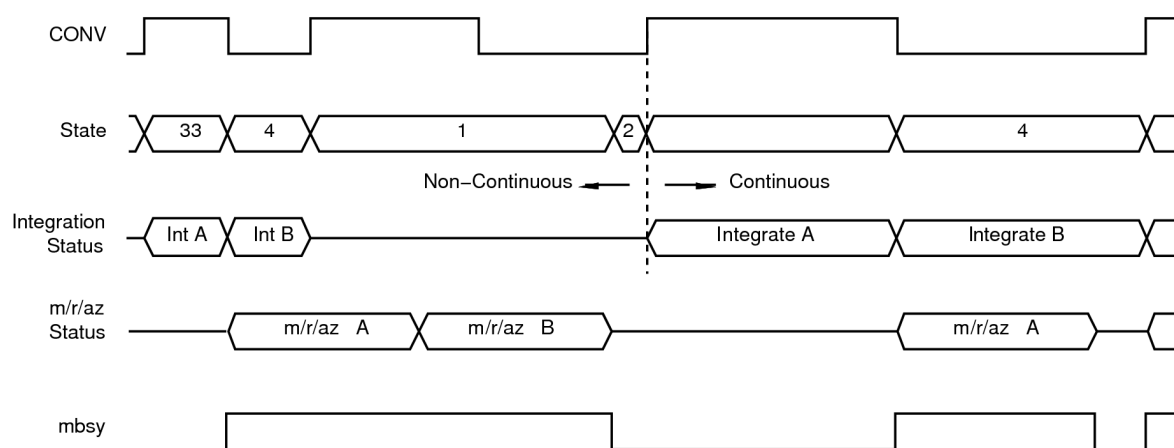
$$Q = I \cdot t = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ s} = 250 \text{ pC} \quad (25)$$

Prekoračitev vrednosti toka čez merilni obseg pomeni neveljavno meritev koncentracije BC, zato je bil izbran obseg 350 pC pri uri 10 MHz in paru števecv Texas Instruments SN74HC4040 kot frekvenčnim delilnikom, ki poveča periodo za faktor 2^N , pri čemer je N vrednost od 1 do 24. Iz želenega časa integracije (polovica povečane periode ure) 0,5 ms se izračuna N po enačbah (26) in (27). N mora biti celo število. Dejanski čas integracije podaja izraz (28).

$$t_i = \frac{1}{f_{ura}} \cdot \frac{1}{2} \cdot 2^N \quad (26)$$

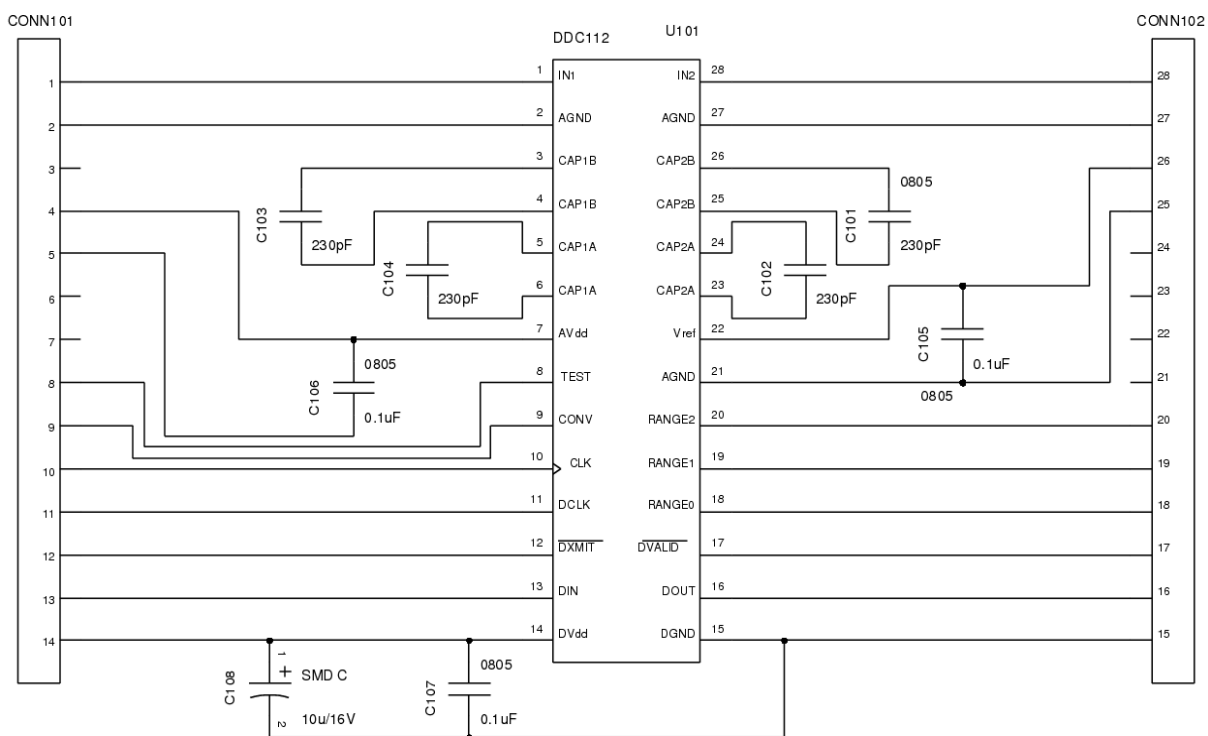
$$N = \log_2(2 \cdot t_i \cdot f_{ura}) = \log_2(2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ s} \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}) = 13.288 \sim 13 \quad (27)$$

$$t_i = \frac{1}{10 \text{ MHz}} \cdot \frac{1}{2} \cdot 2^{13} = 409.6 \mu\text{s} \quad (28)$$



Slika 19: Nestalen in stalen način delovanja DDC112 [28, stran 19]

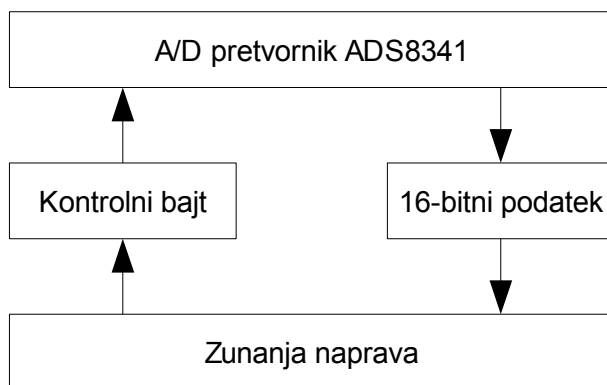
Čas integracije je krajši od časa pretvorbe in priprave na ponovno integracijo obeh kanalov (479,4 μ s pri 10 MHz uri CLK [28, stran 14]). Po integraciji traja A/D pretvorba celotno polovico periode CONV in še nekaj naslednje polovice periode. Zato DDC112 v času vsake polovice periode CONV ne zmore sproti opravljati integracije in pretvorbe ter deluje v nestalnem načinu (noncontinuous mode) [28, stran 13]. Za prehod v stalni način delovanja (continuous mode) bi bilo potrebno povečati čas integracije, vendar so za integratorje že izbrani vgrajeni kondenzatorji z največjimi kapacitivnostmi. Za ohranitev merilnega obsega bi bila torej potrebna uporaba zunanjih kondenzatorjev, pri katerih pa se pričakujejo večja odstopanja v lastnostih (predvsem kapacitivnosti) kot pri vgrajenih kondenzatorjih, ki so nastavljeni med proizvodnjo [28, stran 11], s čimer se doseže podana merilna točnost A/D pretvornika. V vezju na sliki 20 so dodani tudi zunanji kondenzatorji, z vrednostjo na sponkah RANGE0 – RANGE2 pa se izbere bodisi zunanje bodisi vgrajene. Če bi tok čez katerokoli fotodiodo presegel merilno območje, se lahko uporabijo zunanji kondenzatorji za povečanje merilnega obsega, ali pa se uporabijo za ohranitev merilnega obsega pri povečanem času integracije. Čas integracije se v fazi razvoja lahko spreminja s faktorjem potence števila 2 z enostavno spremembo vezave števecv SN74HC4040.



Slika 20: Shema vezja za A/D pretvornik DDC112

Po izkušnjah sodelavcev se DDC101 kvari pogosteje kot ostale komponente, zato je glavni A/D pretvornik ostal na svoji ločeni tiskanini, ki se namesti v podnožje na glavni tiskanini detektorskega vezja. Na tiskanini so skupaj z DDC112 samo še elementi, ki morajo biti zelo blizu čipa: kondenzatorji za stabilizacijo referenčne in napajalnih napetosti in kondenzatorji za zunanje integratorje (slika 20).

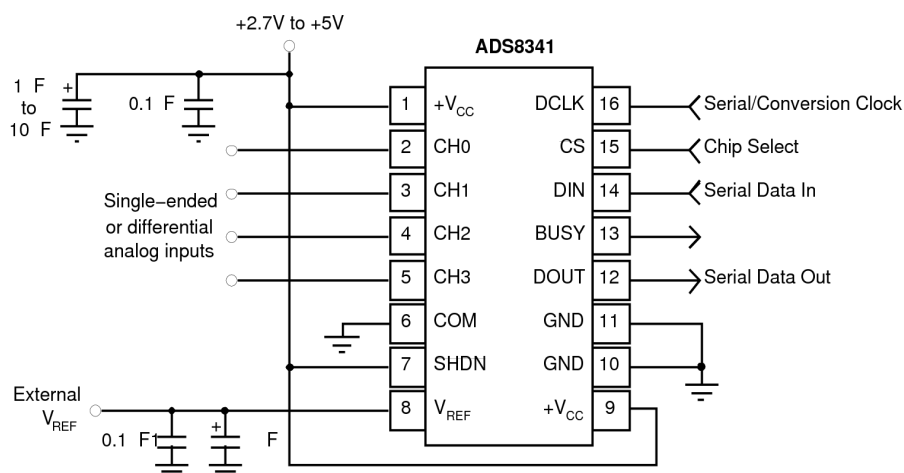
Drugi A/D pretvornik, ADS8341 v SSOP ohišju, deluje s sukcesivno aproksimacijo. Pretvornik se lahko uporabi s štirimi vhodi ali z dvema diferencialnima vhodoma. Pred branjem digitalizirane vrednosti se vanj po serijskem vmesniku na vhod DIN vpiše kontrolni bajt, razložen v tabeli 4.



Slika 21: Prenos podatkov pri vsakem branju iz ADS8341

Tabela 4: Kontrolni bajt A/D pretvornika ADS8341

Bit	Oznaka	Pomen
7 (MSB)	S	Začetni bit, visoko stanje.
6	A2	Izbira kanala.
5	A1	
4	A0	
3	-	Neuporabljen.
2	SGL/DIF	Visoko stanje – 4 vhodi glede na maso. Nizko stanje – 2 diferencialna vhoda.
1	PD1	Ugašanje A/D pretvornika med pretvorbami ali izbira notranje ure s PD1 v visokem in PD0 v nizkem stanju.
0 (LSB)	PD0	

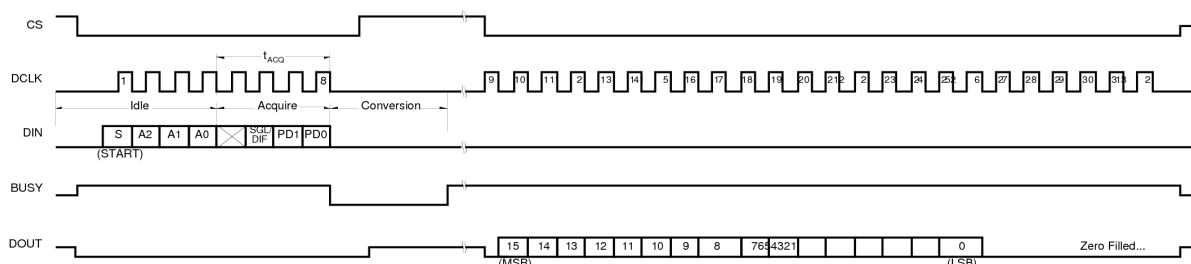


Slika 22: A/D pretvornik Texas Instruments ADS8341 [31, stran 11]

PIN	NAME	DESCRIPTION
1+	V _{CC}	Power Supply, 2.7V to 5V
2	CH0	Analog Input Channel 0
3	CH1	Analog Input Channel 1
4	CH2	Analog Input Channel 2
5	CH3	Analog Input Channel 3
6	COM	Ground Reference for Analog Inputs. Sets zero code voltage in single-ended mode. Connect this pin to ground or ground reference point.
7	$\overline{\text{SFDN}}$	Shutdown. When LOW, the device enters a very low power shutdown mode.
8V	V _{REF}	Voltage Reference Input. See Electrical Characteristics Table for ranges.
9+	V _{CC}	Power Supply, 2.7V to 5V
10	GND	Ground. Connect to Analog Ground
11	GND	Ground. Connect to Analog Ground.
12	DOUT	Serial Data Output. Data is shifted on the falling edge of DCLK. This output is high impedance when $\overline{\text{CS}}$ is HIGH.
13	BUSY	Busy Output. This output is high impedance when $\overline{\text{CS}}$ is HIGH.
14	DIN	Serial Data Input. If $\overline{\text{CS}}$ is LOW, data is latched on rising edge of DCLK.
15	$\overline{\text{CS}}$	Chip Select Input. Controls conversion timing and enables the serial input/output register.
16	DCLK	External Clock Input. This clock runs the SAR conversion process and synchronizes serial data I/O. Maximum input clock frequency equals 2.4MHz to achieve 100kHz sampling rate.

Slika 23: Opis priključkov ADS8341 [31, stran 2]

S sponkama PD1 in PD0 je izbrana notranja ura za pretvorbo s sukcesivno aproksimacijo. Zunanja ura DCLK je uporabljena samo za komunikacijo z zunanjo napravo.



Slika 24: Signali med branjem iz ADS8341 pri notranji uri [31, stran 14]

Tabela 5: Kontrolni bajt in izbira kanala med nediferencialnimi vhodi ADS8341

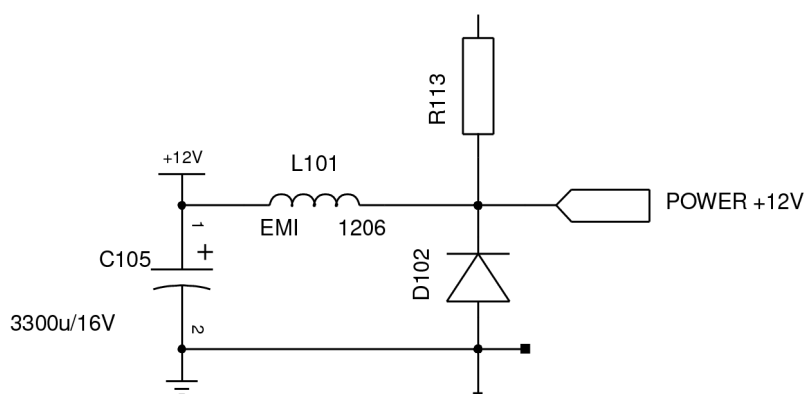
Kanal	A2	A1	A0	Kontrolni bajt (dvojiška vrednost)	Kontrolni bajt (šestnajstiška vrednost)
CH0	0	0	1	10011110	9E
CH1	1	0	1	11011110	DE
CH2	0	1	0	10101110	AE
CH3	1	1	0	11101110	EE

Pri nediferencialnih vhidih in ozemljeni COM sponki je merilni obseg od 0 V do napetosti

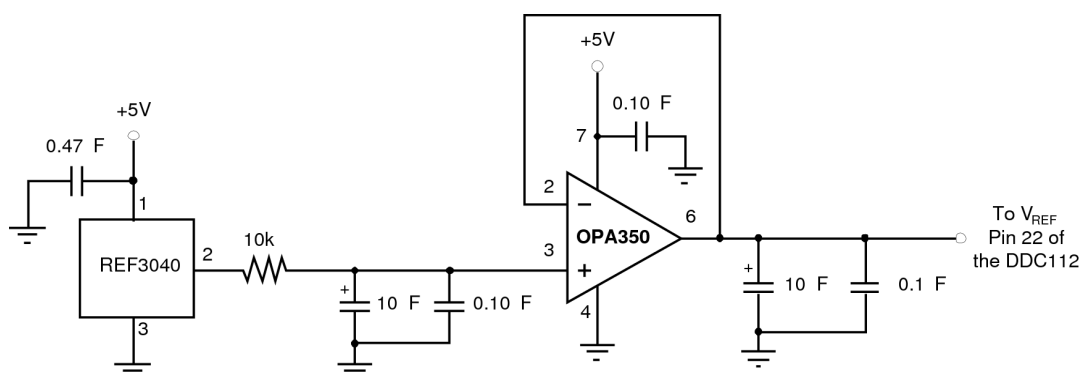
V_{REF} [31, stran 12]. Napetostni izhod merilnika pretoka se pretvori iz območja 0-5 V na nižje območje z napetostnim delilnikom (slika 29 v poglavju 4.1.2.3).

4.1.2.2 Napajalne in referenčne napetosti

Napajalna napetost starega vezja niha za okoli 100 mV (tabela 16 v poglavju 6.3). Poizkus stabilizacije s feritom in kondenzatorjem prikazuje slika 25. Napajalna napetost za A/D pretvornik DDC112 je prav tako stabilizirana s feritom (slika 29 na strani 45).



Slika 25: Stabilizacija napajanja detektorskega vezja



Slika 26: Referenčna napetost za DDC112 [28, stran 11]

Referenčna napetost V_{ref} za DDC112 je realizirana z vezjem, ki je predlagano v specifikaciji izdelka in je predstavljeno na sliki 26. Element REF3040 daje na izhodu napetost 4,096 V. Operacijski ojačevalnik zagotavlja stabilno napetost tudi pri povečanem toku med polnjenjem kondenzatorjev A/D pretvornika DDC112. Visokofrekvenčna nihanja zmanjša nizkoprepustni

filter med REF3040 in operacijskim ojačevalnikom. Podobno vezje z elementom REF3040 ustvari referenčno napetost za ADS8341. A/D pretvornika imata enaki, a ločeni referenci.

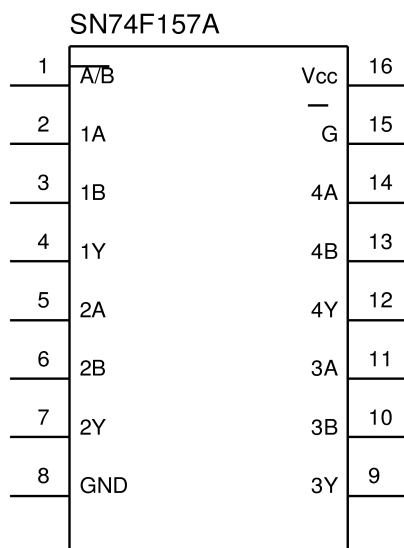
4.1.2.3 Multipleksiranje signalov

Z uvedbo dodatnega A/D pretvornika je naraslo število linij za komunikacijo z računalnikom. Sorodne digitalne izhode obeh A/D pretvornikov se združi z multiplekserjem, sorodne vhode pa z demultiplekserjem, kot je podano v tabeli 6. Za izbiro aktivnega A/D pretvornika se uporabi signal CS čipa ADS8341, ki bi bil uporabljen v vsakem primeru.

Tabela 6: Združevanje digitalnih signalov A/D pretvornikov

Par združenih vhodov v A/D pretvornik		Par združenih izhodov iz A/D pretvornika	
DDC112	ADS8341	DDC112	ADS8341
DCLK	DCLK	$\overline{\text{DVALID}}$	BUSY
$\overline{\text{DXMIT}}$	DIN	DOUT	DOUT

Izhode A/D pretvornikov združuje štirikratni multiplekser Texas Instruments SN54F157A. Multiplekserji so na sponkah 2-4, 5-7, 9-11 in 12-14 (slika 27).

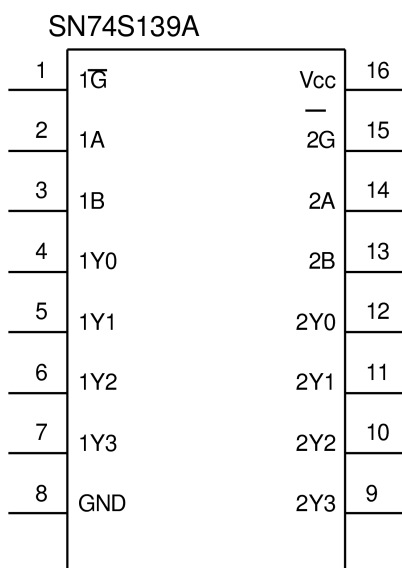


Slika 27: Multiplekser SN54F157A

Tabela 7: Pravilnostna tabela multiplekserja SN54F157A

Vhodi				Izhod
\overline{G}	$\overline{A/B}$	A	B	Y
1	X	X	X	0
0	0	0	X	0
0	0	1	X	1
0	1	X	0	0
0	1	X	1	1

Vhode A/D pretvornikov združuje dvojni demultiplekser Texas Instruments SN74S139A. Demultiplekserja se nahajata na sponkah 2-7 in 9-14 (slika 28).

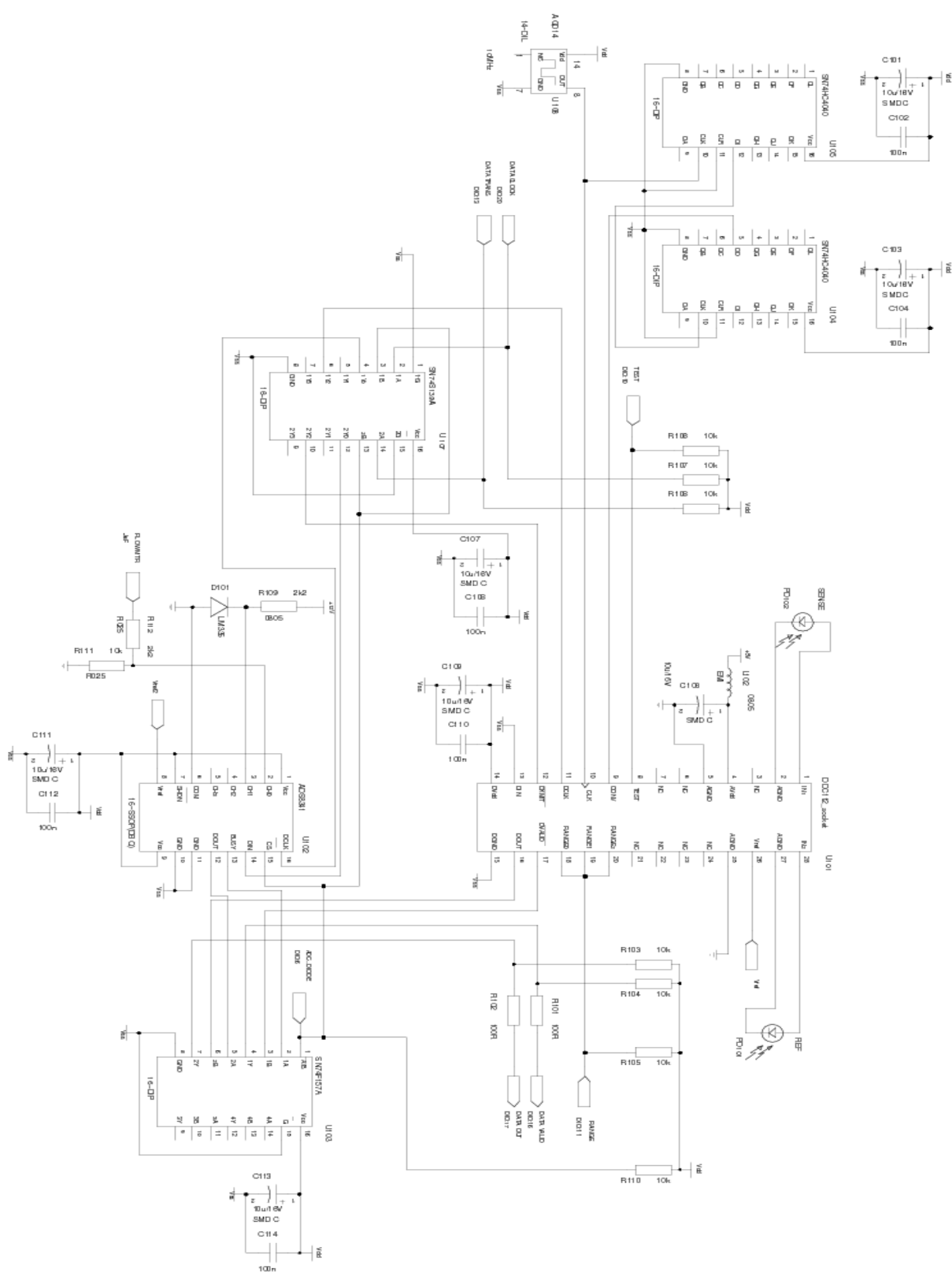


Slika 28: Demultiplekser SN74S139A

Tabela 8: Pravilnostna tabela demultiplekserja SN74S139A

Vhodi			Izhodi			
Omogočen	Izbira					
\overline{G}	B	A	Y0	Y2	Y2	Y3
1	X	X	1	1	1	1
0	0	0	0	1	1	1
0	0	1	1	0	1	1
0	1	0	1	1	0	1
0	1	1	1	1	1	0

Shema opisanega glavnega dela vezja je prikazana na sliki 29. Večina komponent v detektorskem vezju je v prvi fazi razvoja zaradi lažjega testiranja ostala v PDIP ohišju, kasneje pa so bile zamenjane s komponentami v SMD ohišju.



Slika 29: Glavni del detektorskega vezja

4.2 Računalnik

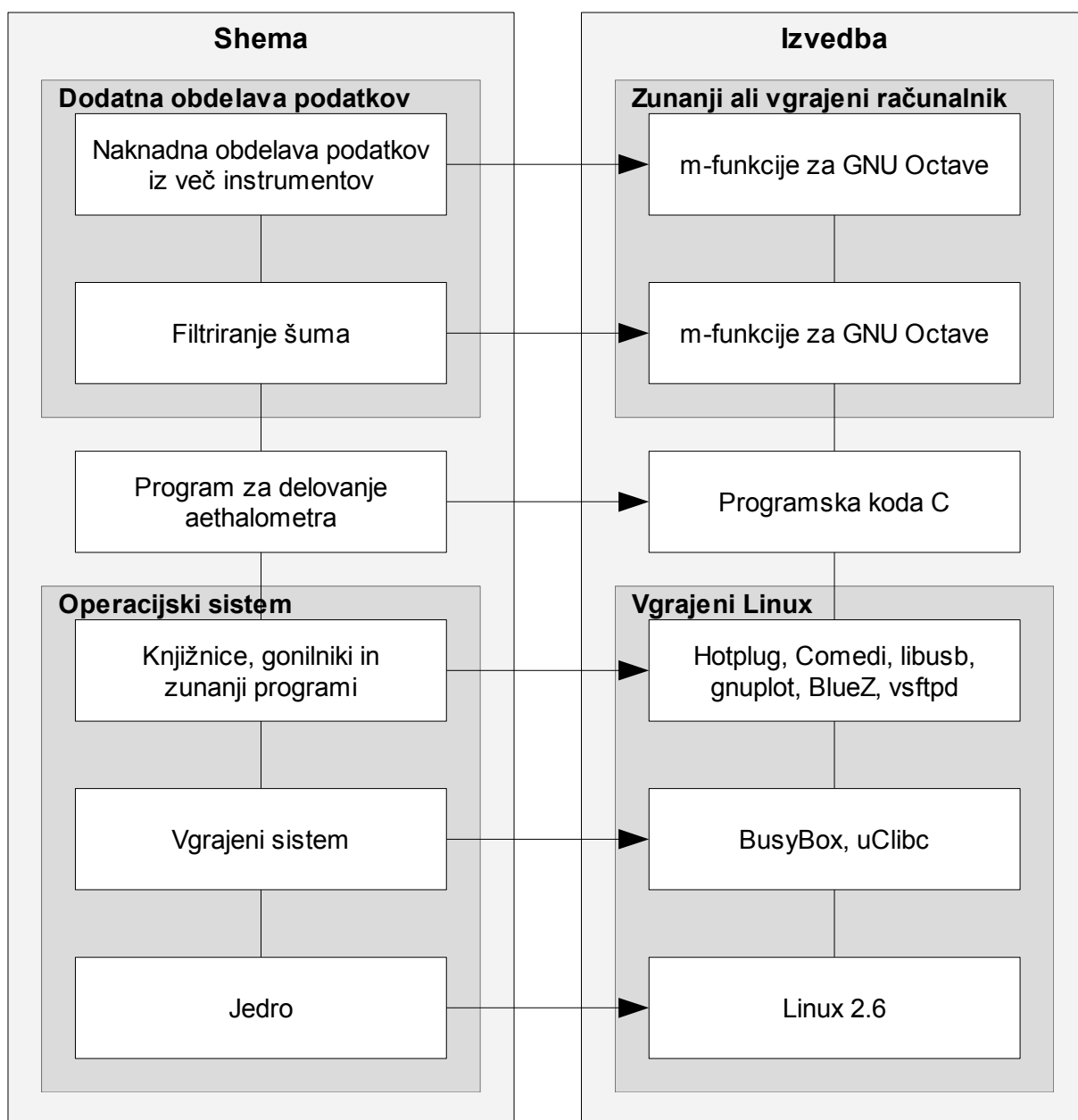
Računalnik je zamenjan z novejšim, ki izpolnjuje zahteve za posodobljen instrument:

- 24 kanalni digitalni vhodno-izhodni vmesnik (DIO, GPIO),
- serijska vrata,
- USB host vmesnik,
- Ethernet vmesnik,
- ura (real time clock),
- podpora za čim več operacijskih sistemov, obvezno Linux (vanilla kernel),
- zagon sistema iz spominske kartice,
- nizka poraba, pasivno hlajenje,
- majhne mere.

Izbran je bil računalnik WinSystems EPX-C3. Po velikosti (form factor) je tipa EPIC. Računalnik ima 733 MHz VIA C3 procesor in čip Intel 82C55A za GPIO, s katerim je možno komunicirati direktno preko naslovnega prostora ali pa s prostim gonilnikom Comedi [32]. Digitalni izhodi so dovolj močni, da ne potrebujejo dodatnega ojačevalnika. Nekateri DIO vmesniki imajo visoko izhodno stanje izvedeno s pull-up uporom, kar je manj primerno. Slabost čipa 82C55A je grupacija vhodov/izhodov v skupine po štiri, ki se jim smer lahko določa samo vsem hkrati. Zagon sistema lahko poteka iz Compact flash (CF) medija. Za testiranje in razvoj sta uporabna še vmesnika IDE in VGA. Zlasti slednji se je izkazal za zelo koristnega. Cena računalnika je visoka (okoli 500 \$), a za načrtovane majhne serije instrumentov z visoko dodano vrednostjo to ni odločilnega pomena.

5. Programska oprema

Celotna programska oprema zajema naslednje sklope: operacijski sistem, program za delovanje aethalometra, obdelava meritev. Hierarhija sklopov s praktično izvedbo je prikazana na sliki 30. Na dnu se nahajajo najosnovnejši sklopi. Višje so sklopi, ki temeljijo na nižjih – bodisi uporabljajo izhodne podatke nižjih sklopov bodisi neposredno uporabljajo nižje sklope.



Slika 30: Shema celotne programske opreme

Na vgrajenem Linux operacijskem sistemu z dodatnimi gonilniki, knjižnicami in zunanjimi programi teče posebna aplikacija, ki krmili delovanje aethalometra ter računa in prikazuje koncentracijo BC in ostale podatke iz meritev. Ti izhodni podatki aethalometra se lahko naknadno obdelajo z namenom zmanjševanja šuma ali pridobivanja dodatnih informacij iz časovnih signalov več aethalometrov. Dodatna obdelava podatkov presega obseg tega dela in je samo omenjena kot možen dodatek aethalometrom, ki zaključuje celotno programsko opremo.

Opisana programska oprema naj bi v celoti nadomestila starejši v Basic-u napisani program, ki se izvaja v okolju DOS in ne podpira sodobnejših načinov prenosa podatkov. Dodatna razloga za prehod na popolnoma nov sistem sta tudi čedalje manjša podpora za DOS pri novih vgrajenih računalnikih in novo detektorsko vezje, ki v vsakem primeru zahteva vsaj popravke v programski opremi.

5.1 Vgrajeni Linux

Vgrajeni Linux (Embedded Linux) je splošen pojem, ki lahko pomeni katerikoli operacijski sistem z Linux jedrom, ki je prilagojen za manjše naprave, kot so vgrajeni računalniki, dlančniki in mobilni telefoni. V primerjavi z najbolj razširjenimi GNU/Linux distribucijami za namizne računalnike je tu nameščen sistem bistveno manjši in ima manj stroge zahteve glede zmogljivosti strojne opreme. Iz jedra so izločeni nepotrebni moduli. Knjižnica GNU C Library (glibc) je nadomeščena z manjšo, npr. uClibc, dietlibc ali newlib. Paket GNU Core Utilities (Coreutils) je nadomeščen z manjšo aplikacijo, na primer BusyBox [33]. Od ostalih paketov so namešчени samo nujno potrebni. Kljub temu praviloma ni potrebe po spremembi izvorne kode Linuxa in se lahko uporabi t.i. vanilla kernel¹¹ brez popravkov, razen če spremembe zahteva posebna strojna oprema ali če želimo bolj determinističen odziv na prekinitve, večji nadzor in večjo prioriteto izvajanja procesa. V tem primeru možno rešitev ponujajo projekti RTAI [34], Adeos [35] in Xenomai [36], s katerimi se lahko naredi t.i. real-time Linux jedro. Za aethalometer to ni potrebno, ker komunikacija z elektroniko deluje tudi z nespremenjenim jedrom.

Za ta projekt je bilo uporabljeno jedro Linux 2.6.10 v izvorni (vanilla) obliki in s konfiguracijo

¹¹ Vanilla kernel - originalna, nespremenjena izvorna koda Linux jedra, ki jo ponuja Linus Torvalds.

proizvajalca vgrajenega računalnika WinSystems. Iz konfiguracije je bila pred prevajanjem odstranjena podpora za zvok, dodane pa so bile opcije:

```
CONFIG_BLK_DEV_FD=y
CONFIG_BT=y
CONFIG_BT_BNEP=y
CONFIG_BT_HCIUSB=y
CONFIG_FB=y
CONFIG_FB_MODE_HELPERS=y
CONFIG_FB_VESA=y
CONFIG_FB_I810=y
CONFIG_FB_I810_GTF=y
CONFIG_FB_INTEL=y
CONFIG_FRAMEBUFFER_CONSOLE=y
CONFIG_USB_OHCI_HCD=m
CONFIG_USB_UHCI_HCD=m
CONFIG_USB_ALI_M5632=y
CONFIG_USB_AN2720=y
CONFIG_USB_BELKIN=y
CONFIG_USB_GENESYS=y
CONFIG_USB_NET1080=y
CONFIG_USB_PL2301=y
CONFIG_USB_KC2190=y
CONFIG_IDE_GENERIC=y
CONFIG_BLK_DEV_IDEPNP=y
CONFIG_BLK_DEV_GENERIC=y
CONFIG_BLK_DEV_AMD74XX=y
CONFIG_NLS_CODEPAGE_437=y
CONFIG_NLS_IS08859_1=y
```

Spremembe so namenjene uporabi disketne enote, komunikaciji (Bluetooth, USB), t.i. framebuffer-ju¹², kompatibilnosti jedra tudi z vgrajenim računalnikom WinSystems EPX-GX500¹³ in podpori dolgim imenom datotek na datotečnem sistemu VFAT. Posamezne opcije so podrobneje dokumentirane v grafičnem vmesniku med konfiguriranjem jedra, ko se požene „make xconfig“.

Ostali segmenti operacijskega sistema, ki jih je bilo potrebno pripraviti in prevesti, so še Comedi, module-init-tools, setserial, System V init, demona syslogd in klogd, hotplug [37],

¹² Framebuffer ali FB – Video naprava, oziroma vmesnik, ki prikazuje sliko na zaslon iz pomnilnika, kjer je predhodno shranjena celotna slika. Linux FB je pogosto uporabljen kot nadomestek pravega grafičnega vmesnika, kot sta X.Org in Xfree86, za prikaz grafike v tekstovnem načinu.

¹³ Računalnik, ki bi lahko bil uporabljen namesto EPX-C3.

BusyBox [33] s podporo za lokalizacijo (locale support) in GNU GRUB [38] z onemogočeno podporo za vse datotečne sisteme, z izjemo ext2. Hotplug je potreben samo za detekcijo in klasifikacijo priklopljenih USB naprav. Samega demona hotplug se ne uporabi, temveč se potrebne module ohci-hcd, sd_mod in 8255 zaradi hitrejšega zagona sistema naloži eksplicitno v /etc/modules. V datoteko /etc/hotplug/usb/aethalometer.usermap se vpiše identifikacijske kode vseh USB naprav, ki naj bi bile uporabljane v aethalometru. Zraven vsake kode se določi dejanje (skript), ki naj se samodejno izvede, ko uporabnik priklopi napravo. Primeri:

```
# Syntax: script_to_run match_flags idVendor idProduct ...
#
# Belkin USB Direct Connect; usbnet cable.
# Matched by idVendor and idProduct.
host2host_usbnet 0x0003 0x050d 0x0004 0x0000 0x0000 0x00 0x00 \
                 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00000000
#
# Any Bluetooth USB device
# Matched by bDeviceClass, bDeviceSubClass and bDeviceProtocol.
bluetooth-start.sh 0x0070 0x0000 0x0000 0x0000 0x0000 0xE0 0x01 \
                  0x01 0x00 0x00 0x00 0x00000000
#
# Any mass storage device. Matched by bInterfaceSubClass.
mass-storage.sh 0x0080 0x0000 0x0000 0x0000 0x0000 0x0000 \
               0x0000 0x0000 0x0008 0x0000 0x0000
```

Ko uporabnik priklopi USB host2host kabel zgornjega proizvajalca in tipa, se izvede skript host2host_usbnet, ki nastavi IP povezavo med dvema USB gostiteljema (IP over USB). Ko uporabnik priklopi katerikoli Bluetooth USB vmesnik, se izvede bluetooth-start.sh, ki pripravi aethalometer na Bluetooth povezavo z drugo stranjo (s t.i. gospodarjem piko-omrežja). Zatem se nastavi povezava IP po Bluetooth (IP over Bluetooth). Vse mrežne storitve aethalometra so s tem na voljo tudi po USB ali Bluetooth povezavi. Hotplug na podoben način zazna vstavljanje kateregakoli USB ključa ali druge USB naprave za shranjevanje podatkov, npr. bralnika pomnilniških kartic, nato pa izvede sledeči skript, ki pošlje procesu z imenom „aethalometer“ signalUSR1, da lahko proces samodejno prepíše datoteke z meritvami na vstavljen medij:

```
# idVendor/idProduct/bcdDevice of the built-in mass storage device
# Memory card & floppy combo drive
```

```
BUILT_IN_STORAGE=7cc/301/5

if [ "$PRODUCT" != "$BUILT_IN_STORAGE" ]; then
    echo `date` " USB stick" >>/var/log/storage.log
    killall -USR1 aethalometer
fi
```

Računalniku priloženi skript `make_els_rootfs.sh` ustvari osnovne imenike (`/bin`, `/boot`, `/dev`, ...), v njih skopira prej pripravljene segmente sistema in ustvari večino posebnih datotek za naprave (device node). Za večjo hitrost in za vgrajene sisteme na flash pomnilniku je namreč bolj primerna statična mapa `/dev` namesto modernejših rešitev `devfs` ali `udev`, kjer bi se datoteke naprav ustvarjale in brisale samodejno. Manjkajoče datoteke naprav se ustvari ročno z ukazom `mknod`:

```
mknod -m 660 /dev/hdc2 b 22 2
mkdir /dev/pts
mknod -m 666 /dev/pts/0 c 136 0
mknod -m 666 /dev/pts/1 c 136 1
mknod -m 666 /dev/pts/2 c 136 2
mknod -m 666 /dev/fb0 c 29 0
```

Imenik `/var/log`, ki je predviden za pogosto spreminjajoče se datoteke, je na datotečnem sistemu tipa `tmpfs`, ki se nahaja v virtualnem pomnilniku. Pomnilniška kartica CF vsebuje dva razdelka z datotečnim sistemom `ext2`. Na enem je operacijski sistem, ki je vedno priklopljen na imenik `/` v načinu samo za branje. Drugi razdelek je priklopljen na `/home`, kjer se nahaja program za delovanje aethalometra s svojimi pripadajočimi datotekami (konfiguracija, prevodi, ...). Skupna velikosti datotek na tem razdelku je manj kot 1 MB. Razdelek se po potrebi začasno preklopi v način za pisanje. Integriteta operacijskega sistema je tako zagotovljena tudi ob nenadnem izklopu napajanja. Če pride do izklopa napajanja ravno v trenutku, ko se izvaja pisanje na drugi razdelek, skript za ukazno vrstico ob ponovnem zagonu v primeru, da katerakoli datoteka iz določenega seznama manjka ali je poškodovana, vse datoteke samodejno prepíše s privzetimi.:

```
#!/bin/sh

LIST="aethalometer aethalometer.conf aethalometer.status"

function restore {
    mount -o remount,rw /home && \
```

```
cp -af /usr/local/backup/* /home/aeth
echo `date` " aethalometer files reverted" >>/home/aeth/revert.log
mount -o remount,ro /home
exit
}

for FILE in $LIST; do
    if [ ! -e $FILE ]; then
        restore
    fi
done

md5sum -c </home/aethalometer.md5
if [ $? -ne 0 ]; then
    restore
fi
```

Dodatno so kot knjižnice za grafični prikaz nameščeni SDL (brez podpore za zvok in strežnik X), zlib, libpng in SDL_image (kasneje bi se lahko alfanumerični zaslon zamenjal z barvnim grafičnim). Za prenos podatkov (kopiranje meritev, nadgradnja programa, pregled nastavitvev in stanja, kasneje naj bi bilo možno tudi spreminjanje nastavitvev in vodenje) po Ethernet omrežju, USB ali Bluetooth povezavi so nameščeni libusb, vsftpd [39], bluez-libs [40] in bluez-utils [40]. Za generiranje grafičnega prikaza časovnega poteka koncentracije delcev v realnem času je z močno okrnjeno konfiguracijo preveden program Gnuplot [41]:

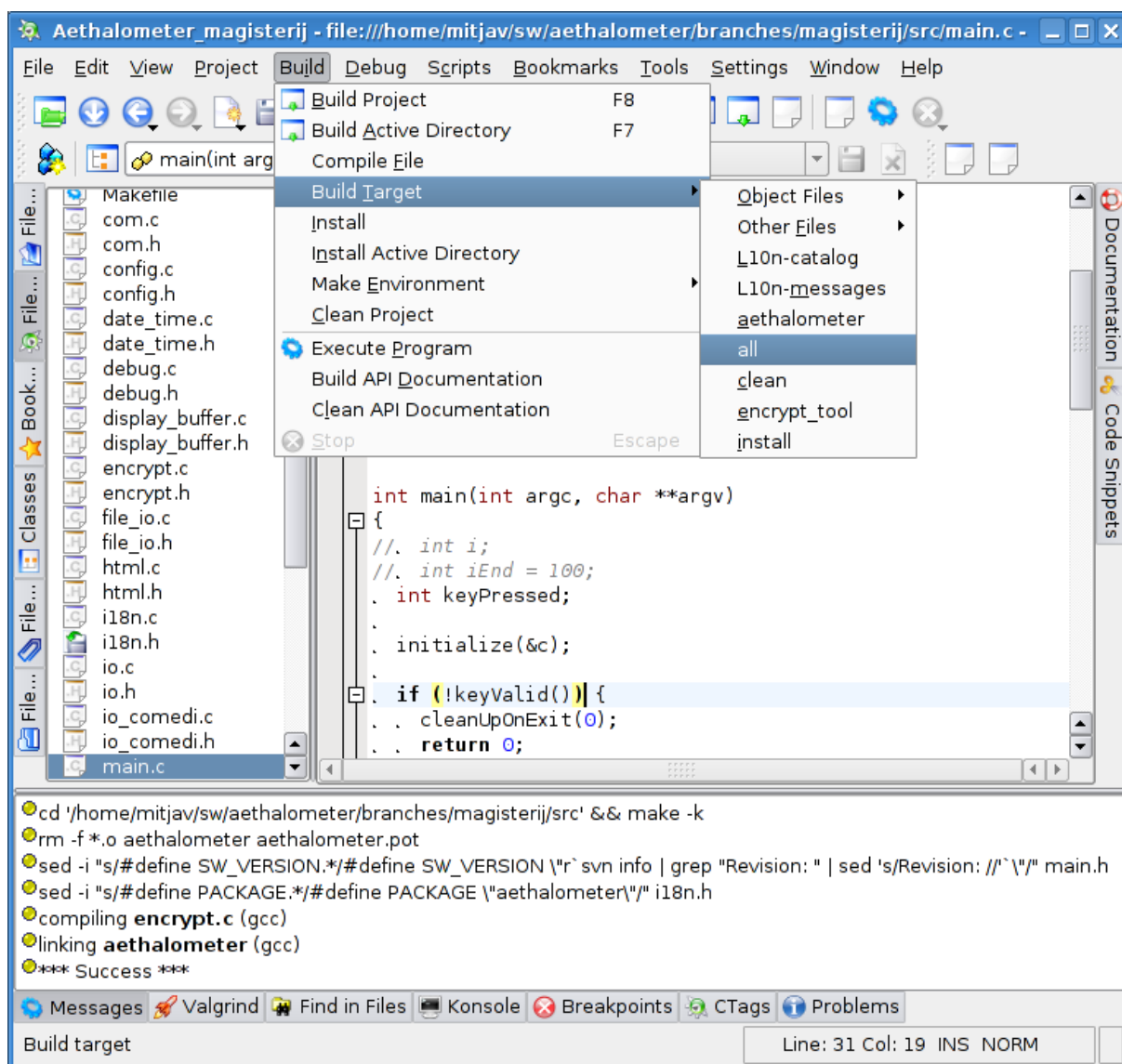
```
./configure --without-gd --without-x --without-jpeg --without-lisp-files --disable-pm3d
--disable-filledboxes --disable-relative-boxwidth --disable-defined-var --disable-fiterrvars --
without-tutorial
```

Slike časovnega poteka koncentracije BC na programsko ustvarjenih HTML straneh streže minimalističen spletni strežnik thttpd [42]. Oddaljena prijava je možna s storitvijo TELNET. Celoten operacijski sistem z dodanimi programi zavzema 30 MB prostora.

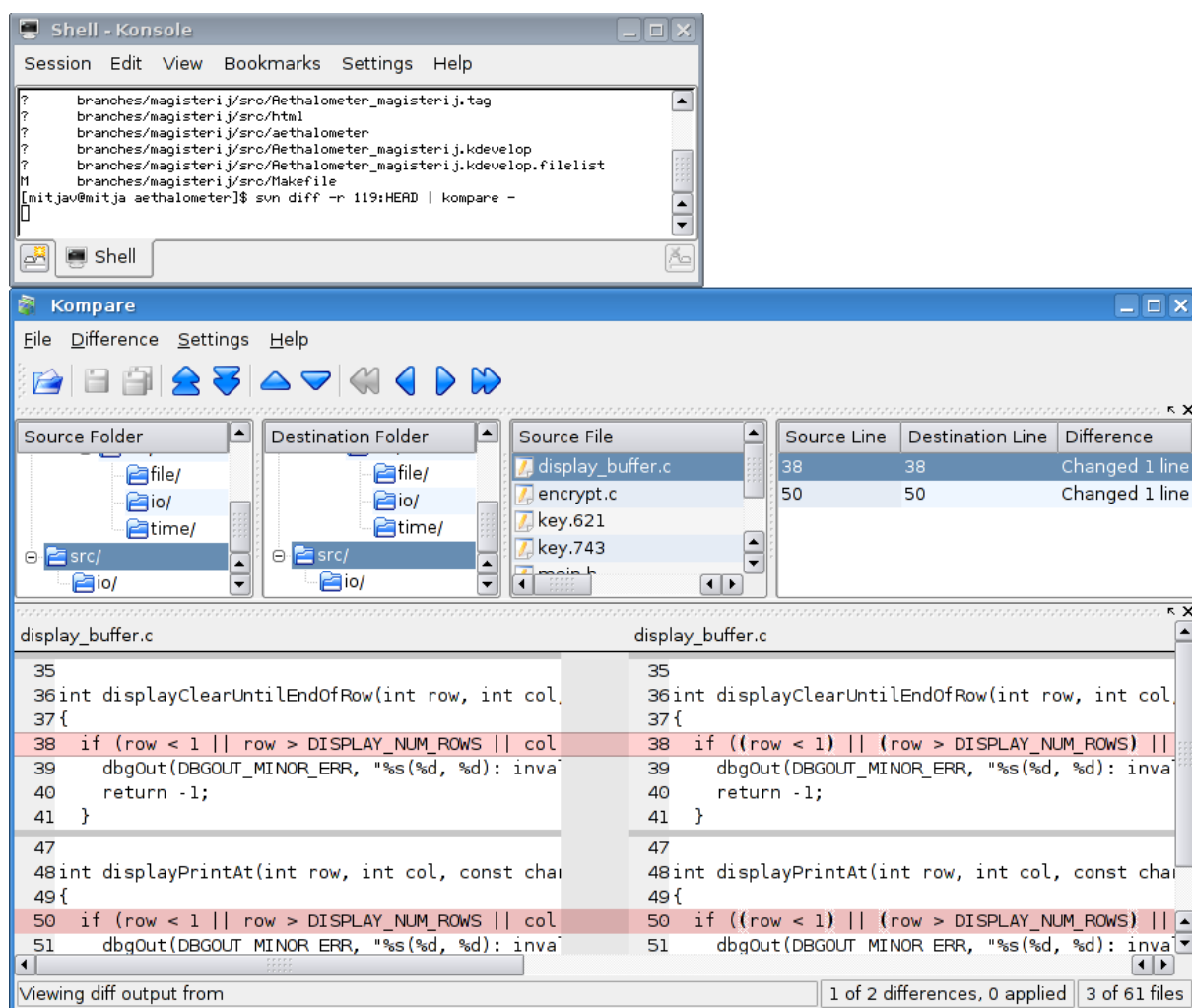
5.2 Program za delovanje aethalometra

Program za upravljanje aethalometra je napisan v programskem jeziku C z razvojnim okoljem KDevelop [43]. Programska koda je dokumentirana s komentarji, kompatibilnimi z Doxygen [44], ki samodejno ustvari dokumentacijo v HTML, XML, LaTeX in drugih oblikah. Za

upravljanje z različnimi programske kode in ostalih pripadajočih datotek skrbi orodje Subversion [45] s pregledovalnikom Kompare (del namiznega okolja KDE).



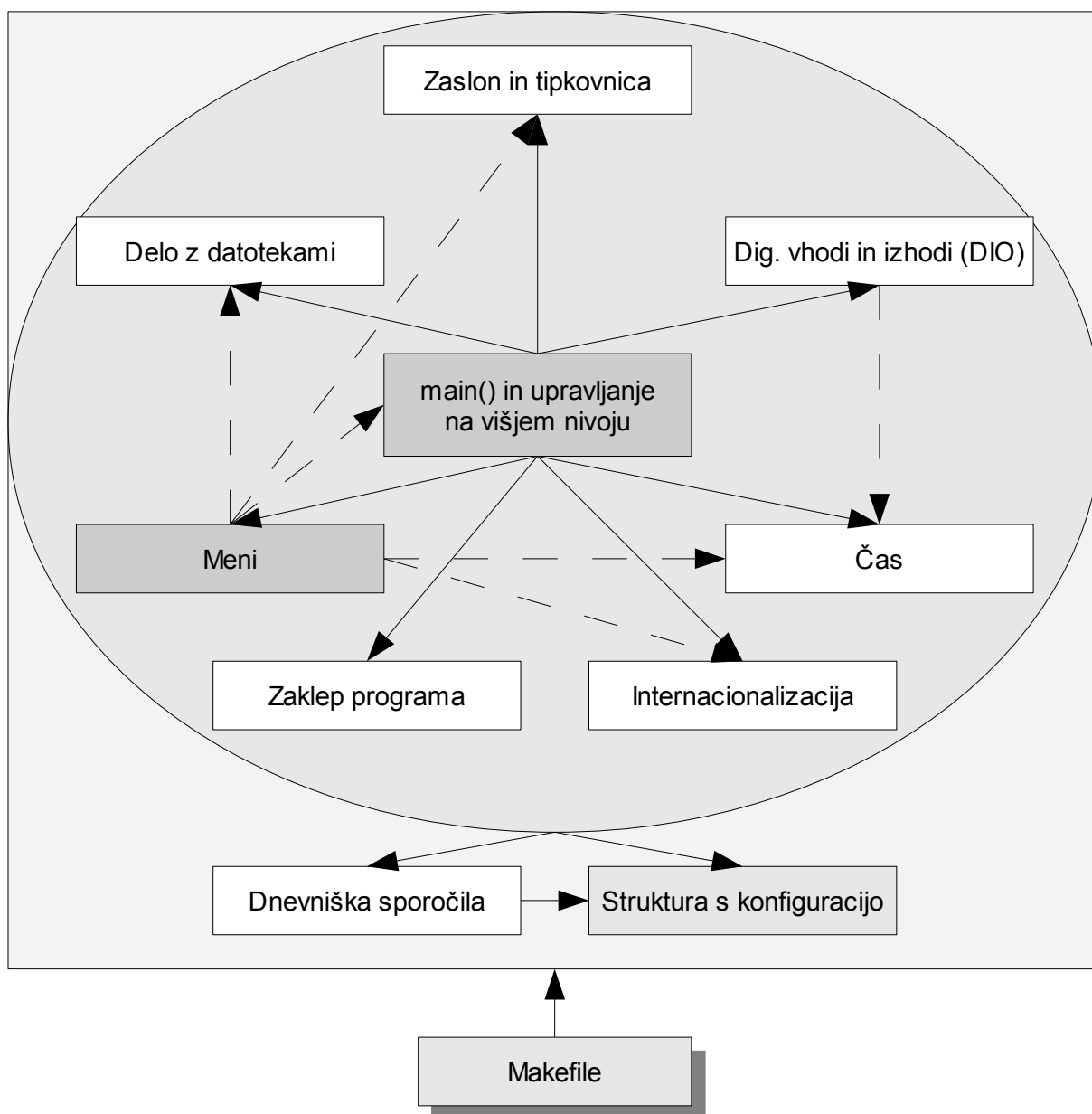
Slika 31: Razvojno okolje KDevelop



Slika 32: Sledenje različicam s Subversion in grafičnim pregledovalnikom Kompare

Logično shemo programske kode prikazuje slika 33. Napisani so ločeni moduli za upravljanje s posameznimi segmenti sistema na nižjem nivoju: vmesnik do datotečnih sistemov, zaslon s tipkovnico, digitalni vhodno-izhodni vmesnik, datum in čas, podpora za prikaz besedila in števil v lokalnem jeziku, ter zaklep delovanja programa po določenem datumu. Omenjene module neposredno uporablja vmesnik višjega nivoja, ki je realiziran s funkcijo `main()` in ostalimi makroji, strukturami in funkcijami, ki uporabljajo vmesnike nižjega nivoja. Zaradi obsežnosti je posebej realiziran vmesnik za meni, ki se prikazuje na zaslonu med delovanjem programa, sicer pa tudi ta vmesnik predstavlja upravljanje na višjem nivoju. Vsi moduli uporabljajo globalno definirano strukturo, v kateri je zapisana celotna konfiguracija programa, in sistem dnevniških sporočil, ki sproti zapisuje napake, lokacijo in stanje izvajanja programa. Prevajanje izvorne kode in izgradnjo vseh za izvajanje potrebnih datotek določa ročno

napisana datoteka Makefile.



Slika 33: Modularizacija programske kode

5.2.1 Dnevniška sporočila

Opis trenutnega dogajanja se kot navadno besedilo sproti izpisuje na standardni izhodni tok za napake (stderr). Pri samodejnem zagonu programa se tok preusmeri v ustrezno datoteko:

```
./aethalometer 2>>/var/log/aethalometer.log
```

Izpis je izveden z makrojem, ki kot parametre sprejme stopnjo kritičnosti sporočila in spremenljivo število uporabniških parametrov:

```
#define dbgOut(level, ...) debugOutput(level, __FILE__, __LINE__, __VA_ARGS__)
```

Funkcija debugOutput() samodejno prejme parametre makroja in dodatna parametra ime izvorne datoteke in številka vrstice, ki se dodata vsakemu izpisu, če to zahteva konfiguracija programa.

Tabela 9: Stopnje kritičnosti za dnevniški izpis

Stopnja kritičnosti	Makro	Opis
1	DBGOUT_FATAL_ERR	Napaka, zaradi katere program ne more nadaljevati izvajanja.
2	DBGOUT_MAJOR_ERR	Večja napaka
3	DBGOUT_MINOR_ERR	Manjša napaka
4	DBGOUT_NORMAL_OP	Ključen dogodek (milestone)
5	DBGOUT_VERBOSE	Srednje pomemben dogodek
6	DBGOUT_MORE_VERBOSE	Manj pomemben dogodek
7	DBGOUT_EVERYTHING	Obroben dogodek, npr. vstop v <i>vsako</i> funkcijo.

Če s konfiguracijo ni določeno drugače, se parameter level skupaj s sistemskim časom doda vsakemu izpisu kot naravno število v oglatih oklepajih. Izpišejo se samo sporočila, ki so enako ali bolj kritična od izbrane stopnje v konfiguraciji programa. Iz dnevniške datoteke se lahko kasneje s standardnim Unix pripomočkom „grep“ izlušči sporočila določene stopnje kritičnosti. Primer: izpis vseh sporočil, katerih stopnja kritičnosti je od 1 do 3, kar ustreza vsem napakam, da ukaz:

```
grep "\[1-3]" /var/log/aethalometer.log
```

Makro dbgOut se kliče podobno kot funkcijo printf(), s stopnjo kritičnosti kot dodatnim parametrom. Spodaj sta primera navedbe trenutne funkcije s parametri in opis manjše napake.

```
dbgOut(DBGOUT_EVERYTHING, "%s(%d, %d)", __FUNCTION__, row, col);
dbgOut(DBGOUT_MINOR_ERR, "row = %d (out of range)", row);
```

Primer dnevniškega izpisa polurnega delovanja pri nastavljeni stopnji 6 je v prilogi 8.1.

5.2.2 Delo z datotekami in konfiguracija programa

Modul za delo z datotekami je razdeljen na segmente za:

- splošno delo z datotečnimi sistemi in datotekami,
- branje in zapis konfiguracije programa,
- branje in zapis stanja naprave,
- ustvarjanje strani za spletni vmesnik.

5.2.2.1 Splošno delo z datotečnimi sistemi in datotekami

Za shranjevanje podatkov naj bi imel novejši aethalometer disketno enoto, v kateri je vgrajen tudi bralnik pomnilniških kartic. V nastavitvah izbrano napravo program med inicializacijo priklopi na /mnt/storage. Podprta datotečna sistema sta VFAT in ext2. Priklopljena naprava in datotečni sistem na njej sta od priklopa naprej programu nevidna in nepomembna. Rezultati meritev se zapisujejo enostavno v mapo /mnt/storage.

Rezultati meritev so zapisani v navadnih besedilnih datotekah z vrednostmi, ločenimi z vejico (CSV). Konec vrstice je tipa CR + LF, ki je v uporabi v operacijskih sistemih Microsoft Windows. Spodaj je prikazan primer za eno-kanalni aethalometer s časovno bazo 10 minut. V vsaki vrstici so zapisani datum, čas, koncentracija BC v ng/m^3 , pretok v L/min, signali fotodiod (s_z , s_b , r_z , r_b), časovni delež delovanja s pretokom skozi sito¹⁴ in prirastek atenuacije glede na atenuacijo po zadnjem premiku traku.

```
"20-Feb-02", "05:20:30", 442, 2.00, 0.001831, 2.981172, 0.001684, 3.390167, 1.00, 0.293677  
"20-Feb-02", "05:30:30", 787, 2.00, 0.001831, 2.962453, 0.001684, 3.386522, 1.00, 0.816300
```

Ko uporabnik v USB vtičnico vstavi napravo za shranjevanje in program prestreže signal USR1 (glej stran 50 v poglavju 5.1), se datoteke z rezultati meritev prepisejo na vstavljeno napravo. V ta namen se med inicializacijo programa določi funkcija, ki prestreže signal (signal handler) in izvede prepis:

```
signal(SIGUSR1, copyToUsbStickAndShow);
```

Uspešen prepis in odklop naprave javi kratek pisk, napako pa štirje zaporedni piski.

V tem sklopu je tudi funkcija za ustvarjanje imena datoteke z meritvami. Ime datoteke mora

¹⁴ V danem primeru znaša vrednost 1, ker obvod zračnega pretoka (slika 14 na strani 30) ni bil uporabljen.

vsebovati serijsko številko aethalometra in datum (primer: instrument številka 123 zapisuje 18. februarja 2008 meritve v datoteko ae123_bc080218.csv). Sklop zaključujejo funkcije za branje in pisanje golih podatkov, funkcije za poizvedbo o prostem prostoru na datotečnem sistemu z vsebovano podano potjo, itd.

5.2.2.2 Konfiguracija programa

Konfiguracija programa je zapisana v besedilni datoteki aethalometer.conf. V datoteki so začetki sekcij označeni z imenom med oglatima oklepajema, vrstice s komentarjem so označene z znakom '#', vrednosti pa so določene vsaka v svoji vrstici v obliki ključ=vrednost. Okoli znaka '=' je lahko tudi prazno polje (presledki, tabulatorji, ipd.). Ta zapis je v Unix-u podobnih sistemih pogost. V enakih ali skoraj enakih oblikah ga uporabljajo tudi Enlightened Sound Daemon, gnokii, Samba in KDE za datoteke s končnico „desktop“. Za ponazoritev je spodaj navedenih nekaj zaporednih vrstic datoteke aethalometer.conf. Celotna datoteka je v prilogi 8.2.

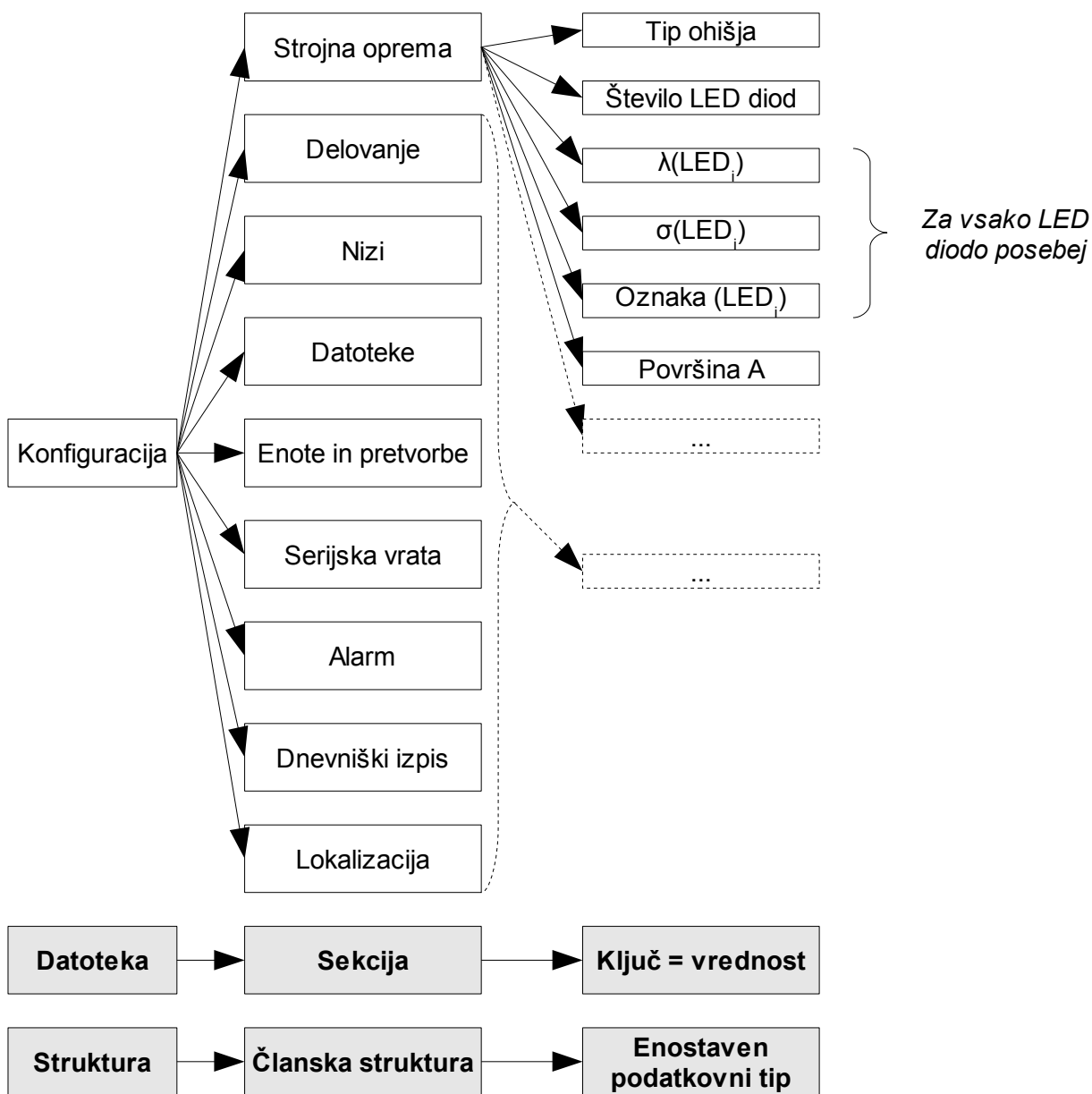
```
[Hardware]

# Chassis Type. 0 = rack mount, 1 = portable
chassis = 0

# Number of LEDs (1, 2, 7)
numberOfLamps = 2
```

Izvedba branja in pisanja takšne konfiguracije v programskem jeziku C zahteva več dela kot bi ga zahteval zapis brez komentarjev in ključev ali celo binaren zapis. Izbrana oblika zapisa je razširjena, omogoča hitro odkritje napak v zapisu in je človeku lahko berljiva. Za prikaz konfiguracije zadostuje gola datoteka brez dodatnega pojasnjevanja ali celo pretvarjanja morebitnih binarnih vrednosti v besedilo. Zato je tudi dodajanje novih opcij hitro in enostavno. Pri branju se iz vsake vrstice datoteke, ki se ne začne z znakom '#' ali '[' in vsebuje znak '=', izluščita niza na vsaki strani znaka '='. Iz obeh nizov se s funkcijo `isspace()`¹⁵ na obeh straneh odstrani prazno polje. Zatem se spremenljivki, ki pripada ključu, priredi vrednost.

¹⁵ Za funkcijo `isspace()` mora biti lokalizacija nastavljena na privzeto „C“ ali „POSIX“, sicer je lahko nabor znakov, ki jih interpretira kot prazne, drugačen [46]. Zato je potrebno konfiguracijo prebrati pred nastavljanjem lokalizacije ali pa začasno spremeniti lokalizacijo.



Slika 34: Hierarhija konfiguracije programa

Vrednosti se delijo na:

- Besedilne; branje poteka neposredno v niz, t.j. brez pretvorb.
- Nominalne; pri branju se besedilo pretvori v številski podatek ustreznega tipa, ki je ali int ali double.
- Številčne, kjer je število le identifikator; pri branju se besedilo pretvori v številski podatek tipa int, ki se ga priredi primerku oštevilčenega tipa (instance of an enumerated type). Primer je opcija „chassis“.

Manjkajočim opcijam se priredi privzete vrednosti. Primeri: pretok se nastavi na 4 L/min, menjava sita na samodejno, časovna baza na 5 minut. Vse opcije se v pomnilniku nahajajo v globalno deklarirani strukturi, ki je shematsko prikazana na slikah 33 in 34. Hierarhično je struktura urejena podobno kot datoteka s konfiguracijo: sekcije so analogne članskim strukturam, opcije (ključi) pa ustreznim, praviloma enostavnim, podatkovnim tipom.

5.2.2.3 Stanje naprave

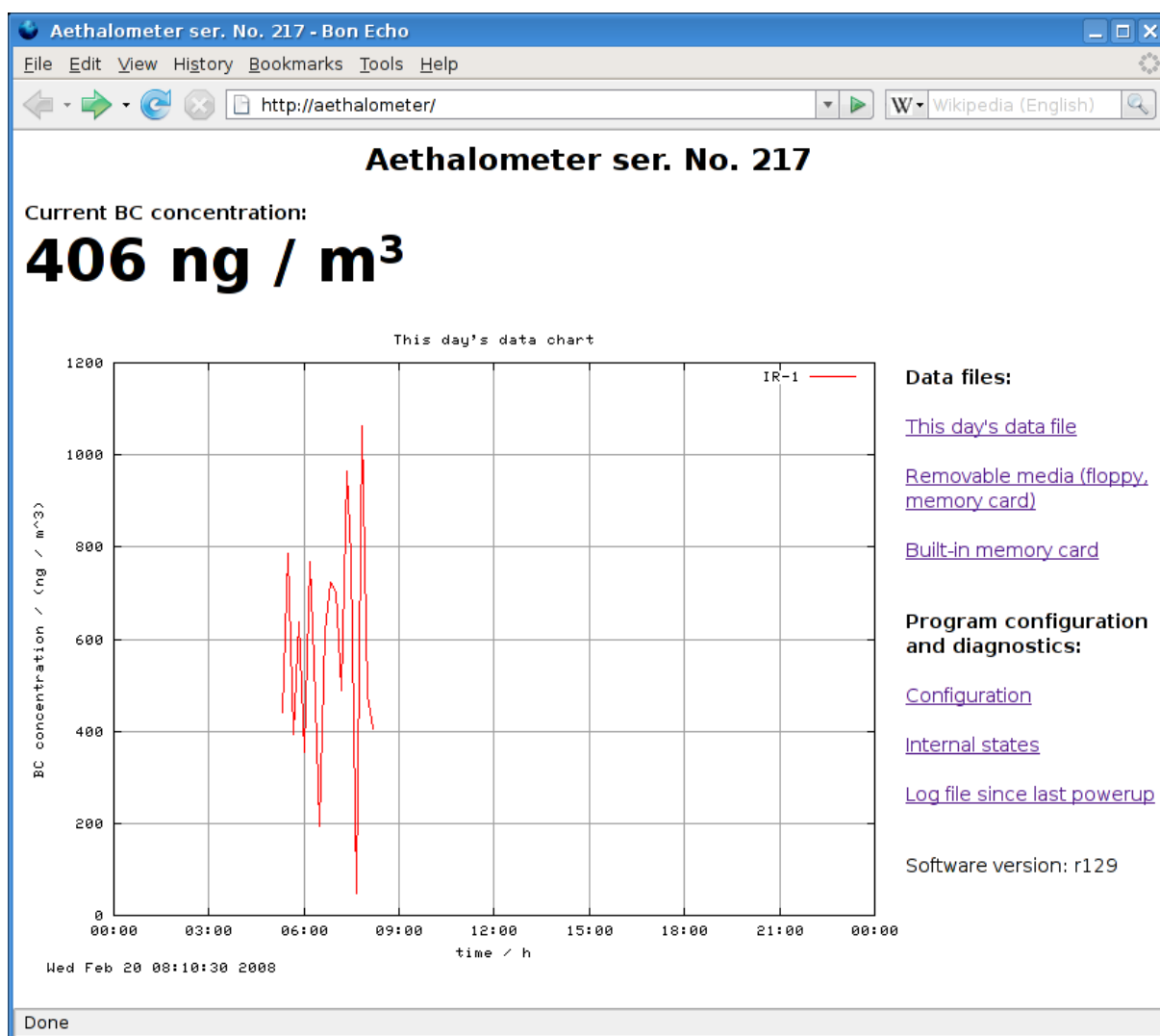
Za podatke o stanju aethalometra, ki se morajo ohraniti tudi po izklopu naprave in niso del nastavitev, je namenjena datoteka aethalometer.status z enako sintakso kot aethalometer.conf. Trenutno je edini zapis ocena preostale količine filtrirnega traku. Da ne bi traku med meritvami nenadoma zmanjkalo, je vrednost prikazana med delovanjem.

5.2.2.4 Spletni vmesnik

Pomembna novost je spletni strežnik za prikaz zadnjih meritev, prenos datotek z rezultati in pregled nastavitev, stanja in dnevniške datoteke. Program ustvari celotno HTML kodo strani, ki vsebuje PNG sliko s časovnim potekom koncentracije BC za vse valovne dolžine od začetka dneva do zadnje meritve. Stran je preprosta in pregledna (slika 35). Z veliko pisavo je trenutna koncentracija vidna tudi na razdalji nekaj metrov. Če se meritve ne izvajajo, je namesto izpisa koncentracije z veliko pisavo napisano "Instrument not operating.". Zraven so poleg grafa še podatki o serijski številki aethalometra in različici programa, hiper-povezave do datotek z rezultati meritev, konfiguracije, stanja in dnevniške datoteke programa. Stran se po obisku samodejno osvežuje s periodo, enako nastavljeni časovni bazi, oziroma na vsako minuto, če je časovna baza manjša od minute. Osveževanje deluje ob predpostavki, da spletni brskalnik upošteva meta element v glavi HTML kode (primer je podan za 5 minutno časovno bazo aethalometra):

```
<META HTTP-EQUIV="REFRESH" CONTENT="300">
```

Predpostavka drži v večini primerov, npr. s privzetimi nastavitvami brskalnika Mozilla Firefox 2.



Slika 35: Spletni vmesnik

Sliko ustvari zunanji program Gnuplot [41], ki se mu kot edini parameter poda datoteko s skriptom. Skript pred tem ustvari program za delovanje aethalometra glede na nastavitve. Spodaj je primer skripta, katerega program ustvari za dvo-kanalni aethalometer s serijsko številko 123, ki meri z IR in UV svetlobo, izbrana enota za BC je ng/m^3 , za dan 18. 2. 2008.

```
set title "This day's data chart"
set datafile separator ","
set xdata time
set timefmt "%H:%M"
set xrange ["00:00":"24:00"]
set xtic ("00:00", "03:00", "06:00", "09:00", "12:00", "15:00", "18:00", \
"21:00", "24:00")
set time
```

```
set grid
set xlabel "time / h"
set ylabel "BC concentration / (ng / m^3)"
set terminal png
set output "/var/log/graph-day.png"
set format x "%H:%M"
plot "/mnt/storage/ae123_bc080218.csv" using 2:3 title 'IR' with lines, \
      "/mnt/storage/ae123_bc080218.csv" using 2:4 title 'UV' with lines
```

Na sliki 35 je spletni vmesnik aethalometra z eno valovno dolžino. Pri vmesniku aethalometra z več valovnimi dolžinami vsebuje PNG slika časovne poteke rezultatov meritev za vsako valovno dolžino v svoji barvi. Primer za dve valovni dolžini je na sliki 9 v poglavju 3.3.1.

5.2.3 Zaslon in tipkovnica

Štirivrstični alfanumerični zaslon Warner Power Termiflex CP/2500 s petimi zunanjimi LED diodami za prikaz stanja aethalometra in tipkovnico s 5×5 tipkami (slika 7) preko mikrokrmilnika komunicira z računalnikom preko serijskih vrat. Iz računalnika poslani ASCII znaki se prikažejo neposredno na zaslonu. Ostali znaki so uporabljeni kot kontrolni znaki za kratek ukaz oziroma kot začetek večbajtnega ukaza za zvočni signal, brisanje zaslona, prikaz kurzorja, premik kurzorja ter vklop, izklop ali utripanje zunanjih LED diod. Koda pritisnjene tipke se prebere kot en znak. Pri programiranju vmesnika je edini netrivialni del inicializacija serijskih vrat, pri čemer je potrebno nastaviti vse ustrezne parametre (hitrost, parnost, itd.) serijskih vrat. Če funkcija `read()` ob klicu blokira do dostopnega podatka, se izvajanje programa lahko prekine za nedoločen čas. Zato je s funkcijo `fcntl()` izbran asinhron način in četudi na serijskih vratih ni na voljo podatkov za branje, klic `read()` zaradi morebitne napake v programu ne bo blokiral izvajanja:

```
int comPortDisplay = -1;
// ...
comPortDisplay = open("/dev/ttyS0", O_RDWR | O_NOCTTY);
// ...
fcntl(comPortDisplay, F_SETFL, O_ASYNC | O_NONBLOCK);
```

Z nastavljenim asinhronim branjem se lahko čaka na pritisk tipke v zanki s periodičnim preverjanjem. Temu se izogne s funkcijo `select(int nfds, fd_set *readfds, fd_set *writefds, fd_set *exceptfds, struct timeval *timeout)`, ki čaka na nove podatke:

```
int waitForComInput(long usecTimeout, int comPortDisplay)
{
    fd_set rfds;
    struct timeval tv;
    int retval;

    dbgOut(DBGOUT_EVERYTHING, "%s(%ld)", __FUNCTION__, usecTimeout);

    FD_ZERO(&rfds);
    FD_SET(comPortDisplay, &rfds);

    tv.tv_sec = usecTimeout / 1000000;
    tv.tv_usec = usecTimeout % 1000000;

    retval = select(comPortDisplay + 1, &rfds, NULL, NULL, &tv);

    if (retval == -1) {
        dbgOut(DBGOUT_MINOR_ERR, "select(): %s", strerror(errno));
        return -1;
    }
    else if (retval) {
        dbgOut(DBGOUT_EVERYTHING, "Data is available now.");
        return 1;
    }
    else {
        dbgOut(DBGOUT_EVERYTHING, "No data within timeout.");
    }
    return 0;
}
```

V prototipu aethalometra je bil poizkusno uporabljen grafični monokromatski zaslon Ampire AG-240128G ločljivosti 240×128. Tudi ta je s tipkovnico povezan na mikrokrmilnik, ki z računalnikom komunicira preko serijskih vrat. Komunikacijski protokol je zasnoval mag. Damjan Zadnik. Posamezni bajti v sporočilu so navedeni v tabeli 10. Za preverjanje integritete sporočila se izračuna CRC kot ekskluzivni ali posameznih bajtov. Vsakemu sporočilu sledi tudi potrditev prejema. V primerjavi z vmesnikom za alfanumerični zaslon so dodani ukazi za inicializacijo zaslona, izbiro velikosti pisave, obarvanje ozadja pisave in okvirjanje. Vmesnik do zaslona je napisan v ločenih izvornih datotekah in zaslon se pred prevajanjem izbere z vključitvijo ustrezne „header“ datoteke. Dokler dodatni grafični učinki niso uporabljeni, je to edina potrebna sprememba izvorne kode za izbiro zaslona.

Tabela 10: Komunikacijski protokol za zaslon Ampire

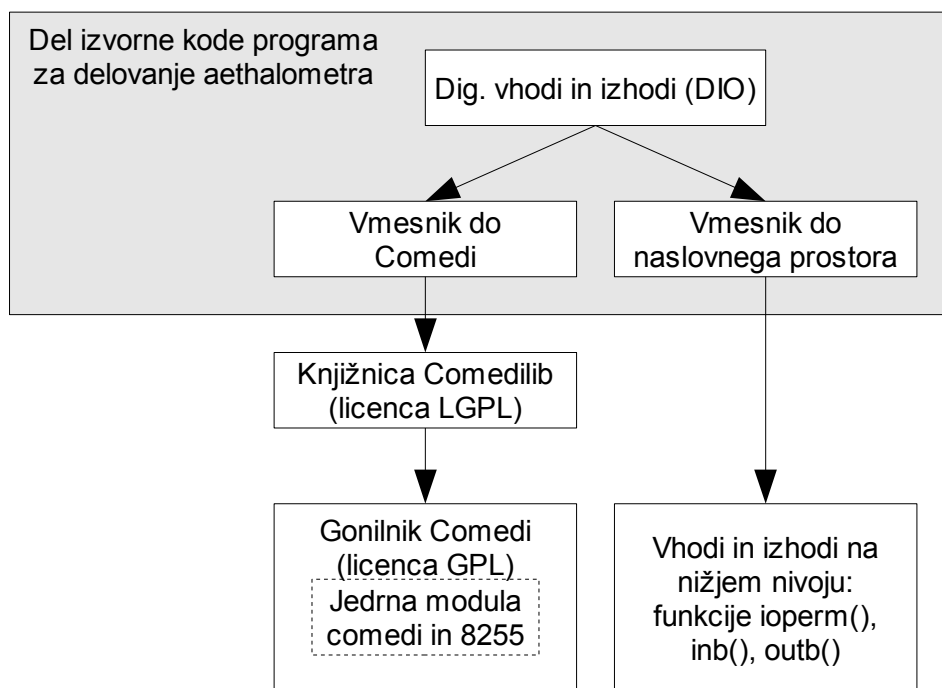
Začetek	Dolžina	Sporočilo				Integriteta	Konec
0x01	N+2	B ₁	B ₂	...	B _N	CRC	0x0D

Tretja možnost za zaslon bi bila uporaba zaslona, ki ga podpira že sam računalnik s priklopom na digitalni vmesnik za vgrajene LCD zaslone ali VGA, primer je 3,5 palčni Purdy Electronics AND-TFT-35VX ločljivosti 640×480. Programski vmesnik za takšen zaslon bi bilo ob potrebi enostavno dodati z uporabo nameščene knjižnice SDL.

5.2.4 Digitalni vhodi in izhodi

Za dostop do DIO obstajata dve možnosti:

- gonilnik Comedi [32]
- in neposredno naslavljanje.



Slika 36: Dostop do DIO

Neposredno naslavljanje je preprosto in deluje na vsakem računalniku, kjer proizvajalec za DIO vmesnik poda naslovni obseg. S funkcijo `ioperm()` se ob inicializaciji določi obseg, do

katerega naj jedro dovoli dostop. Bajte se bere z `inb()` in zapisuje z `outb()`. Izvorna koda se prevede s prevajalnikom `gcc` z opcijo `-O`. Funkciji `inb()` in `outb()` lahko ob napaki povzročita nenaden konec programa. Tako lahko pri naslavljanju prostora, ki z `ioperm()` ni bil predhodno določen za dostop, proces prejme signal `SIGSEGV` in se konča. Naslovni prostor je ob morebitni zamenjavi računalnika potrebno ustrezno spremeniti na nivoju programa. Vendar je za čipe, ki jih Comedi ali podoben vmesnik ne podpira (npr. `WS16C48` na računalniku WinSystems EPX-GX500), to edina možnost dostopa do DIO.

Projekt Comedi ponuja enoten in naprednejši vmesnik do mnogo čipov za DIO, seznam podprtih naprav je možno najti na spletu [47]. Spremembe ob zamenjavi računalnika se naredi na nivoju operacijskega sistema. Sam program za delovanje aethalometra dostopa do DIO vedno enako. Po potrebi se na novo ustvari datoteko naprave. Primer za čip `82C55A` na izbranem računalniku WinSystems EPX-C3:

```
mknod -m 666 /dev/comedi0 u 98 0
```

Potrebno je naložiti še ustrezni jedrni modul. Za čip Intel `82C55A` se naloži modul `8255`. Proces, ki uporablja DIO preko Comedi, ima na voljo večji nadzor nad izvajanjem in ob napaki funkcije vrnejo kodo z indikacijo napake. Tako se program lahko ustrezno odzove.

Kot kaže slika 36, sta narejena majhna in preprosta vmesnika za oba načina dostopa do DIO. Oba vmesnika vsebujeta štiri funkcije, in sicer za inicializacijo, sprostitvev sredstev ter branje in pisanje za posamezen kanal. Prototipi funkcij so v obeh primerih enaki:

- `int initDevice()`
- `int closeDevice()`
- `int getChannel(Channel channel)`
- `int setChannel(Channel channel, unsigned int value)`

`Channel` je oštevilčeni tip z veljavnimi vrednostmi, ki predstavljajo posamezne kanale DIO (0-23). Funkcije v primeru napake vračajo negativno vrednost, v primeru uspešne izvršitve pa 0 oziroma prebrano vrednost. Vmesnik za način dostopa do DIO se izbere v datoteki `Makefile`. Pri Comedi velja omeniti še licenco. Sam gonilnik Comedi je na voljo po licenci GPL [48], knjižnica `comedilib` pa po LGPL [49]. Izvorno kodo, ki je pri prevajanju povezana do knjižnice, licencirane po GPL, je v primeru distribucije prav tako potrebno ponuditi na voljo po GPL. Za LGPL to ne velja in za licenco programa za delovanje aethalometra, ki

uporablja samo knjižnico comedilib, ni te zahteve.

Najvišji vmesnik na sliki 36 ima funkcije za komunikacijo z A/D in D/A pretvorniki in posredniške funkcije do nižjenivojskega vmesnika, ki jih lahko kličejo ostali segmenti programa. Vmesnik vsebuje še konstante za pretvorbo golih binarnih vrednosti v fizikalne količine in obratno. Razpored in opis kanalov DIO vmesnika podajata tabeli 11 in 12.

Tabela 11: Razpored digitalnih linij na DIO vmesniku

Št.	Oznaka	Smer	Opis
NA	+5V	Izhod	Napajanje, ni uporabljeno.
0	DIO_MUX3	Izhod	Izbira LED diode z multiplekserjem.
1	DIO_TAPE_ADVANCE	Izhod	Premik traku.
2	DIO_TAPE_TENSION	Izhod	Napenjanje traku.
3	DIO_BYPASS	Izhod	Obvod zračnega pretoka mimo sita.
4	DIO_MUX2	Izhod	Izbira LED diode z multiplekserjem.
5	DIO_MUX1	Izhod	Izbira LED diode z multiplekserjem.
6	DIO_ADC_DIODE	Izhod	Izbira A/D pretvornika.
7	DIO_NOT_USED_1	Izhod	Samo za obstoječe detektorsko vezje.
8	DIO_NOT_USED_2	Izhod	Samo za obstoječe detektorsko vezje.
9	DIO_NOT_USED_3	Izhod	Samo za obstoječe detektorsko vezje.
10	DIO_TEST	Izhod	Testni način delovanja DDC112.
11	DIO_RANGE	Izhod	Izbira merilnega obsega DDC112.
12	DIO_READ_SETUP ¹⁶	Izhod	Pisanje v izbrani D/A pretvornik (nastavitev zračnega pretoka ali analognega izhoda).
13	DIO_DATA_TRANSMIT	Izhod	Komunikacija z izbranim A/D pretvornikom.
14	DIO_NOT_USED_4	Izhod	Samo za obstoječe detektorsko vezje.
15	DIO_CS2	Izhod	Izbira D/A pretvornika za nastavitev zračnega pretoka.
16	DIO_DATA_INVALID	Vhod	Pripravljenost izbranega A/D pretvornika za prenos podatka.
17	DIO_DATA_OUT	Vhod	Shranjevanje podatka iz izbranega A/D pretvornika.
18	DIO_NOT_CONNECTED_1	Vhod	Neuporabljeno.
19	DIO_NOT_CONNECTED_2	Vhod	Neuporabljeno.
20	DIO_DATA_CLOCK	Izhod	Zunanja ura za izbrani A/D ali D/A pretvornik.
21	DIO_BC_DATA	Izhod	Podatek za vpis v izbrani D/A pretvornik.
22	DIO_CS1	Izhod	Izbira D/A pretvornika za analogni izhod.
23	DIO_ANALOG_OUT_INVALID	Izhod	Nastavitev analognega izhoda izven veljavnega območja.

¹⁶ Oznaka izvira iz zgodovinskih razlogov, čeprav je zavajajoča.

Tabela 12: DIO kanali za A/D pretvornike

A/D pretvornik	Uporabljeni DIO kanali	Viri opisa komunikacije
DDC101	6, 7, 8, 9, 13, 16, 17, 20	[27]
DDC112	6, 10, 11, 13, 16,17, 20	Slika 18, [28]
ADS8341	6, 13, 16, 17, 20	Sliki 21 in 24, tabela 5, [31]

5.2.5 Datum in čas

Vmesnik ima funkcije za branje in nastavljanje systemskega časa ter za pretvarjanje podanega časa v niz v podanem formatu. Uporabljen način zapisa časa sta število sekund od 1. 1. 1970 in struktura `struct tm`, ki je definirana v standardni C knjižnici `<time.h>`. V ta vmesnik sodi tudi funkcija, ki iz časa prejšnje meritve in nastavljene časovne baze določi primerno zaokrožen čas naslednje meritve atenuacije:

```
time_t getNextRoundTime(time_t previousTime, int timeBase)
```

Drugi del tega vmesnika so funkcije za premor. Jedro Linux 2.6.10 po začetku spanja procesa ne more zagotoviti ponovnega izvajanja procesa pred potekom 10 ms. Tudi če proces s funkcijo `nanosleep()` iz `<time.h>` zahteva spanje za 1 ns, se bo ponovno izvajal šele po 10 ms. Zato ta del vmesnika vsebuje:

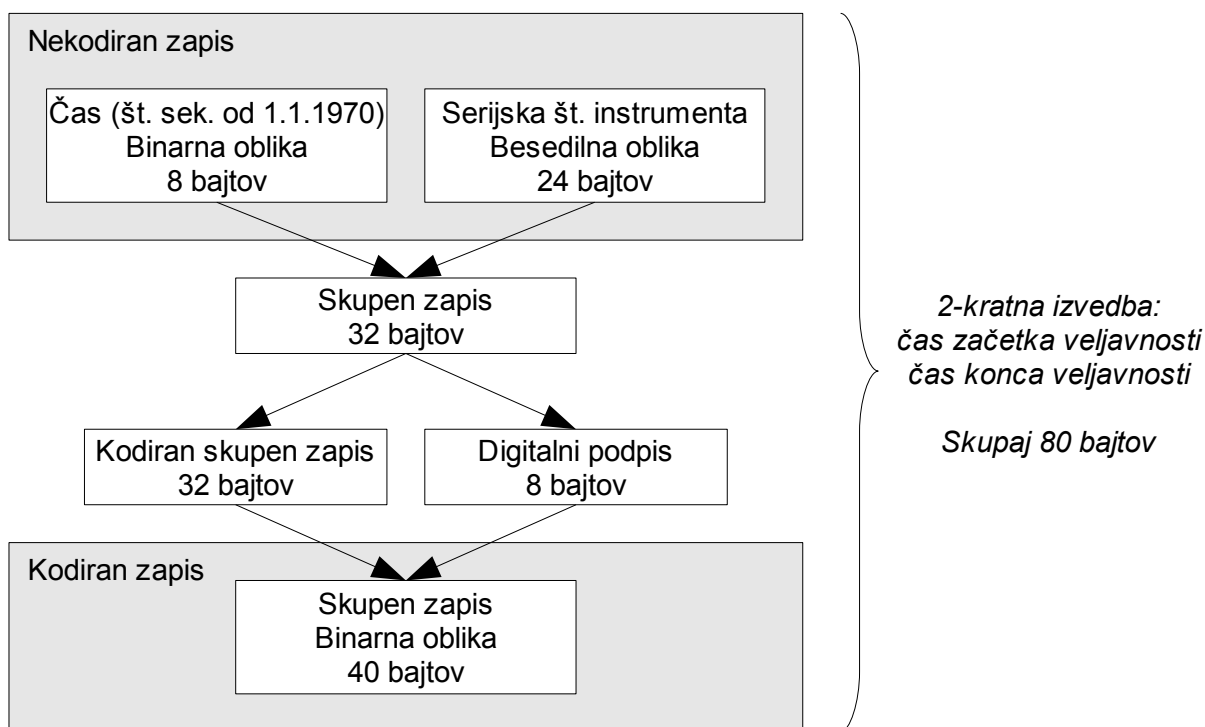
- funkcije za normalno spanje za podano časovno obdobje ali do podanega časa,
- funkcijo za aktivno čakanje v zanki za podano obdobje (`busy wait`, `busy loop`),
- funkcijo, ki izbere način čakanja glede na podano časovno obdobje in na ustrezen način čaka: če je časovno obdobje manjše od 10 ms, čaka aktivno, sicer spi.

Zgornje funkcije prejmejo tudi kazalec na strukturo s trenutnim časom. Če podani kazalec ni NULL, čas začetka čakanja funkcije preberejo iz strukture, na katero kaže podani kazalec, sicer čas začetka čakanja določijo kot trenutni čas. Tako lahko funkcija, ki uporablja ta vmesnik, najprej določi trenutni čas t_a , izvede opravilo, za katerega čas izvedbe ni vnaprej znan, ter v času t_b kliče funkcijo čakanja s podanim „trenutnim“ časom t_a . Tako se lažje in bolj pregledno poda čas celotne operacije. Dodane so še funkcije čakanja, ki ob pritisku tipke vrnejo predčasno. Med delovanjem se za čakanje največkrat uporablja slednje, ker se mora aethalometer takoj odzvati na pritisk tipke STOP, v nekaterih stanjih pa tudi na pritisk drugih

tipk. Alternativa temu je proženje signala ob prejemu podatka na serijski vmesnik (znak pritiska tipke). Vendar pa je, ko uporabnik brska po menijih, pritiskov na tipke veliko in je ravnanje s signalom ob vsakem pritisku tipke nepregledno.

5.2.6 Zaklep programa

Aethalometer naj bi se novim uporabnikom za določeno obdobje tudi posodil, po izteku te dobe pa naj ne bi več deloval. Program ob zagonu preveri obdobje veljavnosti in nadaljuje samo v primeru, če je sistemski čas znotraj tega obdobja. V kodiran zapis, ki ga imenujemo ključ, je vključena tudi serijska številka instrumenta, s čimer se oteži ugotovitev postopka kodiranja iz več ključev, če ima uporabnik na voljo več aethalometrov.



Slika 37: Ustvarjanje ključa za zaklep programa

Ključ se ustvari z ločenim programom, ki uporabnikom ni na voljo. Kodiranje poteka po shemi na sliki 37, končni rezultat (ključ) je velikosti 80 bajtov. Kodiranje je simetrično in program za delovanje aethalometra ključ dekodira in preveri podpis v obratni smeri. Digitalni podpis izvede naslednja funkcija z uporabo dveh velikih praštevil:

```
u_int64_t sign(const unsigned char *str, int len)
{
    int i;
```

```

u_int64_t hash = INITIAL_HASH;
u_int64_t a = PRIME_NUMBER_A;
u_int64_t b = PRIME_NUMBER_B;

for (i = 0; i < len; i++) {
    hash = str[i] + hash * a;
    a = a * b;
}

return hash;
}

```

Zapis se kodira s premeščanjem posameznih bajtov in invertiranjem nekaterih bitov znotraj posameznega bajta. Bitna maska za invertiranje bitov je za vsak bajt drugačna. Algoritem je enostaven, vendar bi po avtorjevi oceni uporabnik za razbitje zaščite porabil preveč časa, da bi se izplačalo podaljšati uporabo aethalometra za nekaj dni, tednov ali mesecev, za kolikor uporabniki včasih zamujajo z vračilom posojenega aethalometra. Že samo za digitalni podpis je število možnosti:

$$2^{N_{\text{podpisov}} \cdot N_{\text{bajtov v podpisu}} \cdot N_{\text{bitov v bajtu}}} = 2^{2 \cdot 8 \cdot 8} \sim 3,4 \cdot 10^{38} \quad (29)$$

Za preizkus vsakega podpisa (če uporabnik predhodno ugotovi, kateri del ključa vsebuje podpis in kakšen je način kodiranja) bi bilo potrebno s FTP odjemalcem prepisati v aethalometer nov ključ, ponovno zagnati program in preveriti uspeh. Ob konservativni predpostavki, da traja ta postopek vsaj 1 ms, traja preizkus vseh možnih podpisov več kot 10^{28} let.

5.2.7 Internacionalizacija

Internationalizacija (zanjo se na podlagi angleškega izraza internationalization uporablja oznaka i18n) je postopek, pri katerem se v programu omogoči prikazovanje informacij na več načinov, značilnih za različne jezike in regije. Lokalizacija (zanjo se na podlagi angleškega izraza localization uporablja oznaka L10n) pomeni prilagoditev za določen jezik in regijo.

Internationalizacijo omogoča GNU gettext [50]. V programski kodi se najprej s funkcijami bindtextdomain(), textdomain() in setlocale() določi jezik in regijo. Vsak niz, ki naj bo lokaliziran, se zamenja s klicem gettext(), ki vrne kazalec na lokaliziran niz. Klicev gettext()

je veliko in programska koda se poenostavi, če se definira kratek makro za gettext():

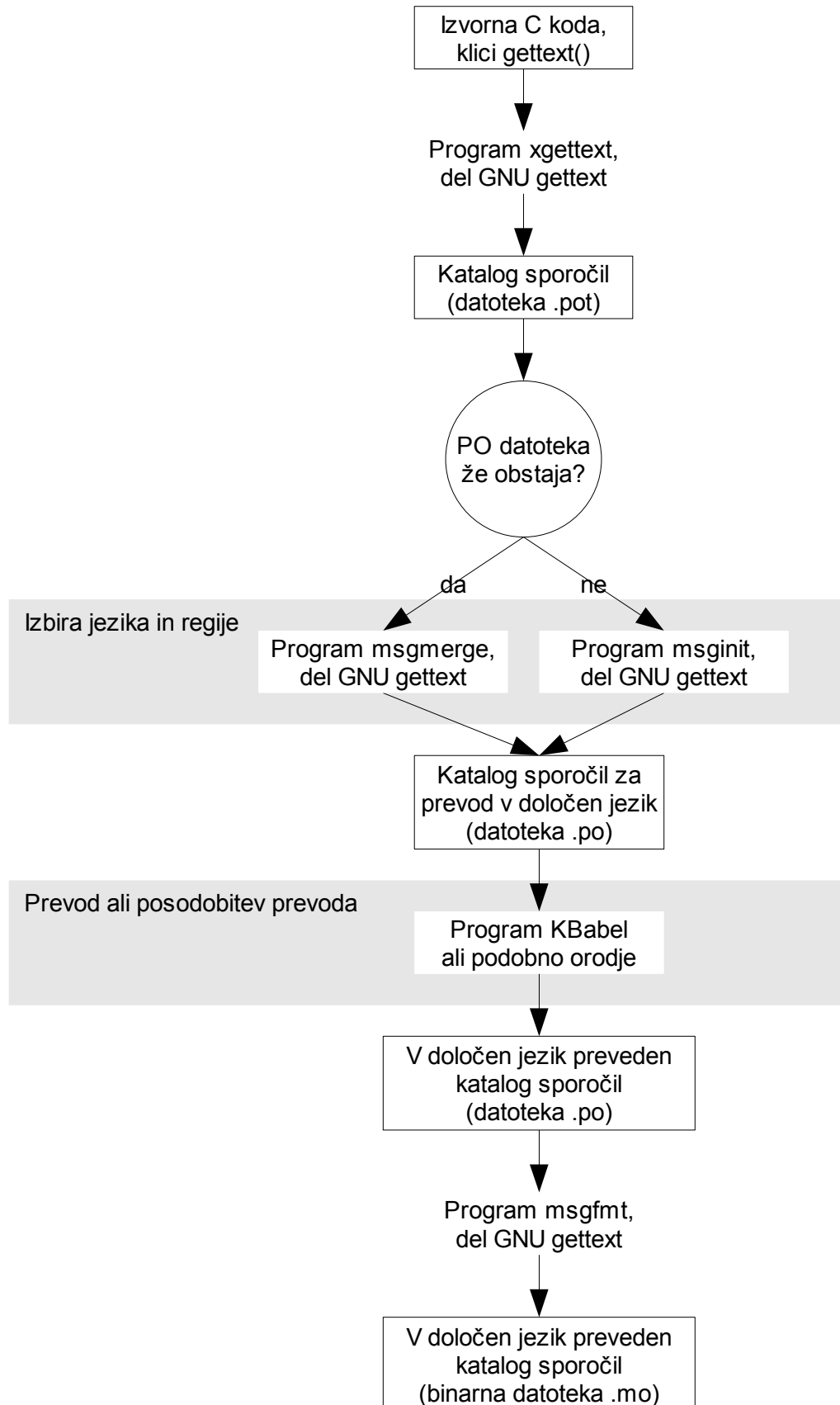
```
#define _(string) gettext(string)
```

Podobno kot projekt Comedi je tudi GNU gettext licenciran po GPL in LGPL: izvedljivi programi in knjižnica libgettextpo so licencirani po GPL, knjižnici libintl in libasprintf pa po LGPL [51]. Vse klicane funkcije so iz knjižnice libintl in za licenco programa ni omejitev.

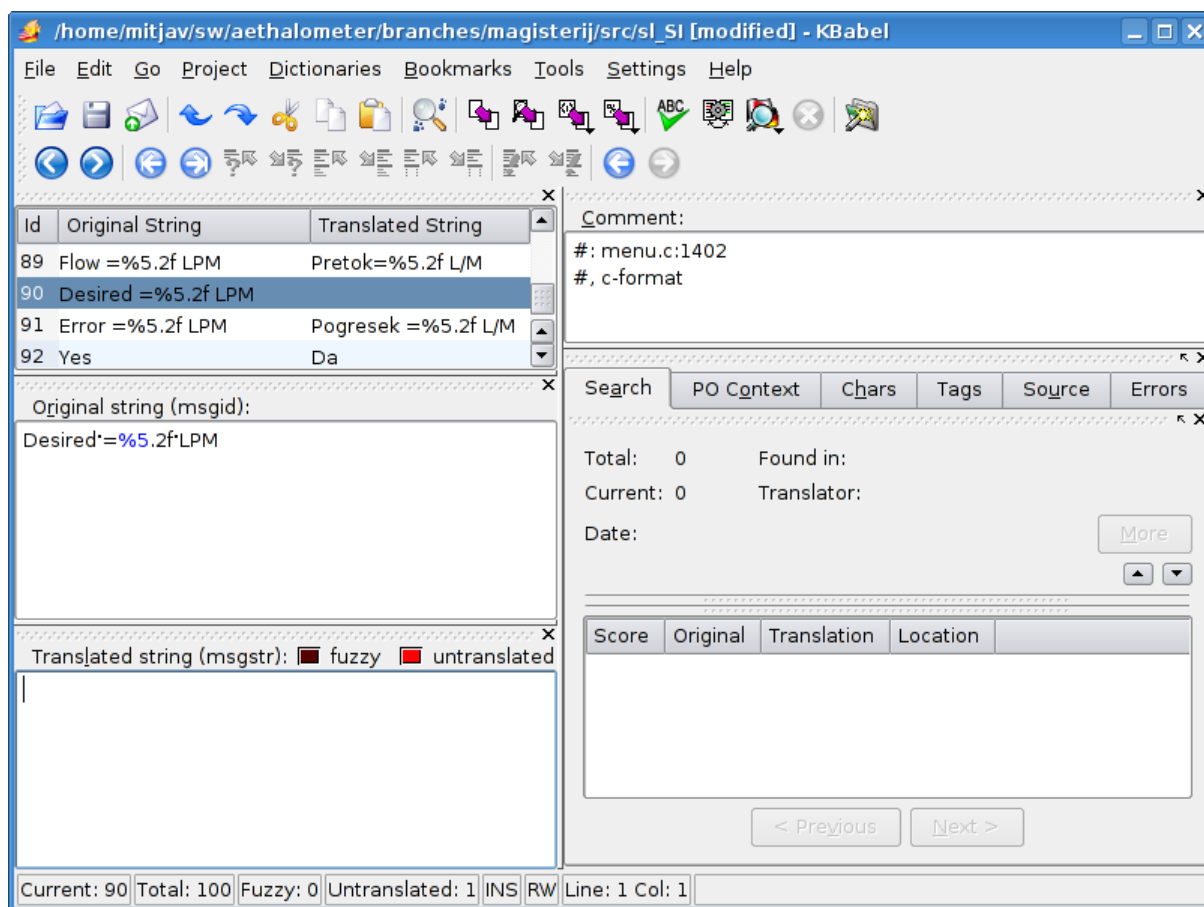
Lokalizacija pomeni predvsem prevod, saj so oblike zapisa števil in druge značilnosti večine jezikov že opisane in vključene v nameščeni sistem. Postopek lokalizacije poteka po shemi na sliki 38. Razdeljen je na tri dele:

- priprava PO datoteke (s končnico „.po“) za prevod,
- prevod,
- preoblikovanje prevedene PO datoteke v binarno datoteko s končnico „.mo“, ki jo uporablja program med izvajanjem.

Prvi in zadnji del sta avtomatizirana v datoteki Makefile, poženeta se enako enostavno kot prevajanje izvorne kode – z izbiro ustreznega cilja iz menija KDevelop (slika 31 na strani 53).



Slika 38: Lokalizacija z GNU gettext



Slika 39: Lokalizacija programa s KBabel

Besedilo, ki ga program izpisuje na alfanumerični zaslon, se prevede s KBabel ali podobnim programom za urejanje PO datotek [52]. Prevod lahko opravi kdorkoli z zadostnim poznavanjem angleščine in jezika, v katerega prevaja. KBabel samodejno označi nize, ki niso prevedeni (untranslated, kot izbrani niz na sliki 39), ter nize, ki so bili po zadnjem prevodu spremenjeni v C programski kodi (fuzzy). Alfanumerični zaslon aethalometra prikazuje samo ASCII znake in slovenski prevod je zato brez šumnikov. Sporočila v PO datoteki so zapisana z UTF-8 kodom, ki podpira večino lokalnih znakov, med drugimi tudi znake kitajske abecede. Pri morebitni menjavi zaslona z grafičnim bi prevajalec lahko uporabil tudi lokalne znake, ki jih ni v ASCII kodu.

5.2.8 Meni in upravljanje na višjem nivoju

Programska koda za meni je enostavna, a dolga, zato je ločena od glavnega upravljanja na višjem nivoju. Tipični meni ima naslednjo obliko, ki je kompatibilna tudi z alfanumeričnim

zaslonom:

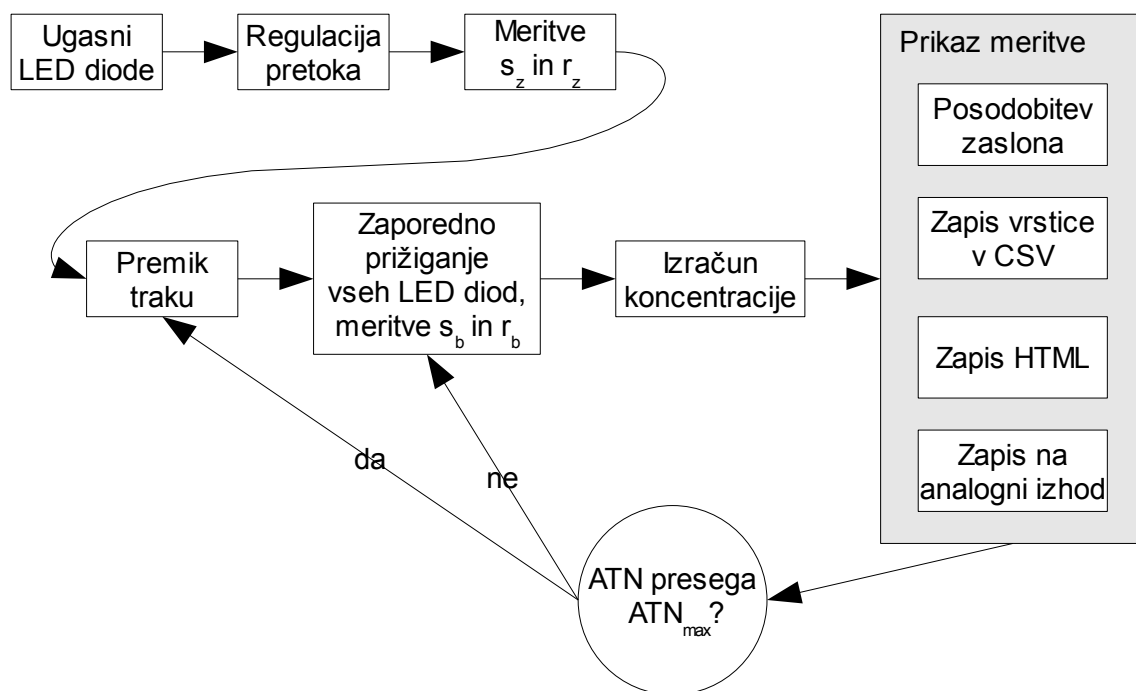
1.2 Ime menija

Opcija 1

>Opcija 2 (izbrana)

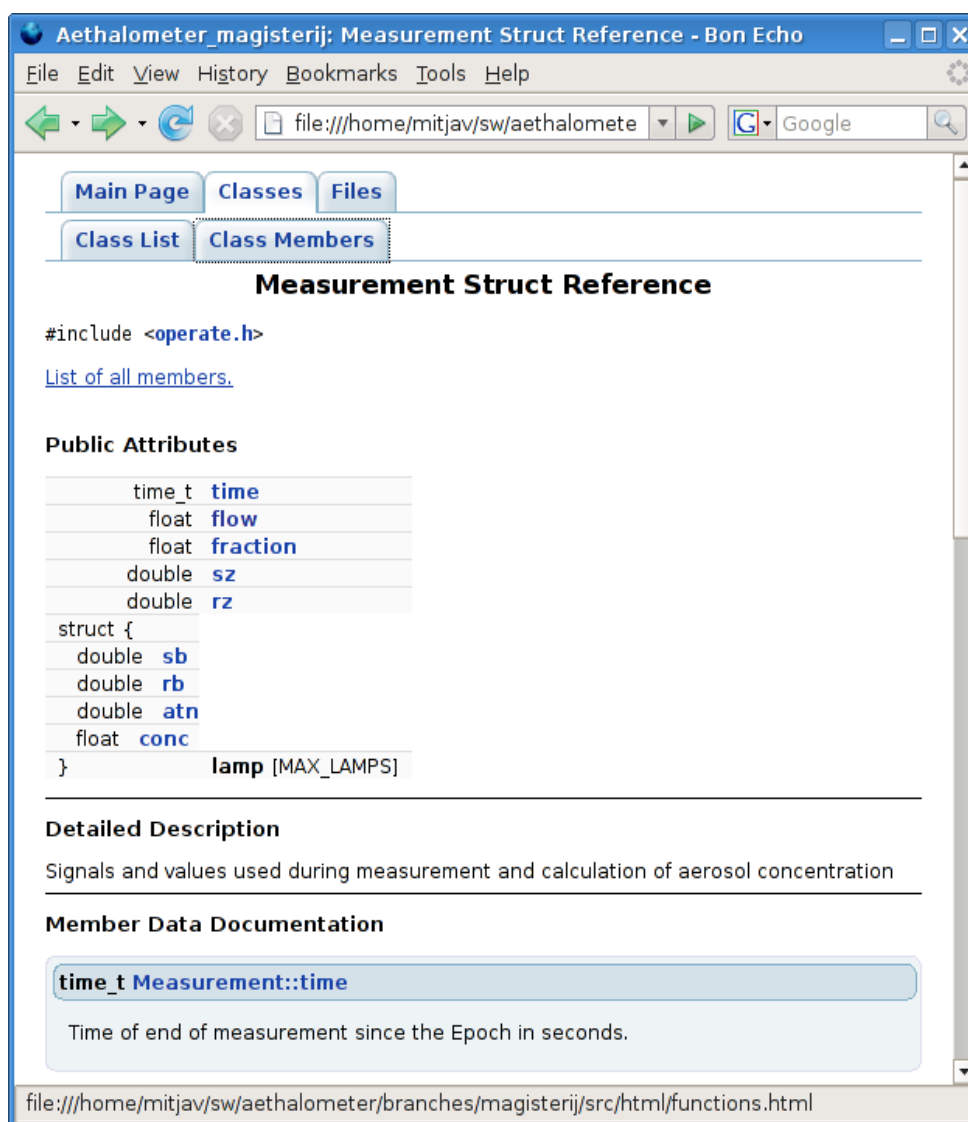
Opcija 3

Opcija se izbira s tipkama UP in DOWN ter potrdi z ENTER. S tipko ESC se vrne v prejšnji meni. Menije ustvarja nekaj osnovnih generičnih funkcij za izpis naslova, izpis opcije, branje vtipkanega niza ter premikanje kurzorja in opcij (v primeru, ko je število opcij večje ali enako številu vrstic). Višji nivo predstavljajo funkcije za prikaz menija za spreminjanje vrednosti tipa int, float ali niz, ter funkcije za vsak konkreten meni posebej. Slednje sestavijo opcije v dvodimenzionalno polje tipa char, kličejo funkcijo, ki izpiše podane opcije in vrne indeks izbrane opcije, ter v stavku switch izvedejo izbrani opciji ustrezno dejanje.



Slika 40: Delovanje glavne funkcije programa

Upravljanje na višjem nivoju je osredotočeno okoli glavne funkcije, ki deluje po shemi na sliki 40. Vsaka meritev se vpiše v primerek strukture Measurement, ki je predstavljena na sliki 41.



Slika 41: Dokumentacija strukture za meritve, ustvarjena z Doxygen

Ključne pomožne funkcije so:

```
void calculateConc(Measurement *m, const Measurement *mPrevious)
void cleanUpOnExit(int programExit)
double getFlow()
void getSenseRef(double *sense, double *reference)
double getTemperature()
int initializeProgram(Configuration *c)
void readSignalsLampOn(Measurement *m, time_t timeEnd)
int setFlow(float flowLpm)
int switchOnLamp(u_int8_t lamp)
int tapeAdvance(int spots)
```

Imena in parametri nazorno opisujejo vloge naštetih funkcij. V prejšnjih poglavjih predstavljeni vmesniki nižjega nivoja omogočajo kratko in preprosto implementacijo teh funkcij.

5.2.9 Prevajanje in namestitvev programa

Datoteka Makefile je napisana ročno. Splošna sintaksa je:

```
# Komentar
cilj: odvisnosti
    ukaz 1
    ukaz 2
    ...
    ukaz N
```

Ciljev je lahko več, pred njimi so definirane globalne spremenljivke, dostopne ukazom vseh ciljev. Primera globalnih spremenljivk sta:

```
BINARY    = aethalometer
REVISION  = `svn info | grep "Revision: " | sed 's/Revision: //'`
```

Program za delovanje aethalometra se prevede s ciljem „aethalometer“, ki vsebuje ukaze:

```
sed -i "s/#define SW_VERSION.*/#define SW_VERSION \"r${REVISION}\"/" main.h
sed -i "s/#define PACKAGE.*/#define PACKAGE \"${BINARY}\"/" i18n.h
${CC} ${CFLAGS} ${SOURCES}
${CC} ${LFLAGS} -o ${BINARY} *.o
```

Tik pred prevajanjem se iz izpisa Subversion izlušči različica programa, ki se vgradi v izvorno kodo. Sledi prevajanje izvornih datotek, definiranih v spremenljivki SOURCES s prej definiranimi prevajalnikom in opcijami. Rezultat so objektne datoteke s končnico „o“, ki se jih z zadnjim ukazom poveže v izvedljivo datoteko „aethalometer“. Cilj „install“ vsebuje ukaze za namestitvev programa v aethalometer po omrežju:

```
md5sum -b ${BINARY} > ${BINARY}.md5
lftp -e "rm -f ${BINARY} ${BINARY}.md5; put ${BINARY} ${BINARY}.md5; chmod 755
    ${BINARY}; quit" -u username, ftp://aethalometer
```

Lokalizacija v jezik in področje, določena s spremenljivko LOCALE (npr. LOCALE=sl_SI za slovenski jezik) se izvede s ciljema „L10n-messages“:


```
xgettext --sort-by-file -k_ -o ${BINARY}.pot ${SOURCES}
if [ -e ${LOCALE}.po ]; then \
  msgmerge --backup=off --sort-by-file --quiet -U ${LOCALE}.po ${BINARY}.pot; \
else \
  msginit --no-translator -l ${LOCALE} -o ${LOCALE}.po -i ${BINARY}.pot; \
fi
```

in „L10n-catalog“:

```
mkdir -p ${LOCALE_PATH}/${LOCALE}/LC_MESSAGES
msgfmt -c -o ${LOCALE_PATH}/${LOCALE}/LC_MESSAGES/${BINARY}.mo ${LOCALE}.po
```

KDevelop vgradi vse cilje v meni (slika 31 na strani 53).

6. Rezultati in diskusija

Dva prototipa aethalometra z novo strojno in programsko opremo sta prikazana na sliki 42. Pozdravni zaslon je prilagojen za javno predstavitev.



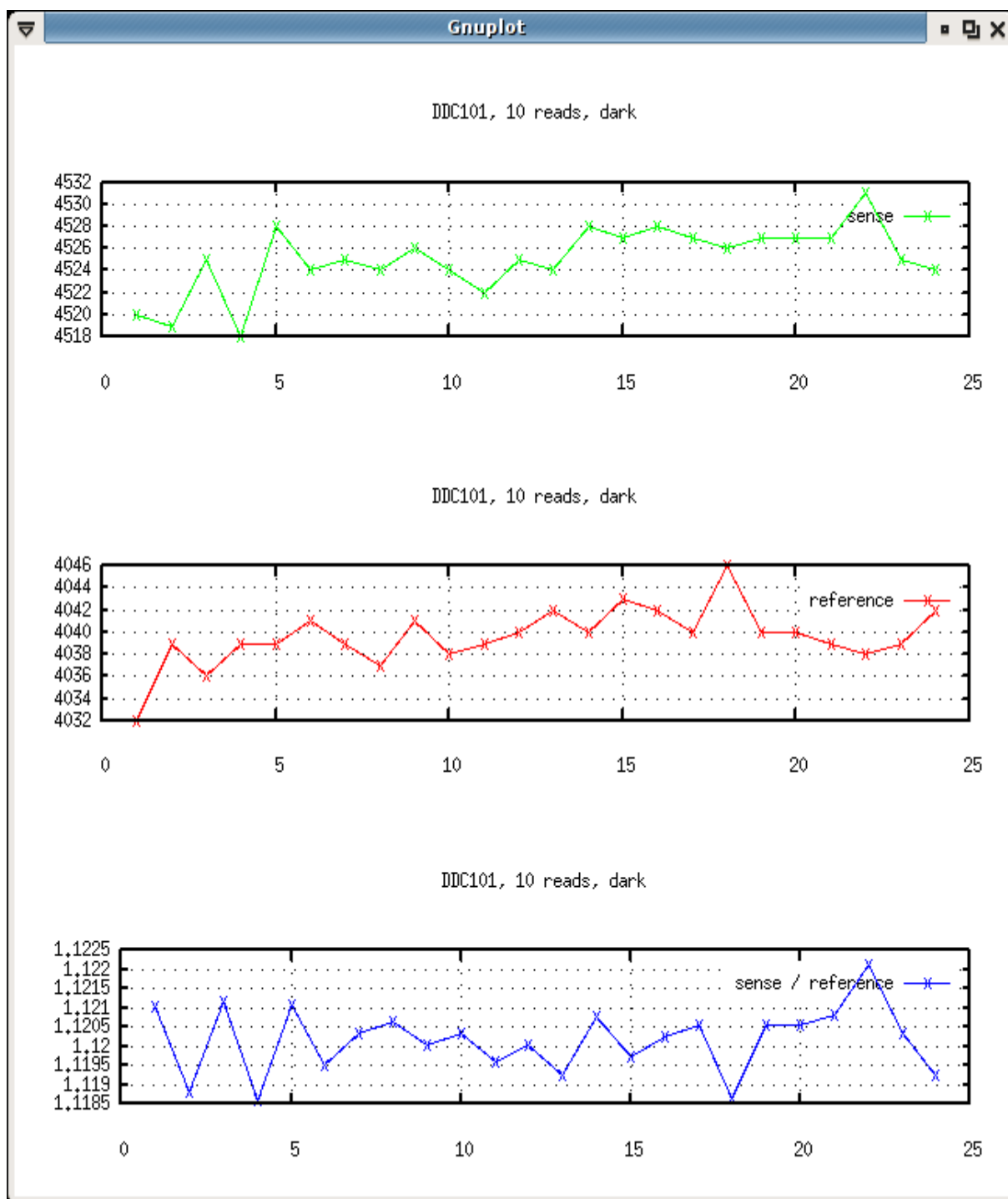
Slika 42: Prototipa novega aethalometra z zaslonom Ampire (foto: mag. Damjan Zadnik)

6.1 Primerjava A/D pretvornikov DDC101 in DDC112

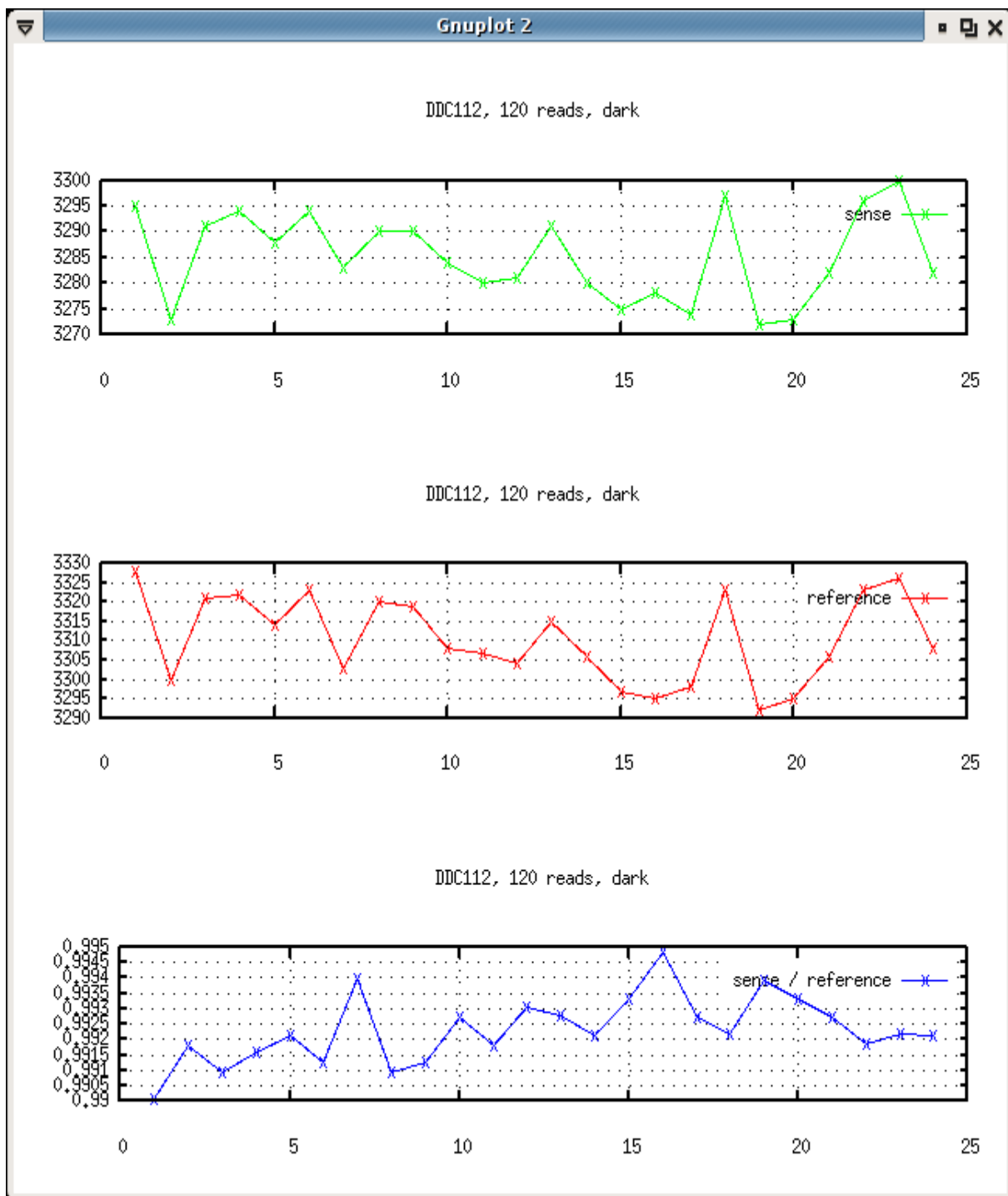
Na slikah 43 do 48 so prikazani rezultati meritev z A/D pretvornikoma Burr-Brown DDC101 in DDC112 pri ugasnjenih LED diodah, po vklopu IR in po vklopu UV LED diode, v odvisnosti od časa v sekundah. Vsaka točka na grafih je povprečje N zaporednih prebranih golih podatkov iz A/D pretvornika. N je izbran tako, da je čas meritve enak za oba A/D pretvornika: $N_{DDC101} = 10$, $N_{DDC112} = 120$. Vse meritve so izvedene brez zračnega pretoka.

Če zanemarimo temna tokova, je končni rezultat (masna koncentracija BC) odvisen od naravnega logaritma razmerja s_b/τ_b . To razmerje je na slikah 43 do 48 prikazano na spodnjih grafih z oznako „sense / reference“.

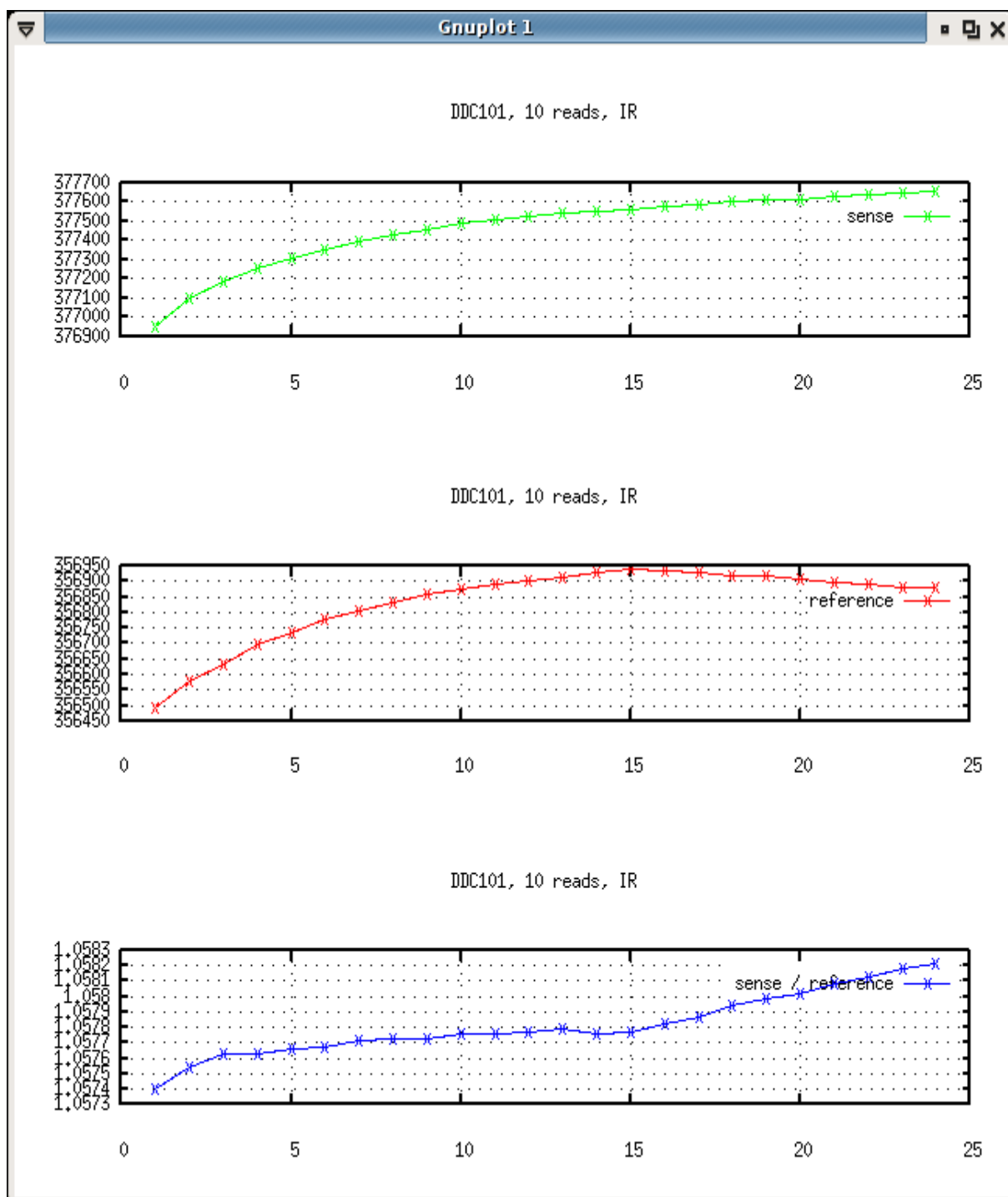
Po vklopu LED diode (slike 45 do 48) je poleg šuma opazno še lezenje obeh signalov. Pri deljenju signalov (spodnji grafi na slikah 45 do 48) se lezenji ne kompenzirata popolnoma.



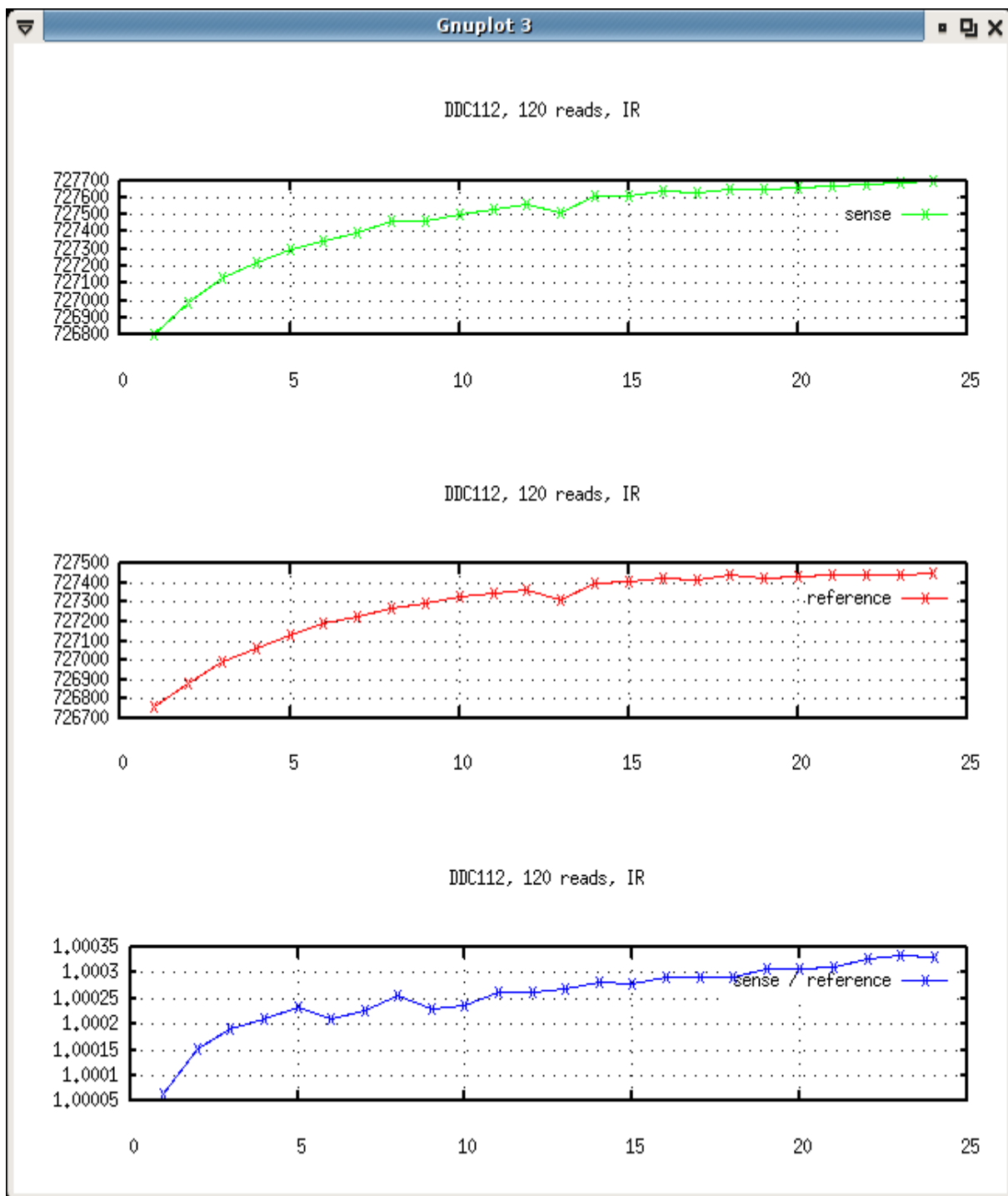
Slika 43: Meritve z DDC101 v temi



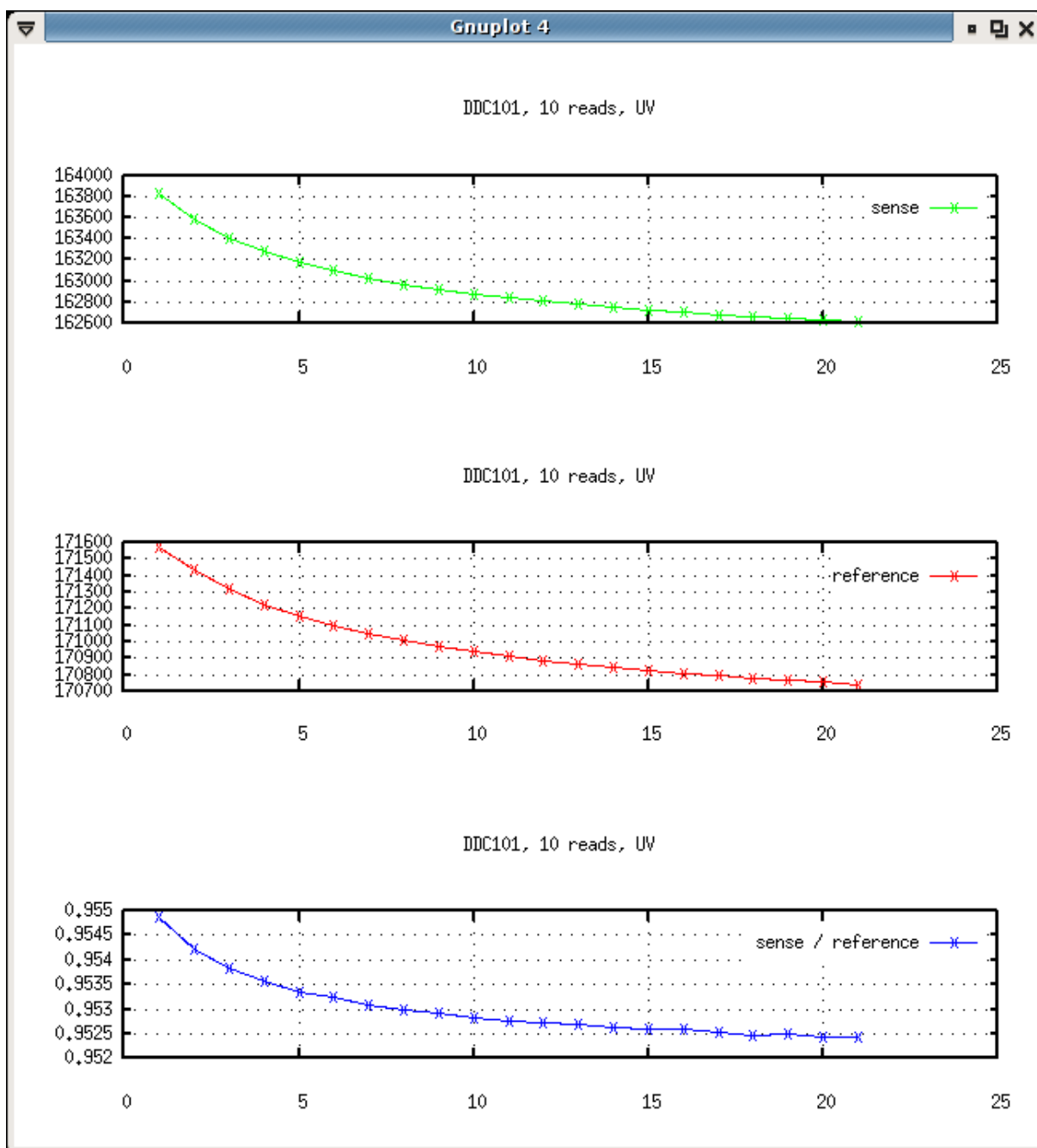
Slika 44: Meritve z DDC112 v temi



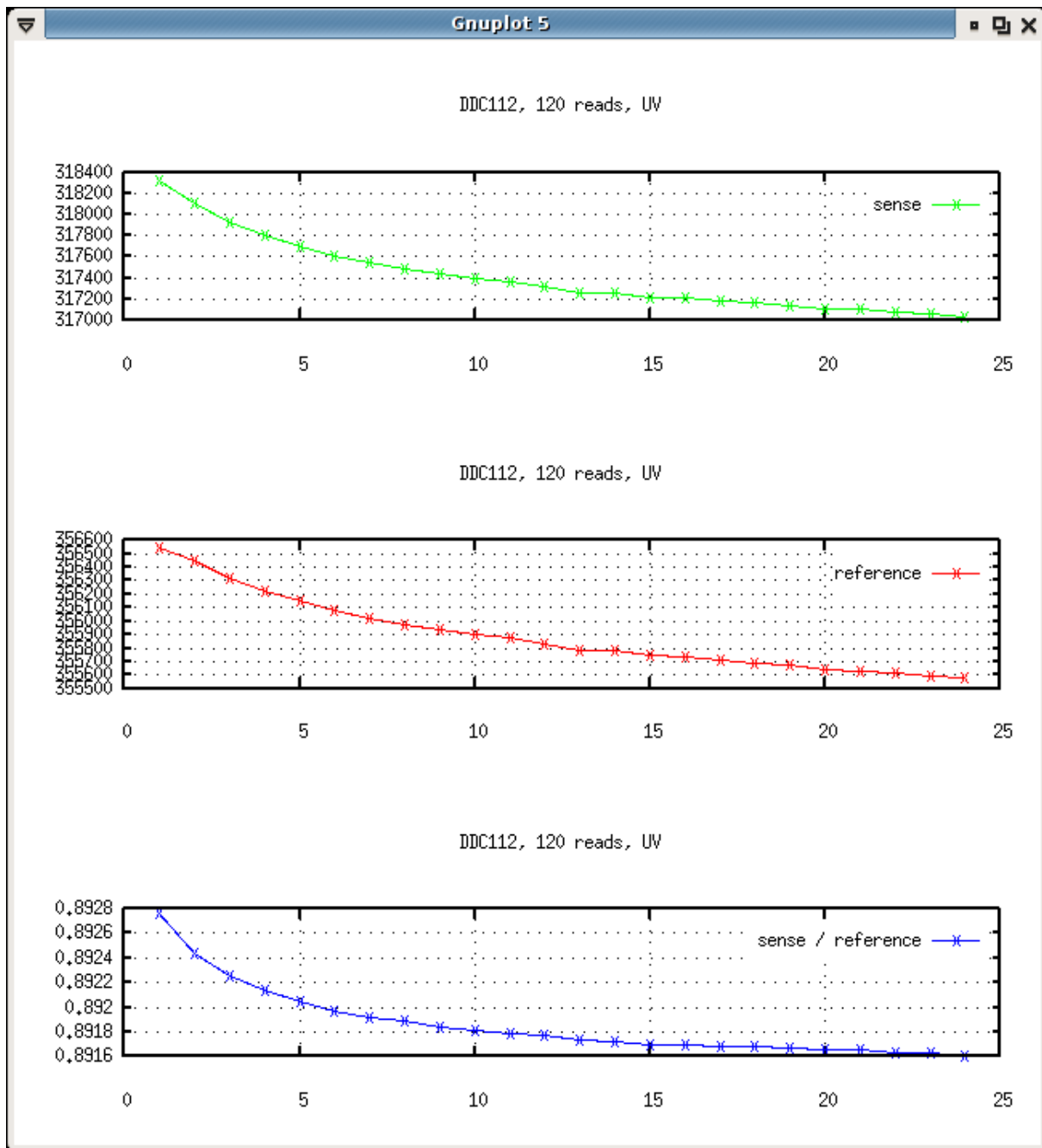
Slika 45: Meritve z DDC101 pri prižgani IR LED diodi



Slika 46: Meritve z DDC112 pri prižgani IR LED diodi



Slika 47: Meritve z DDC101 pri prižgani UV LED diodi



Slika 48: Meritve z DDC112 pri prižgani UV LED diodi

Šum je v tabelah 13 in 14 kvantitativno ocenjen z varianco signala. Šum na posameznem kanalu DDC112 je v večini primerov večji kot pri DDC101. Ker pa so pri DDC112 meritve obeh kanalov izvedene sočasno, je šum obeh kanalov boljše koreliran in se pri deljenju signalov kompenzira v večji meri. V prvotni nadgradnji detektorskega vezja fotodiodi nista bili ozemljeni. Ko sta bili naknadno priklopljeni na maso, se je rezultat v primerjavi z

DDC101 še dodatno izboljšal (tabela 13).

Tabela 13: Varianca signala iz A/D pretvornika za $N_{DDC101} = 10$, $N_{DDC112} = 120$

A/D pretvornik	Svetloba	var(sense)	var(reference)	var(sense / reference)
DDC101	tema	9,0851	6,9402	$7,4193 \cdot 10^{-7}$
DDC112		73,8533	125,5634	$1,1775 \cdot 10^{-6}$
DDC112, diodi na masi		51,462	64,694	$6,0901 \cdot 10^{-7}$
DDC101	IR	$3,4986 \cdot 10^4$	$1,4948 \cdot 10^4$	$4,1395 \cdot 10^{-8}$
DDC112		$5,6065 \cdot 10^4$	$3,7456 \cdot 10^4$	$3,8360 \cdot 10^{-9}$
DDC112, diodi na masi		$5,7037 \cdot 10^4$	$4,2554 \cdot 10^4$	$2,4082 \cdot 10^{-9}$
DDC101	UV	$1,1181 \cdot 10^5$	$5,5763 \cdot 10^4$	$4,1264 \cdot 10^{-7}$
DDC112		$1,1937 \cdot 10^5$	$7,6254 \cdot 10^4$	$8,1192 \cdot 10^{-8}$
DDC112, diodi na masi		$9,3663 \cdot 10^4$	$6,8387 \cdot 10^4$	$4,7640 \cdot 10^{-8}$

Tabela 14: Varianca signala iz A/D pretvornika za $N_{DDC101} = 38$, $N_{DDC112} = 240$

A/D pretvornik	Svetloba	var(sense)	var(reference)	var(sense / reference)
DDC101	tema	4,8889	21,676	$2,1400 \cdot 10^{-6}$
DDC112, diodi na masi		6,7222	6,2614	$1,0165 \cdot 10^{-7}$
DDC101	IR	$3,6100 \cdot 10^4$	$2,3576 \cdot 10^4$	$6,1173 \cdot 10^{-9}$
DDC112, diodi na masi		$5,6263 \cdot 10^4$	$3,2258 \cdot 10^4$	$6,1472 \cdot 10^{-9}$
DDC101	UV	$1,1436 \cdot 10^5$	$6,7028 \cdot 10^4$	$2,9303 \cdot 10^{-7}$
DDC112, diodi na masi		$1,2911 \cdot 10^5$	$8,8444 \cdot 10^4$	$7,1036 \cdot 10^{-8}$

Število meritev za izračun enega podatka je v tabeli 14 pri DDC112 povečano za faktor 2 in pri DDC101 za faktor 3,8, tako da je celotni čas meritev za oba A/D pretvornika enak. Za primerjavo med DDC112 z diodama na masi in DDC101 definirajmo faktor izboljšave po enačbi (30).

$$Faktor\ izboljšave = \frac{\text{var}\left(\frac{sen_{DDC101}}{ref_{DDC101}}\right)}{\text{var}\left(\frac{sen_{DDC112}}{ref_{DDC112}}\right)} \quad (30)$$

Tabela 15: Faktor izboljšave DDC112 glede na DDC101

Pogoj	$N_{DDC101} = 10, N_{DDC112} = 120$	$N_{DDC101} = 38, N_{DDC112} = 240$
tema	1,2183	21,053
IR	17,189	0,99514
UV	8,6616	4,1251

Rezultati v tabeli 15 potrjujejo predvidevanja, da se bo točnost meritev z uporabo dvo-kanalnega A/D pretvornika izboljšala ter da bo izboljšava še posebej očitna pri manjšem času meritve. Faktor izboljšave za meritve v temi ni bistven, ker so te meritve že tako ali tako bistveno bolj točne kot meritve pri prižgani LED diodi (tabeli 13 in 14) in je pri odštevanju od s_b in r_b (7) za točnost rezultata pomembna predvsem točnost meritev s_b in r_b . Pri izračunu posameznega podatka s povprečenjem zaporednih meritev DDC101 se meritve, ki močno izstopajo, izloči. Za DDC112 bi bil tak pristop z vidika programiranja bolj zapleten in je bil zato odložen, čeprav se predvideva, da bi se s tem merilna točnost pri uporabi DDC112 dodatno izboljšala.

Vhodni signal CONV naj bi bil pri DDC112 za natančnejše delovanje sinhroniziran z vzponom signala CLK [28, stran 9]. V načrtanem vezju je signal CONV sinhroniziran s padcem signala CLK. Merilni rezultat bi se morda izboljšal tudi z dodanim inverterjem, ki bi pred vhodom v DDC112 obrnil uro.

6.2 A/D pretvornik ADS8341

Pri preizkušanju vezja sekundarni A/D pretvornik ADS8341 ni deloval. Signali na ADS8341 so bili temeljito preverjeni z osciloskopom. Ugotovljeno je bilo, da se ADS8341 na pravilne zahteve računalnika ne odziva. ADS8341 je edini element s tako visoko gostoto spenk (ohišje SSOP) in možno je, da se je zaradi težav med spajkanjem uničil. Meritve koncentracije BC z novim detektorskim vezjem so zato izvedene s krmiljenjem namesto z regulacijo pretoka. V izračunu koncentracije BC je vrednost pretoka ocenjena s konstanto.

6.3 Stabilizacija napajalnih in referenčnih napetosti

V tabelah 16 in 17 so podane ocene šumov napajalnih in referenčnih napetosti. Vrednosti so iz zaslona osciloskopa približno ocenjene od najnižje do najvišje točke (peak to peak). Stabilizacija ni bila učinkovita, na nekaterih mestih se je šum celo povečal.

Tabela 16: Šum napajalnih napetosti

Različica vezja	5 V napajanje / mV	12 V napajanje / mV	Napajanje A/D pretvornika / mV
AE22 (DDC101)	<ul style="list-style-type: none"> 80, neperiodičen 120, redka odstopanja 	<ul style="list-style-type: none"> 90, neperiodičen 	<ul style="list-style-type: none"> 150, neperiodičen
AE33 TEST-1 (DDC112)	<ul style="list-style-type: none"> 80, neperiodičen 	<ul style="list-style-type: none"> 60, neperiodičen 120, redka odstopanja 	<ul style="list-style-type: none"> 100 do 150, neperiodičen

Tabela 17: Šum referenčnih napetosti

Različica vezja	Referenca za A/D pretvornik, 1. meritev / mV	Referenca za A/D pretvornik, 2. meritev / mV
AE22 (DDC101)	<ul style="list-style-type: none"> 120, perioda 60 ms 	<ul style="list-style-type: none"> 100, neperiodičen
AE33 TEST-1 (DDC112)	<ul style="list-style-type: none"> 200, neperiodičen 	<ul style="list-style-type: none"> 140, periodi 300 ns in 2 ms 80, neperiodičen (na izhodu generatorja reference)

Šumi v napajalnih in referenčnih napetostih verjetno nimajo opaznega vpliva na točnost meritev. Točnost meritev v temi je za razred boljša od točnosti meritev pri prižgani LED diodi (tabeli 13 in 14), čeprav napajalne in referenčne napetosti vplivajo podobno na vse meritve.

6.4 Spletni vmesnik

Vmesnik je prikazan na sliki 35 v poglavju 5.2.2.4. Velikost HTML kode je 1 KB, skupaj s PNG sliko je podatkov za prenos do spletnega brskalnika za okoli 6 KB. HTML koda je preprosta, vsebuje samo osnovne elemente, ki jih brskalnik hitro interpretira. Nalaganje strani na običajnih namiznih računalnikih v lokalni mreži (LAN) traja komaj opazen delček sekunde. Kljub temu ponuja HTTP strežnik vse potrebne podatke. Nameščeni storitvi FTP in

TELNET omogočata celotno upravljanje aethalometra na daljavo, namenjeni pa sta bolj za razvoj in servisiranje kot za končnega uporabnika. Enostavnejše upravljanje ali vsaj spreminjanje programskih nastavitvev bi bilo lahko omogočeno tudi preko spletnega vmesnika, ki bi vseboval gumbe in obrazce za vnos novih vrednosti. To bi spletni strežnik dodatno obremenilo in bi bilo izvajanje programa za delovanje aethalometra bolj ovirano. Tudi z najvišjo prioriteto procesa namreč ni možno zagotoviti neprekinjenega izvajanja procesa. Če bi bilo to potrebno, se lahko uporabi real-time operacijski sistem, primer je že omenjeni RTAI [34]. Iz varnostnih razlogov bi bilo morda potrebno namestiti dodatne aplikacije, na primer OpenSSL [53]. Kljub vsemu pa bi spletni vmesnik, ki bi tudi končnemu uporabniku omogočal enostavno in varno upravljanje, bil velika in očitna izboljšava, o kateri je vredno razmisliti.

7. Zaključek

Uvodoma je bilo pregledno predstavljeno področje merjenja aerosolov, od razlogov za potrebo po nadzoru nad trdnimi delci do različnih metod merjenja, med katerimi prevladujejo optične metode. V nadaljevanju je bil predstavljen aethalometer kot eden najpogosteje uporabljenih instrumentov za merjenje koncentracije črnega ogljika z optično metodo v realnem času. Na osnovi analize merilne negotovosti aethalometra je bil spremenjen del merilnega vezja. Ključna sprememba je uporaba dvo-kanalnega A/D pretvornika namesto eno-kanalnega. Rezultati potrjujejo izboljšano točnost meritve optičnega slabljenja, ki je glavni vir naključnih napak pri meritvi koncentracije črnega ogljika. Hkrati je bila v programskem jeziku C razvita tudi nova programska oprema za upravljanje aethalometra, ki s pomočjo dodatnih aplikacij na vgrajenem Linuxu omogoča dostop do merilnih rezultatov in stanja aethalometra preko Ethernet in USB vmesnikov. Programska koda je razdeljena na smiselne in samostojne dele, uporabljena so sodobna orodja za dokumentacijo in sledenje različicam, s čimer je vzdrževanje in spreminjanje programske kode bolj enostavno in pregledno.

8. Priloge

8.1 Dnevniški izpis

Najprej je bila spremenjena časovna baza na 600 sekund, zatem so se pričele meritve.

```
Feb 20 04:58:05 2008 [4] Configuration file "aethalometer.conf" read
Feb 20 04:58:05 2008 [6] Locale 6 set to en_US
Feb 20 04:58:05 2008 [6] Locale 5 set to en_US
Feb 20 04:58:05 2008 [6] Locale 2 set to en_US
Feb 20 04:58:05 2008 [5] Locales set to en_US, en_US and en_US
Feb 20 04:58:06 2008 [5] Read: 0x43
Feb 20 04:58:06 2008 [6] sleep finished due to a keypress, numKeys = 1
Feb 20 04:58:07 2008 [5] Read: 0x43
Feb 20 04:58:08 2008 [5] Read: 0x0A
Feb 20 04:58:08 2008 [6] Chosen option index: 1
Feb 20 04:58:09 2008 [5] Read: 0x43
Feb 20 04:58:09 2008 [5] Read: 0x43
Feb 20 04:58:10 2008 [5] Read: 0x0A
Feb 20 04:58:10 2008 [6] Chosen option index: 2
Feb 20 04:58:10 2008 [6] menuCreateChosenTitle(2 Settings, 3, Timebase)
Feb 20 04:58:10 2008 [5] Formatted title: "2.3 Timebase"
Feb 20 04:58:12 2008 [5] Read: 0x36
Feb 20 04:58:12 2008 [5] Read: 0x30
Feb 20 04:58:13 2008 [5] Read: 0x30
Feb 20 04:58:14 2008 [5] Read: 0x0A
Feb 20 04:58:14 2008 [5] typed: "600"
Feb 20 04:58:16 2008 [5] Read: 0x1B
Feb 20 04:58:16 2008 [6] ESC pressed, no option chosen
Feb 20 04:58:20 2008 [5] Read: 0x1B
Feb 20 04:58:20 2008 [6] ESC pressed, no option chosen
Feb 20 04:58:27 2008 [5] Read: 0x0A
Feb 20 04:58:27 2008 [6] Chosen option index: 0
Feb 20 04:58:27 2008 [6] switchOnLamp(0)
Feb 20 04:58:27 2008 [6] Setting flow to 2.00 LPM
Feb 20 04:58:27 2008 [6] File "/proc/mounts" read successfully, length = 296
Feb 20 04:58:58 2008 [5] Raw data from DDC112: ref = 0000322, sense = 0000350
Feb 20 04:58:58 2008 [5] operate(): loop level 1 (tape advance) start
Feb 20 04:58:58 2008 [6] tapeAdvance(1)
Feb 20 04:58:58 2008 [6] bufPar[0]: "Main menu          "
Feb 20 04:58:58 2008 [6] bufPar[1]: "Tape: 20% Saver Off"
Feb 20 04:58:58 2008 [6] bufPar[2]: "Disk:117.4MB 0.0 LPM"
```

```
Feb 20 04:58:58 2008 [6] bufPar[3]: " BC =      0 ng/m3  "
Feb 20 04:58:58 2008 [6] bypassValve(1)
Feb 20 04:58:58 2008 [6] switchOnLamp(1)
Feb 20 04:59:28 2008 [6] sleep finished due to timeout, numKeys = 0
Feb 20 04:59:48 2008 [6] sleep finished due to timeout, numKeys = 0
Feb 20 04:59:58 2008 [6] sleep finished due to timeout, numKeys = 0
Feb 20 04:59:58 2008 [6] bypassValve(0)
Feb 20 05:00:29 2008 [5] Raw data from DDC112: ref = 0649736, sense = 0575382
Feb 20 05:00:29 2008 [6] writeSingleParameter(spots, 199, aethalometer.status)
Feb 20 05:00:29 2008 [4] Tape moved for 1 spots
Feb 20 05:00:29 2008 [3] getNextRoundTime(): previousTime is 0, will set it to
current time
Feb 20 05:00:29 2008 [6] Next (round) time = Wed 20 Feb 2008 05:10:00 AM UTC
Feb 20 05:00:29 2008 [5] readSignalsLampOn(, 1203484200)
Feb 20 05:00:29 2008 [6] switchOnLamp(1)
Feb 20 05:09:59 2008 [6] sleep finished due to timeout, numKeys = 0
Feb 20 05:10:29 2008 [5] Raw data from DDC112: ref = 0648271, sense = 0571738
Feb 20 05:10:30 2008 [2] Could not read from A/D converter ADS8341 (0)
Feb 20 05:10:30 2008 [6] Time: now = 1203484230, end = 1203484200.
Feb 20 05:10:30 2008 [6] Rel. atn = 0.000000, atnMax = 75, Tape advance not needed
yet
Feb 20 05:10:30 2008 [5] operate(): loop level 2 (timebase) start
Feb 20 05:10:30 2008 [6] Next (round) time = Wed 20 Feb 2008 05:20:00 AM UTC
Feb 20 05:10:30 2008 [5] readSignalsLampOn(, 1203484800)
Feb 20 05:10:30 2008 [6] switchOnLamp(1)
Feb 20 05:19:59 2008 [6] sleep finished due to timeout, numKeys = 0
Feb 20 05:20:29 2008 [5] Raw data from DDC112: ref = 0648200, sense = 0570000
Feb 20 05:20:30 2008 [2] Could not read from A/D converter ADS8341 (0)
Feb 20 05:20:30 2008 [6] Time: now = 1203484830, end = 1203484800.
Feb 20 05:20:30 2008 [6] Calculated conc = 442.284463, time period = 600
Feb 20 05:20:30 2008 [6] timePrevData = 0, timeLastData = 1203484830
Feb 20 05:20:30 2008 [5] Wrote 1 empty data lines to CSV file
Feb 20 05:20:30 2008 [6] File "/proc/mounts" read successfully, length = 296
Feb 20 05:20:30 2008 [5] Data line: "20-Feb-02","05:20:30",442,2.00,0.001831,
2.981172,0.001684,3.390167,1.000000,0.293677
Feb 20 05:20:31 2008 [6] Setting analog out to 0.11 V
Feb 20 05:20:31 2008 [6] Rel. atn = 0.293677, atnMax = 75, Tape advance not needed
yet
Feb 20 05:20:31 2008 [5] operate(): loop level 2 (timebase) start
Feb 20 05:20:31 2008 [6] Next (round) time = Wed 20 Feb 2008 05:30:00 AM UTC
Feb 20 05:20:31 2008 [5] readSignalsLampOn(, 1203485400)
Feb 20 05:20:31 2008 [6] switchOnLamp(1)
```

8.2 Datoteka s konfiguracijo programa za delovanje aethalometra

```
#####  
#                                                                 #  
# Aethalometer config file                                     #  
#                                                                 #  
# Generated by program version   r124                         #  
# Time: 2008-01-29, 19:00:03                                   #  
#                                                                 #  
# Lines starting with hash (#) are comments.                 #  
# Lines enclosed with square brackets denote beginning of a section. #  
#                                                                 #  
#####
```

[Hardware]

```
# Chassis Type. 0 = rack mount, 1 = portable  
chassis = 0
```

```
# Number of LEDs (1, 2, 7)  
numberOfLamps = 2
```

```
# Lamp wavelengths in nm  
lambda_lamp_1 = 880  
lambda_lamp_2 = 370  
lambda_lamp_3 = 520  
lambda_lamp_4 = 590  
lambda_lamp_5 = 660  
lambda_lamp_6 = 370  
lambda_lamp_7 = 950
```

```
# Lamp sigma values in m2 / g  
sigma_lamp_1 = 16.600000  
sigma_lamp_2 = 39.500000  
sigma_lamp_3 = 28.100000  
sigma_lamp_4 = 24.800000  
sigma_lamp_5 = 22.200000  
sigma_lamp_6 = 39.500000  
sigma_lamp_7 = 15.400000
```

```
# Lamp names  
name_lamp_1 = IR-1
```



```
name_lamp_2 = UV
name_lamp_3 = Green
name_lamp_4 = Yellow
name_lamp_5 = Red
name_lamp_6 = UV
name_lamp_7 = IR-2

# Area of collecting spot on tape / cm^2
spotArea = 0.500000

# Air pump zero offset in volts
pumpZero = 0.000000

# Air pump scale factor (LPM / volt)
pumpScale = 1.900000

# Flowmeter zero offset in volts
flowMeterZero = 0.153523

# Flowmeter scale factor (LPM / volt)
flowMeterScale = 2.000000

[Operation]

# Timebase for measurements, in seconds
timeBase = 300

# Bypass valve behaviour for tape saving
# 0 off (pump air through the filter all the time)
# 1 auto (set automatically, depending on timebase and current concentration)
# 3 x3
# 10 x10
tapeSaver = 0

# Tape spot spacing
spotsPerAdvance = 1

# How many hours before forced tape advance. 0 for automatic.
tapeAdvancePeriod = 0

# Maximum optical attenuation increase compared to clean tape.
# If tape advance is set to automatic, it is advanced when attenuation gets
```

```
# bigger than this value.
atnMax = 75

# If 1 then wait after startup untill instrument stabilizes (pump zero V, flow)
warmUp = 0

# Desired air flow in LPM
flow = 4.000000

# Enable/disable beeping
screenBeep = 1

# Low Flow Warning percentage
lowFlowWarning = 5.000000

[Strings]

# Title line 1
title1 = MAGEE SCIENTIFIC

# Title line 2
title2 = AETHALOMETER

# Instruments unique ID for German Network Protocol
instID = 123

# Security code to exit from Operate mode
securityCode = 111

# Instrument serial number
serNumber = 217

[Data files]

# Automatically overwrite old data files when disk full
overwriteOldData = 0

# Data format. 0 = normal, 1 = compressed, 2 = verbose
dataFormat = 2

# File compression
```

```
# 0 = no compression
# 1 = tar bzip2 (one compressed archive for all files)
# 2 = tar gzip (one compressed archive for all files)
# 3 = bzip2 (compress every file to its own archive)
# 4 = gzip (compress every file to its own archive)
# 5 = zip (compress every file to its own archive)
compression = 0

# Data storage media
# 0 = floppy disk
# 1 = memory card (any card that fits)
# 2 = any, but prefer floppy
# 3 = any, but prefer memory card
storageDevice = 3

# Write data to temporary internal storage device when no storage media is
# available and move that data to the real storage media when it becomes
# available again, e.g. after a bad floppy was replaced.
saveDataInternally = 1

[Units and conversions]

# BC Unit. 0 for ng, 1 for ug (micro grams)
bcUnit = 0

# Network scale factor in ( ng/m3 BC ) / mV
netScaleFac = 10.000000

# Volume unit for concentration.
# 0 = standard volume unit, 1 = volumetric vol. unit
volUnit = 0

# Pressure parameter for volumetric units. In mbar
pressure = 1013.000000

# Temperature parameter for volumetric units. In Kelvins.
temperature = 293.000000

# Optical Calibration 0 = BC, 1 = EC, 2 = C
opticCalibr = 0

# Smoothing factor
```

```
smooth = 0
```

```
# Delta UV-display 0 = off, 1 = on
```

```
dUV = 0
```

```
[Alarm]
```

```
# Alarm mode for analog output
```

```
# 0 = no alarm, output represents BC value
```

```
# 1 = output is -5V (BC invalid), 0V (BC < alarmValue), or +5V (BC >= alarmValue)
```

```
# 2 = output is -5V (BC invalid) or 0V (BC valid)
```

```
alarmMode = 0
```

```
# Treshold for analog output alarm
```

```
# 0 = automatically select lamp with highest concentration
```

```
# from 1 to numberOfLamps = manually select lamp
```

```
alarmValue = 0.000000
```

```
# Lamp index (channel) for alarm
```

```
alarmCh = 0
```

```
[Debugging output]
```

```
# Verbosity level of debugging output:
```

```
# 0 no debug output
```

```
# 1 fatal error; the program stops due to this error
```

```
# 2 major error; the program can still continue
```

```
# 3 minor error
```

```
# 4 normal operation
```

```
# 5 verbose
```

```
# 6 even more verbose
```

```
# 7 display everything
```

```
# 8 include also source filenames and line numbers
```

```
debugLevel = 6
```

```
# Print timestamp with each debug message. 0 = no, 1 = yes
```

```
debugPrintTime = 1
```

```
# Print seriousness of event with each debug message. 0 = no, 1 = yes
```

```
debugPrintSeriousness = 1
```

[Localization]

```
# Locales for display menu, not for debugging output.  
# The usual form of the value is xx_YY where xx is a 2 character language code  
# and YY is a 2 character country code. Examples: en_US, en_GB, fr_FR, fr_CA  
# For compatibility reasons, this does not affect data in CSV files.  
  
# Locale for text language only  
lc_messages = en_US  
  
# Locale for date and time format  
lc_time = en_US  
  
# Locale for all other categories, including numbers  
lc_all = en_US  
  
# End of Aethalometer config file
```

9. Seznam uporabljenih virov

- [1] International Organization for Standardization , ISO Standard 7708:1995, Air quality – Particle size fraction definitions for health-related sampling, Geneva, Švica, 1995.
- [2] C. A. Pope, D. W. Dockery, “Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect”, Journal of the Air & Waste Management Association, 56, 709-742, 2006.
- [3] D. Rosenfeld, “Suppression of Rain and Snow by Urban and Industrial Air Pollution”, Science, 287, 1793-1796, 2000.
- [4] Y. J. Kaufman, I. Koren, “Smoke and pollution aerosol effect on cloud cover”, Science, 313, 655-658, 2006.
- [5] J. R. McConnell, R. Edwards, G. L. Kok, M. G. Flanner, C. S. Zender, E. S. Saltzman, J. R. Banta, D. R. Pasteris, M. M. Carter, J. D. W. Kahl, “20th-century industrial black carbon emissions altered arctic climate forcing”, Science, 317, 1381-1384, 2007.
- [6] A. D. A. Hansen, The Aethalometer 2005.07, Magee Scientific Co., Berkeley, California, ZDA, 2005.
- [7] K. L. Jansen, T. V. Larson, J. Q. Koenig, T. F. Mar, C. Fields, J. Stewart, M. Lippmann, “Associations between Health Effects and Particulate Matter and Black Carbon in Subjects with Respiratory Disease”, Thorax, 60, 455-461, 2005.
- [8] J. Schwartz, A. Litonjua, H. Suh, M. Verrier, A. Zanobetti, M. Syring, B. Nearing, R. Verrier, P. Stone, G. MacCallum, F. E. Speizer, D. R. Gold, “Traffic related pollution and heart rate variability in a panel of elderly subjects”, Thorax, 60, 455-461, 2005.
- [9] N. Kulkarni, N. Pierse, L. Rushton, J. Grigg, “Carbon in Airway Macrophages and Lung Function in Children”, New England Journal of Medicine, 355, 21-30, 2006.
- [10] Commission of the European Communities, Proposal for a Directive of the European Parliament and of The Council on ambient air quality and cleaner air for Europe, 2005/0183 (COD).
- [11] U.S. Environmental Protection Agency, Clean Air Act.
URL: <http://www.epa.gov/oar/caa/caa.txt> (Datum dostopa: 13. 12. 2007)
- [12] U.S. Environmental Protection Agency, National Ambient Air Quality Standards.

URL: <http://www.epa.gov/air/criteria.html> (Datum dostopa: 13. 12. 2007)

- [13] M. Born, E. Wolf, Principles of Optics, 4. izdaja, Cambridge University Press, 2006.
- [14] E. Hecht, Optics, Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company Inc., stran 110, 1987.
- [15] International Organization for Standardization, ISO Standard 9835:1993, Ambient air – Determination of a black smoke index, Geneva, Švica, 1993.
- [16] E. Weingartner, H. Saathoff, M. Schnaiter, N. Streit, B. Bitnar, U. Baltensperger (2003) “Absorption of light by soot particles: determination of the absorption coefficient by means of aethalometers”, Journal of Aerosol Science, 34, 1445-1463.
- [17] URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html> (Datum dostopa: 30. 10. 2007)
- [18] A. D. A. Hansen, elektronska pošta, 2006.
- [19] R. Hittenberger, A. Petzold, H. Bauer, P. Ctyroky, P. Pouresmaeil, L. Laskus, H. Puxbaum (2006) “Intercomparison of thermal and optical measurement methods for elemental carbon and black carbon at an urban location”, Environmental Science & Technology, 40, 6377-6383.
- [20] P. Venkatachari, L. M. Zhou, P. K. Hopke, J. J. Schwab, K. L. Demerjian, S. Weimer, O. Hogrefe, D. Felton, O. Rattigan, “An intercomparison of measurement methods for carbonaceous aerosol in the ambient air in New York City”, Aerosol Science and Technology, 40, 788-795, 2006.
- [21] L. A. Gundel, R. L. Dod, H. Rosen, T. Novakov, “The relationship between optical attenuation and black carbon concentration for ambient and source particles”, Sci. Total Environ., 36, 197, 1984.
- [22] W. P. Arnott, K. Hamasha, H. Moosmuller, P. J. Sheridan, J. A. Ogren, “Towards aerosol light-absorption measurements with a 7-wavelength Aethalometer: Evaluation with a photoacoustic instrument and 3-wavelength nephelometer”, Aerosol Science and Technology, 39, 17-29, 2005.
- [23] A. Virkkula, T. Mäkelä, R. Hillamo, T. Yli-Tuomi, A. Hirsikko, K. Hämeri, I. K. Koponen, “A Simple Procedure for Correcting Loading Effects of Aethalometer Data”,

Journal of the Air & Waste Management Association, 57, 1214–1222, 2007.

- [24] O. Schmid, P. Artaxo, W. P. Arnott, D. Chand, L. V. Gatti, G. P. Frank, A. Hoffer, M. Schnaiter, M. O. Andreae, “Spectral light absorption by ambient aerosols influenced by biomass burning in the Amazon Basin. I: Comparison and field calibration of absorption measurement techniques”, Atmospheric Chemistry and Physics, 6, 3443-3462, 2006.
- [25] gEDA – GPL'd suite of Electronic Design Automation tools.
URL: <http://www.geda.seul.org/> (Datum dostopa: 11. 2. 2008)
- [26] A/D pretvorniki Burr-Brown (Texas Instruments) – cene in dobavljivost.
URL: <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/ddc101.html>
<http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/ddc112.html>
<http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/ddc114.html>
<http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/ads8341.html> (Datum dostopa: 11. 2. 2008)
- [27] A/D pretvornik Burr-Brown DDC101 (Texas Instruments) – specifikacije.
URL: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ddc101.pdf> (Datum dostopa: 11. 2. 2008)
- [28] A/D pretvornik Burr-Brown DDC112 (Texas Instruments) – specifikacije.
URL: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ddc112.pdf> (Datum dostopa: 11. 2. 2008)
- [29] A/D pretvornik Burr-Brown DDC114 (Texas Instruments) – specifikacije.
URL: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ddc114.pdf> (Datum dostopa: 11. 2. 2008)
- [30] QFN ohišje.
URL: <http://focus.ti.com/lit/ml/mpqf140a/mpqf140a.pdf> (Datum dostopa: 11. 2. 2008)
- [31] A/D pretvornik Burr-Brown ADS8341 (Texas Instruments) – specifikacije.
URL: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ads8341.pdf> (Datum dostopa: 14. 2. 2008)
- [32] Control and Measurement Device Interface.
URL: <http://www.comedi.org/> (Datum dostopa: 4. 2. 2008)
- [33] BusyBox
URL: <http://www.busybox.net/> (Datum dostopa: 4. 2. 2008)

- [34] RealTime Application Interface for Linux.
URL: <https://www.rtai.org/> (Datum dostopa: 4. 2. 2008)
- [35] Adeos
URL: <http://home.gna.org/adeos/> (Datum dostopa: 4. 2. 2008)
- [36] Xenomai
URL: <http://www.xenomai.org/> (Datum dostopa: 4. 2. 2008)
- [37] Linux Hotplugging
URL: <http://linux-hotplug.sourceforge.net/> (Datum dostopa: 4. 2. 2008)
- [38] GNU GRUB
URL: <http://www.gnu.org/software/grub/> (Datum dostopa: 4. 2. 2008)
- [39] Vsftpd – Very Secure FTP Daemon.
URL: <http://vsftpd.beasts.org/> (Datum dostopa: 5. 2. 2008)
- [40] BlueZ
URL: <http://www.bluez.org/> (Datum dostopa: 5. 2. 2008)
- [41] Gnuplot
URL: <http://www.gnuplot.info/> (Datum dostopa: 4. 2. 2008)
- [42] Thttpd – tiny/turbo/throttling HTTP server.
URL: <http://www.acme.com/software/thttpd/> (Datum dostopa: 5. 2. 2008)
- [43] KDevelop
URL: <http://www.kdevelop.org/> (Datum dostopa: 13. 02. 2008)
- [44] Doxygen
URL: <http://www.stack.nl/~dimitri/doxygen/> (Datum dostopa: 4. 2. 2008)
- [45] Subversion
URL: <http://subversion.tigris.org/> (Datum dostopa: 4. 2. 2008)
- [46] Linux Programmer's Manual, Man pages 2.67, isalpha, sekcija 3.

URL: <http://linux.die.net/man/3/isalpha> (Datum dostopa: 4. 2. 2008)

[47] Comedi – podprti čipi.

URL: <http://www.comedi.org/hardware.html> (Datum dostopa: 4. 2. 2008)

[48] GNU General Public License.

URL: <http://www.gnu.org/copyleft/gpl.html> (Datum dostopa: 20. 2. 2008)

[49] GNU Lesser General Public License.

URL: <http://www.gnu.org/licenses/lgpl.html> (Datum dostopa: 20. 2. 2008)

[50] GNU gettext

URL: <http://www.gnu.org/software/gettext/> (Datum dostopa: 4. 2. 2008)

[51] Licenci za GNU gettext.

URL: <http://www.gnu.org/software/gettext/manual/gettext.html#Licenses> (Datum dostopa: 4. 2. 2008)

[52] Urejanje PO datotek.

URL: http://www.gnu.org/software/gettext/manual/html_node/Editing.html#Editing
(Datum dostopa: 15. 2. 2008)

[53] OpenSSL

URL: <http://www.openssl.org/> (Datum dostopa: 20. 2. 2008)

10. Izjava o avtorstvu

Izjavljam, da sem magistrsko delo izdelal samostojno pod vodstvom mentorja prof. dr. Andreja Žemve, izrednega profesorja na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Izkazano pomoč drugih sodelavcev sem v celoti navedel v zahvali.

V Ljubljani, marec 2008.

Mitja Vardjan