UNIVERZA V MARIBORU

FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO,

RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Jure Vreča

MERJENJE ATMOSFERSKIH PARAMETROV

zaključno delo

Maribor, avgust 2017

MERJENJE ATMOSFERSKIH PARAMETROV

zaključno delo

Študent(ka):	Jure Vreča
Študijski program:	Univerzitetni študijski program
	Elektrotehnika UN
Smer:	Elektronika
Mentor(ica):	doc. dr. Iztok Kramberger
Lektor(ica):	Špela Krivec

Merjenje atmosferskih parametrov

Ključne besede: merjenje, temperatura, tlak, relativna vlažnost, koncentracija trdnih delcev, vremenski balon

Povzetek

V projektni nalogi smo predstavili zasnovo elektronskega sistema za samodejno merjenje naslednjih parametrov atmosfere: temperatura, pritisk, relativna vlažnost in koncentracija trdnih delcev. Elektronski sistem smo zasnovali s ciljem izvajanja samodejnih meritev na vremenskem balonu. Uporabili smo razvojno ploščo Atmel ATMEGA256RFR2 Xplained Pro.

Atmospheric Parameter Measurement

Key words: measurement, temperature, pressure, relative humidity, particulate matter, weather balloon

Abstract

The project assignment presents the design process of an electronic system for automated measurement of the following atmospheric parameters: temperature, pressure, relative humidity and particulate matter concentration. The electronic system was designed to be used as part of a weather balloon. We used the Atmel ATMEGA256RFR2 Xplained Pro development board.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Iztoku Krambergerju za strokovne nasvete in drugo pomoč pri izvedbi projektne naloge.

Zahvaljujem se družini za izkazano podporo med študijem in pisanjem te projektne naloge.

Zahvalil bi se tudi dr. Marku Kosu, ki mi je tudi bil v pomoč pri izvedbi projektne naloge.

KAZALO VSEBINE

1 UVOD 1

2 TEORETIČNO OZADJE 2

2.1 O atmosferi 2

2.2 Meritve drugih vremenskih balonov 3

2.3 Analiza meritev drugih vremenskih balonov 5

2.4 Merjenje temperature zraka 6

2.5 Uporovni termometri 8

2.6 Merjenje vlažnosti 11

2.7 Merjenje zračnega tlaka 12

2.8 Merjenje koncentracije trdnih delcev 14

2.9 Optična metoda merjenja koncentracije trdnih delcev 15

3 ZASNOVA SISTEMA 16

3.1 Konceptualna zasnova 16

3.2 Zasnova merilnega modula 17

3.3 Merilnik upornosti in temperaturno tipalo 18

3.4 Merilnik pritiska 20

3.5 Merilnik relativne vlažnosti 22

3.6 Merilnik koncentracije trdnih delcev 23

3.7 Razvojna plošča z mikrokrmilnikom 24

3.8 Načrtovanje tiskanega vezja 25

3.9 Načrtovanje vgrajene programske opreme 27

4 MERITVE IN REZULTATI 30

4.1 Referenčni merilniki in kraji merjenja 30

4.2 Merilna negotovost posameznih meritev 31

4.3 Meritve temperature, pritiska in relativne vlažnosti 32

4.4 Meritev koncentracije trdnih delcev 33

5 ZAKLJUČEK 35

PRILOGE 38

A. Shema merilnega modula 38

B. Izvleček iz programa 39

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Plasti atmosfere [2]. 2
Slika 2.2: Zemljevid sveta z označenimi kraji, kjer smo analizirali meritve [4]. 3
Slika 2.3: Padanje pritiska nad Slovenijo dne 1.1.2016. 4
Slika 2.4: Temperaturne razmere nad Slovenijo ob različnih časih. 4
Slika 2.5: Temperaturne razmere nad Finsko ob različnih časih. 5
Slika 2.6: Temperaturne razmere nad Francosko Gvajano ob različnih časih 5
Slika 2.7: Risba Galilejevega termoskopa [5]. 6
Slika 2.8: Oba tipa uporovnih tipal [9]. 8
Slika 2.9: Shema merilnega vezja metode dveh žic. 9
Slika 2.10: Shema merilnega vezja metode štirih žic. 9
Slika 2.11: Kapacitivni senzor vlage (12). 12
Slika 2.12: Shematični prikaz delovanja MEMS barometra [14]. 13
Slika 2.13: Blokovna shema PMS3003. 15
Slika 3.1 Blokovni diagram sistema 16
Slika 3.2: Blokovna shema MAX31865 [15]. 18
Slika 3.3: Blokovni diagram MS5607-02BA [16]. 20
Slika 3.4: Honeywell HIH9131 [17]. 22
Slika 3.5: Razvojna plošča Atmel ATMEGA256RFR2 Xplained Pro [18]. 24
Slika 3.6: Pregled razvojne plošče ATMEGA256RFR2 Xplained Pro [18]. 24
Slika 3.7: Shema merilnega modula (večja kopija v prilogi). 25
Slika 3.8: Končno tiskano vezje v 2D pregledu 26
Slika 3.9: Končno vezje v 3D pregledu 26
Slika 3.10: Slika dejanskega tiskanega vezja 26
Slika 3.11: Diagram poteka vgrajenega programa. 27
Slika 3.12: Povezana razvojna plošča. 29

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1: Pregled krajev in časov meritev 4
Preglednica 2.2: Okviri za zasnovo sistema. 5
Preglednica 3.1: Uporabljeni pini na razvojni plošči 28
Preglednica 4.1: Kraji in časi merjenja. 30
Preglednica 4.2: Negotovosti posameznih senzorjev. 31
Preglednica 4.3: Meritve temperature 32
Preglednica 4.4: Meritve pritiska 32
Preglednica 4.5: Meritve relativne vlažnosti 32
Preglednica 4.6: Meritve koncentracije trdnih delcev med 19:00 in 20:00 33
Preglednica 4.7: Največja dovoljena povprečja koncentracije trdnih delcev PM10 34
Preglednica 4.8: Največja dovoljena povprečja koncentracije trdnih delcev PM2.5 34

SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV

R	upornost
T	temperatura
p	pritisk
F	sila
A	površina
α	koeficient temperaturne odvisnosti

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

ISO	International Organization for Standardization (sl. Mednarodna organizacija za standardizacijo)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (sl. Narodna služba za oceane in atmosfero)
IGRA	Integrated Global Radiosonde Archive (sl. Integriran mednarodni arhiv za vremenske balone)
IPRT	Industry Quality Platinum Resistance Temperature Detector (sl. Platinasti merilnik industrijske kakovosti za merjenje upornosti, odvisne od temperature)
RTD	Resistance Temperature Detection (sl. Temperaturno odvisni upor)
MEMS	Microelectromechanical system (sl. Mikroelektromehanski sistem)
TOEM	Tapered element oscillating microbalance (sl. Mikro ravnotežje ozkega nihajočega elementa)
SPI	Serial Peripheral Interface (sl. Serijski vmesnik za periferijo)
I2C	Inter-Integrated Circuit (sl. Povezana integrirana vezja)
MOSI	Master Out Slave In (sl. Gospodar ven, suženj notri)
SS	Slave Select (sl. Izbor sužnja)
CRC	Cyclic Redundancy Check (sl. Ciklično preverjanje redundance)
MSB	Most Significant Bit (sl. Najbolj utežen bit)
LSB	Least Significant Bit (sl. Najmanj utežen bit)
RISC	Reduced Instruction Set Computer (sl. Računalnik z majhnim številom ukazov)
SRAM	Static random-access memory (sl. Statični bralno-pisalni spomin)
EEPROM	Electricaly Erasable Programmable Read-Only Memory (sl. Električno zbrisljiv programirljiv bralni spomin)
TIV	Tiskano vezje
ADP	Analogno digitalna pretvorba
ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje

1 UVOD

Atmosfera je sestavljena iz raznih plinov, predvsem dušika in kisika, ki jih k sebi vleče teža Zemlje. »Atmosfera predstavlja le en odstotek premera zemlje« [1]. A kljub temu je merjenje atmosferskih parametrov pomembno, ker nam med drugim omogoča napoved vremena in spremljanje onesnaženosti zraka.

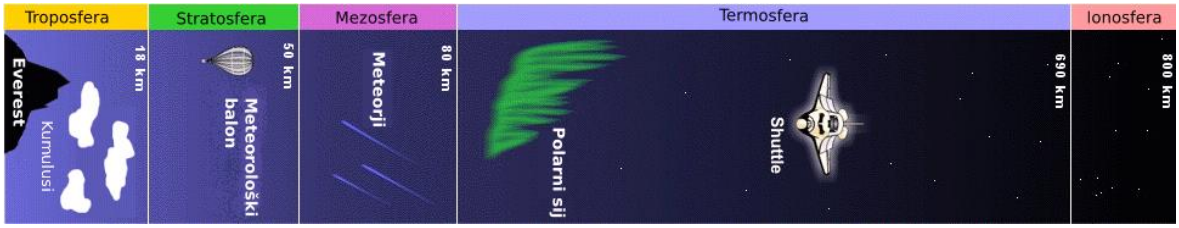
V diplomski nalogi smo predstavil zasnovo elektronskega sistema za samodejno merjenje naslednjih parametrov atmosfere: temperatura, pritisk, relativna vlažnost in koncentracija trdnih delcev. V zraku lebdijo trdni delci, ki so posledica izbruhov vulkanov, izpustov tovarn in podobno. Elektronski sistem smo zasnovali s ciljem izvajanja samodejnih meritev na balonu (vremenski balon). Sisteme za merjenje z vremenskim balonom včasih imenujemo radiosonde.

V naslednjem poglavju smo na kratko predstavil osnove o zgradbi atmosfere in fizikalne osnove senzorjev, ki smo jih uporabili. V poglavju »Zasnova sistema« smo nato sistem razdelali in ga zasnovali. Izbrali smo konkretne komponente in sistem tudi fizično izdelali. Poleg tega smo napisali programsko kodo, ki krmili mikrokrmilnik. Za tem je poglavje »Meritve in rezultati«, kjer smo sistem premerili in predstavili rezultate.

2 TEORETIČNO OZADJE

2.1 O atmosferi

Atmosfera (ali ozračje) je zračna plast, ki obdaja Zemljo. Ozračje je zelo zapleten sistem. Ima spremenljive karakteristike glede na nadmorsko višino, geografsko višino in širino, pa tudi glede na čas. Gostota zraka in tlak padata z višino približno po eksponentni funkciji. Temperatura zraka najprej pada z višino, nato pa se trend spremeni in spet narašča.
V tem poglavju smo analizirali podrobnosti atmosfere, da smo lahko določili, kateri senzorji bi bili primerni za takšno merjenje.
Atmosfero tipično delimo na naslednje plasti: troposfera, stratosfera, mezosfera, termosfera, ekosfera in magnetosfera.



Slika 2.1: Plasti atmosfere [2].

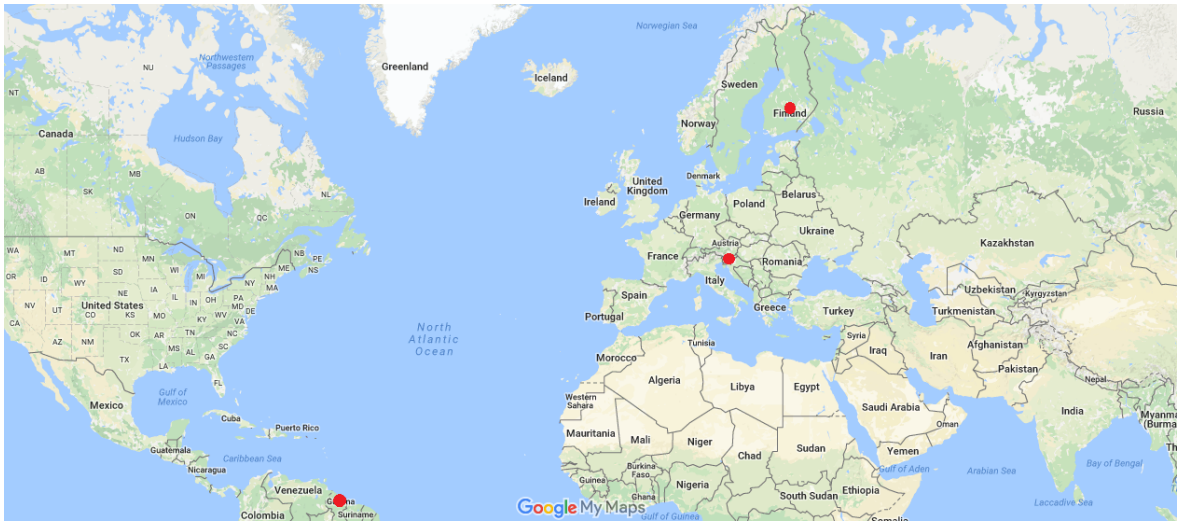
Vremenski baloni dosežejo višine do 40 km, zato smo opisali le troposfero in stratosfero, ki sta najnižji plasti ozračja.
Troposfera je najnižja plast ozračja. Ta plast sega do približno 18 km visoko[1]. Troposfera je plast, v kateri se odvija vreme. Vsebuje okoli 75 odstotkov vseh molekul plinov in skoraj vso vlago. V troposferi temperatura z višino pada razmeroma linearno, in sicer s hitrostjo 6,5 °C/km. Temperatura pade nekje do –60 ℃ (pozimi tudi do –80 ℃), nakar pride do izotermije [2]. Temu pojavu pravimo tropopavza. Temperatura je nato stalna do začetka stratosfere pri približno 18 km nadmorske višine. Tropopavza je časovno in krajevno spremenljiva. Na polarnih predelih pride do tropopavze pri 8 km nadmorske višine, na tropskih predelih pa pri 16 km nadmorske višine [1].

[1] Plast sega različno visoko v odvisnosti od zemljepisne širine. Mi smo vzeli višino, ki je tipična za slovensko zemljepisno širino.
[2] Izotermija je stanje nespreminjanja temperature glede na višino.

Nad tropopavzo je stratosfera, v kateri temperatura narašča z višino. Nad ekvatorjem se stratosfera začne 18 km visoko, nad polarnimi predeli pa že pri 9–10 km nadmorske višine. Konča se na okoli 50 km nadmorske višine. Turbulence v stratosferi skoraj ni, zato je idealna za letalstvo. Daljši leti tipično potekajo v spodnji stratosferi.
V stratosferi je največ ozona, predvsem na višini med 20 in 25 km [3].

2.2 Meritve drugih vremenskih balonov

Za zasnovo sistema smo morali začrtati neke meje, v katerih bo sistem deloval (predvsem temperaturno področje). V prid tehniškemu delu obstajajo razne »standardne atmosfere«, ki povzamejo lastnosti atmosfere in podajo neke okvire za načrtovanje sistemov. Eden takih je za primer »ISO 2533:1975 Standard Atmosphere«. Ker nam ti standardi niso bili dostopni v knjižnici in ker so dokaj dragi, smo se odločili za drugo pot. Odločili smo se, da analiziramo meritve drugih radiosond, ki so prosto dostopne na spletni strani Agencije za oceane in atmosfere (angl. NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration). Arhiv se imenuje IGRA (Integrated Global Radiosonde Archive) in vsebuje meritve radiosond celega sveta, med drugimi tudi iz Slovenije.
Analizirali smo meritve radiosond v treh krajih na različnih geografskih višinah v treh različnih časih v letu in jih prikazali na sliki 2.2.



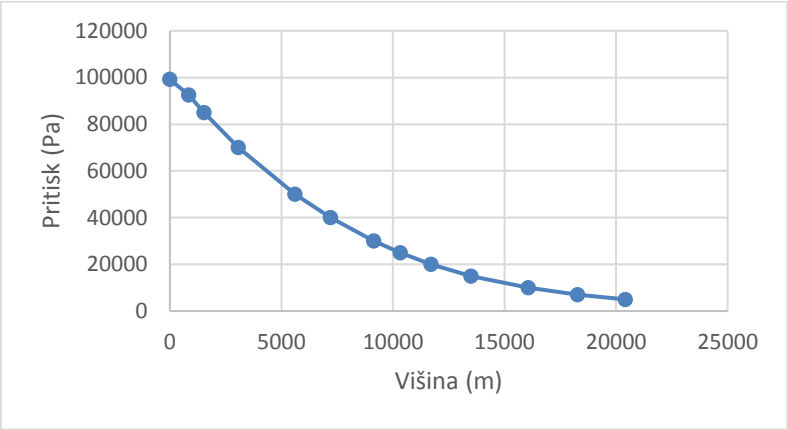
Slika 2.2: Zemljevid sveta z označenimi kraji, kjer smo analizirali meritve [4].

Preglednica 2.1: Pregled krajev in časov meritev

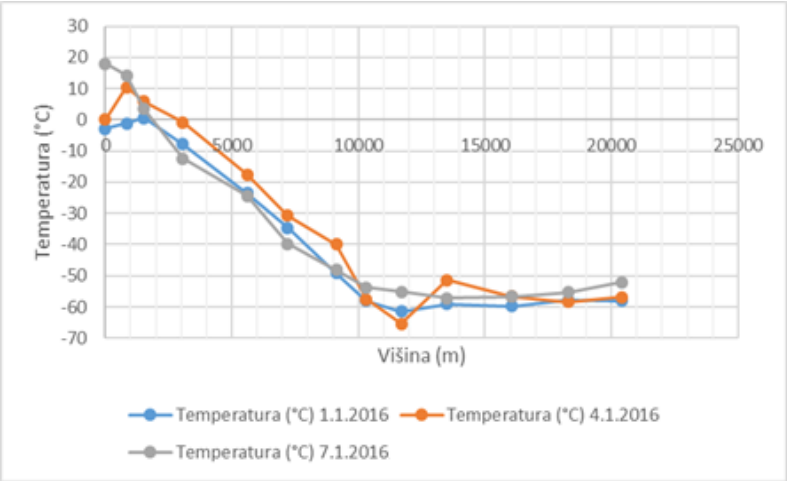
Kraj izpusta:	Datum in čas prvega izpusta:	Datum in čas drugega izpusta:	Datum in čas tretjega izpusta:
Ljubljana, Slovenija	1. 1. 2016 ob 5.12	1. 4. 2016 ob 4.35	1. 7. 2017 ob 4.32
Jyvaskyla, Finska	1. 1. 2016 ob 5.30	1. 4. 2016 ob 5.30	1. 7. 2017 ob 5.30
Cayenne Matoury, Francoska Gvajana	1. 1. 2016 ob 23.51	1. 4. 2016 ob 23.15	1. 7. 2017 ob 23.15

(Časi v preglednici so glede na časovni pas UTC in ne glede na lokalni čas.)

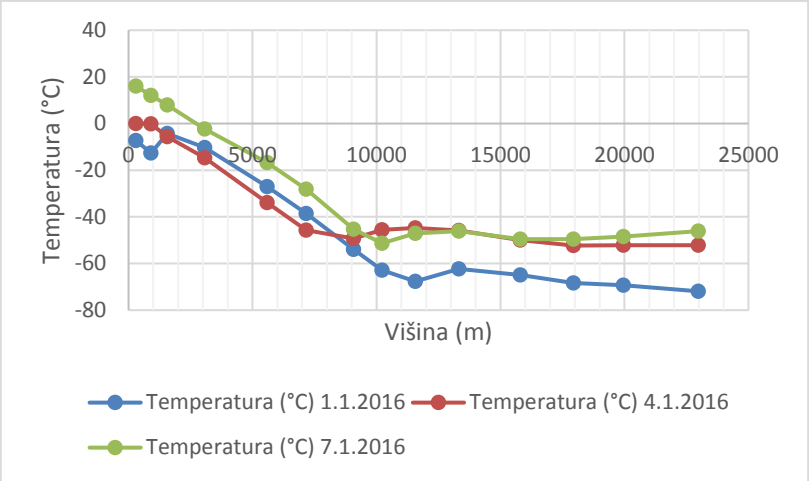
Podali bomo samo grafe temperaturnih razmer na različnih krajih (pregled krajev v preglednici 2.1.). Druga informacija, ki smo jo z analizo pridobili, so podatki o pritisku, vendar so si zelo podobni, zato bomo podali le en graf poteka za pritisk.



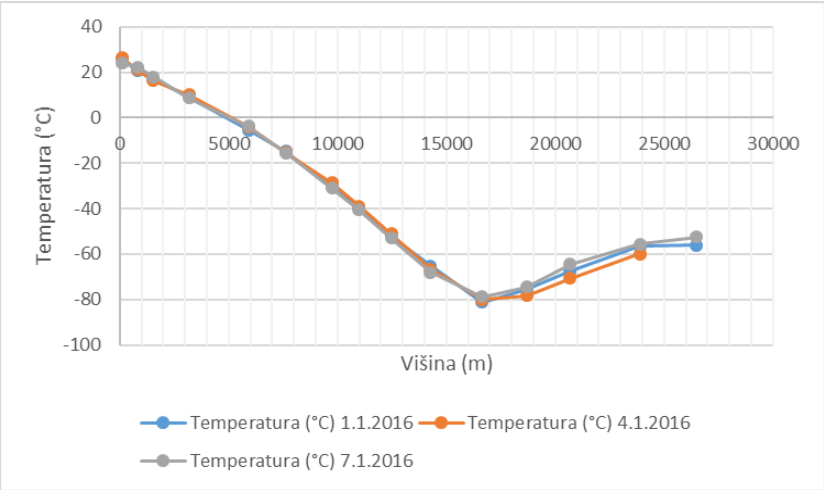
Slika 2.3: Padanje pritiska nad Slovenijo, dne 1. 1. 2016.



Slika 2.4: Temperaturne razmere nad Slovenijo ob različnih časih.



Slika 2.5: Temperaturne razmere nad Finsko ob različnih časih.



Slika 2.6: Temperaturne razmere nad Francosko Gvajano ob različnih časih

2.3 Analiza meritev drugih vremenskih balonov

Iz podanih grafov smo izluščili naslednjo tabelo (Preglednica 2.2), ki podaja območja, na katerih mora sistem delovati pravilno.

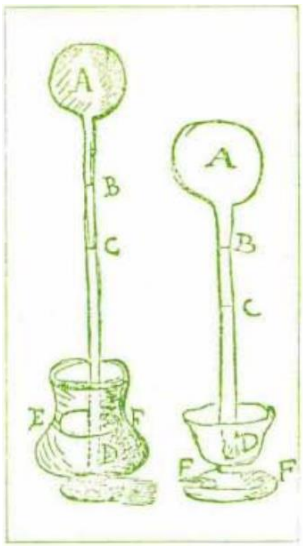
Preglednica 2.2: Okviri za zasnovo sistema.

Parameter	Minimalna vrednost	Maksimalna vrednost
Temperatura	–85 °C	40 °C
Pritisk	10 mbar	1100 mbar

Za zasnovo sistema je problematično predvsem temperaturno območje. Navadna integrirana vezja ne delujejo na tako nizkih temperaturah, zato bo treba sistem toplotno izolirati.

2.4 Merjenje temperature zraka

Galileo Galilei (okoli leta 1592) je bil prvi fizik, ki se je ukvarjal z merjenjem temperature. Takrat so fiziki za merjenje temperature izkoriščali pojav, pri katerem se zraku poveča prostornina, ko ga segrejemo. Galilejeva priprava se je imenovala termoskop in je lahko le primerjala, katero od dveh teles je objektivno toplejše. Galilejevo delo so nadaljevali v Firencah. Iz Firenc izhajajo pogosti alkoholni termometri. Alkoholni termometer je sestavljen iz steklene bučke, ki je na obeh straneh zaprta, v njej pa je alkohol. Temperaturo določimo preko gladine alkohola. Nekaj zaslug nosi tudi Daniel Fahrenheit, ki je alkohol nadomestil z živim srebrom [5].



Slika 2.7: Risba Galilejevega termoskopa [5].

Danes poznamo veliko različnih načinov merjenja temperature [6]:

- tekočinski termometri (alkoholni ali živosrebrov),
- plinski termometri,
- infrardeči termometri (temeljijo na merjenju sevanja, ki ga oddaja predmet),
- termometri s termoelementi (izkoriščajo Seebeckov pojav),
- termometri s termistorji (polprevodniki, katerih upornost je funkcija temperature).
- uporovni termometri (upornost upora je odvisna od temperature).

Mi smo se odločili za uporabo uporovnega termometra, kjer izkoriščamo odvisnost upornosti nekega materiala od temperature. Ta tehnologija bo natančneje opisana v naslednjem podpoglavju.

Ker je zrak slab prevodnik toplote, moramo paziti, kako merimo temperaturo. Temperaturo moramo meriti tam, kjer je hkrati zasenčeno in dobro prezračeno (po potrebi umetno ventiliramo uporovno sondo). Paziti moremo tudi, da zraven ni kakšnih drugih virov toplote.

Da lahko izmerimo temperaturo, potrebujemo neko lestvico. V večini sveta je najbolj znana lestvica astronoma Andresa Celsiusa (Celzija). Lestvica je bila določena tako, da je 100 stopinj enako ledišču vode, 0 stopinj pa vrelišču vode. A si je Celsius hitro premislil in obrnil lestvico in tako smo dobili vsem znano Celzijevo lestvico [5].

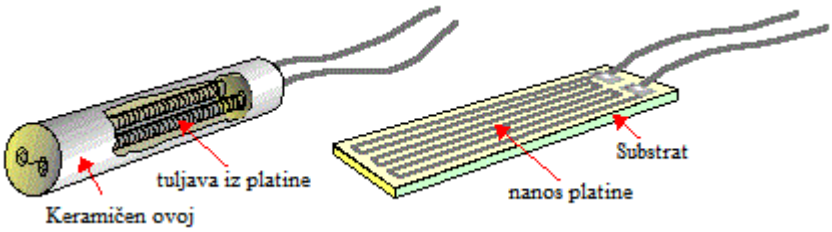
Poleg Celzijeve še poznamo naslednje lestvice:

- Kelvinova (koraki so enaki kot pri Celzijevi, le da je 0° absolutna ničla),
- Fahrenheitova lestvica,
- Rankinova lestvica.

2.5 Uporovni termometri

Uporovni termometri so termometri, ki izrabljajo močno temperaturno odvisnost upornosti določenih materialov. Najbolj natančni uporovni termometri imajo uporovno sondo narejeno iz platine. Takšne termometre ponavadi uporabljamo v laboratorijih in industriji. Sonde najdemo pod različnimi imeni: IPRT (Industry Quality Platinum Resistance Temperature Detector), PT100, PT1000[3], RTD (Resistance Temperature Detection) [7].

Platina je najbolj primeren material, ker ima zelo linearno odvisnost upornosti od temperature. Prav tako se lahko uporablja na širokem temperaturnem območju vse do 850 °C in je kemijsko zelo obstojna [8].
Obstajata dva pogosta tipa uporovnih tipal. Pri prvem tipu iz želenega materiala naredimo žico in jo zamotamo v tuljavo. Drugi in bolj pogost tip pa je tako imenovani »thin-film« tip, kjer je na plastični substrat nanesena zelo tanka plast materiala (platine). Drugi tip je cenejši, ker zahteva manj materiala (slika 2.8) [8].



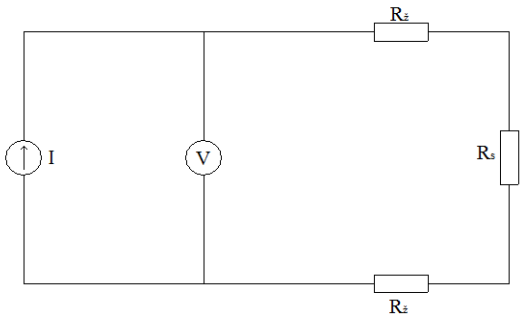
Slika 2.8: Oba tipa uporovnih tipal [9].

Upornost upora merimo posredno. Čez upor poženemo določen tok in izmerimo padec napetosti čez upor. Upornost nato dobimo prek Ohmovega zakona. Pri tem nastanejo nekateri problemi, na katere moremo paziti.
Prvi problem je, da tok upor segreje in s tem pokvari meritev. Rešitev za to je, da minimiziramo tako tok kot čas meritve. Drugi problem je, da pri merjenju upornosti

[3] Pomen kratic PT100 in PT1000 je naslednji: PT pomeni, da je sonda narejena iz platine, število 100 oz. 1000 pa poda ohmsko upornost pri 0 °C (npr. upornost sonde PT1000 pri 0 °C je 1000Ω).

merimo tudi upornost povezave do upora. Ta je sicer veliko manjša, a pri natančnih meritvah je to kljub temu problem. Temu se lahko izognemo s tem, da izberemo posebno merilno vezje. V nadaljevanju bomo predstavili tri različna merilna vezja, ki se uporabljajo pri takem merjenju [8]. Na shemah Rž je predstavlja upornost žice, na Rs pa upornost tipala.

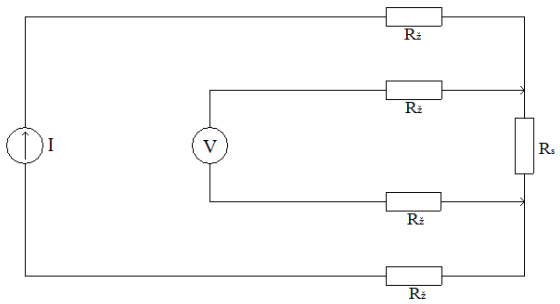
Metoda z uporabo **dveh žic** (glej sliko 2.9):



Slika 2.9: Shema merilnega vezja metode dveh žic.

Pri metodi dveh žic čez upor s tokovnim virom skozi tok pošljemo znane vrednosti in izmerimo padec napetosti čez upor. Ta metoda je najmanj natančna, saj hkrati merimo še padec napetosti čez upornost žice. Upornost žice lahko predstavlja večji ali manjši delež upornosti glede na to, kakšen je Rs.

Metoda z uporabo **štirih žic** (glej sliko 2.10):



Slika 2.10: Shema merilnega vezja metode štirih žic.

Pri metodi štirih žic skozi upor merjenje poteka v dveh fazah. Najprej, podobno kot pri metodi dveh žic, skozi Rs pošljemo tok znane vrednosti in izmerimo padec napetosti na merjencu. V drugi fazi pa upor Rs odklopimo iz vezja in izmerimo upornost žice. To upornost lahko odštejemo od skupne upornosti in dobimo upornost Rs.

Metoda z uporabo **treh žic:**

Metoda z uporabo treh žic je kompromisna metoda, kjer eno od dodatnih žic odstranimo in izmerimo dodano upornost le ene žice. Od skupne upornosti odštejemo dvakratnik izmerjene upornosti žice. Ta metoda je natančna, če sta žici enako dolgi.
Pri naših meritvah niso zahtevane velike natančnosti, zato smo se odločili za najbolj preprosto metodo z uporabo dveh žic.
Ko imamo upornost, moremo izračunati še temperaturo. Krivulja odvisnosti upornosti od temperature je razmeroma linearna, vendar ima določeno ukrivljenost.
Krivuljo opisuje enačba 2.1, drugače znana kot Callendar-Van Dusenova enačba [10]:

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + aT + T^2 + c(T - 100) \cdot T^3), \qquad \text{Enačba 2.1}$$

kjer so:

R(T) – upornost upora pri temperaturi T,

T – temperatura, pri kateri merimo upornost,

R_0 – upornost upora pri 0 °C,

a, b, c – koeficienti upora (poda proizvajalec).

Iz te enačbe lahko nato izračunamo temperaturo.

2.6 Merjenje vlažnosti

Prisotnost vodne pare v zraku imenujemo vlažnost. Vlažnost pomembno vpliva na človekovo počutje, poleg tega pa je tudi pomemben dejavnik pri segrevanju Zemlje. Zaradi tega vremenski baloni vedno merijo tudi vlažnost [11].

Pomembne definicije pri merjenju vlažnosti so [12]:

Mešalno razmerje je razmerje mase vodne pare proti masi suhega[4] zraka.

Absolutna vlažnost je masa vodne pare proti prostornini vlažnega zraka. Z drugimi besedami je to gostota vodne pare.

Relativna vlažnost je najbolj pogosto merilo (tudi mi jo bomo uporabili). Je razmerje dejanskega parcialnega pritiska vlage proti maksimalnemu pritisku vlage, ki bi ga lahko povzročala pri dani temperaturi. Podaja se v odstotkih.

Temperatura rosišča je temperatura zraka, pri kateri bi vlaga, prisotna v zraku, povzročala največji parcialni pritisk. Takrat je vodna para v nasičenju.

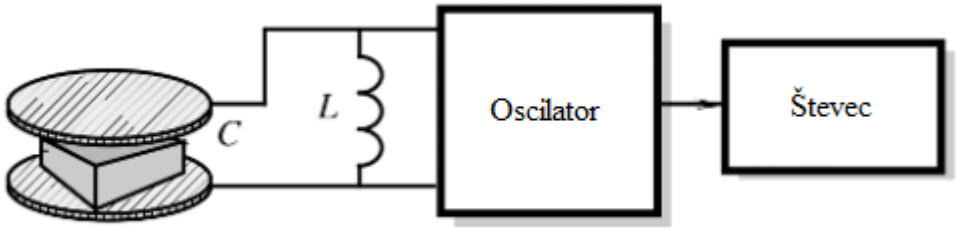
Natančno merjenje vlažnosti je zahteven problem, ki ga tudi sodobna tehnologija rešuje precej slabo. Poznamo vrsto načinov merjenja vlažnosti, ki so različno natančni pri različnih pogojih [13].

Za električno merjenje vlažnosti so pogosti naslednji principi merjenja [12]:

- kapacitivni senzorji: vlaga spremeni električno permisivnost v zračnem kondenzatorju,
- senzorji električne prevodnosti: upornost določenih nekovinskih materialov je odvisna od vlažnosti zraka okolice,
- senzor toplotne prevodnosti: vlaga spremeni toplotno upornost zraka,
- optični higrometri,
- oscilacijski higrometri.

[4] Suhi zrak je takšen zrak, ki ne vsebuje nobene vlage.

Mi smo za merjenje vlage izbrali senzor HIH9131, ki meri relativno vlažnost po kapacitivnem principu. Kot že prej omenjeno, vlaga v zraku spremeni kapacitivnost zračnega kondenzatorja, vendar ni nujno, da uporabimo zračni kondenzator. HIH9131 ima v kondenzatorju kot dielektrik poseben polimer, s katerim poveča robustnost senzorja.



Slika 2.11: Kapacitivni senzor vlage (12).

2.7 Merjenje zračnega tlaka

Za tekočine in pline tlak oz. pritisk definiramo po enačbi 2.2:

$$p = \frac{dF}{dA}, \qquad \text{Enačba 2.2}$$

kjer je:

dF – diferencial sile,

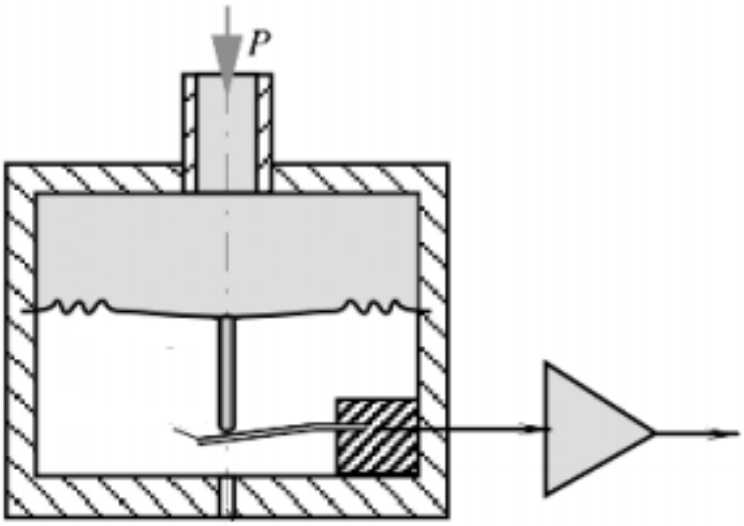
dA – diferencial površine.

V primeru zraka je sila teža zraka, ki pritiska na neko ploskev. (Tako definirani tlak imenujemo tudi absolutni.) Zračni tlak je neodvisen od orientacije senzorja v prostoru, in neodvisen od oblike senzorja. Po kinetični teoriji plinov je pritisk merilo celotne kinetične energije molekul.

SI enota za tlak je pascal: Po definiciji je pascal tlak, ki ga povzroča sila 1 N, ki enakomerno pritiska na površino 1 m^2. Poznamo tudi druge enote, kot so: bar, atm, cm Hg, torr, psi [14].

Danes je razvitih veliko metod za merjenje zračnega tlaka:

- vodni stolpec (sprememba višine v cevi oblike U, če je en konec na enem tlaku, drugi konec pa na drugem),
- merkurjev barometer,
- Aneroidov barometer,
- ionizacijski barometer,
- MEMS[5] barometri (skupina barometrov, ki delujejo na različne načine).



Slika 2.12: Shematični prikaz delovanja barometra MEMS [14].

Barometri MEMS uporabljajo neke vrste mehanski element, ki se pod tlakom preoblikuje. Pogost primer takega elementa je kovinska membrana. Naprave MEMS so zelo majhne in ustvarjene za uporabo na tiskanih vezjih.

Želja je, da je odklon membrane čim bolj linearno odvisen od tlaka. Obstaja več načinov pretvorbe odklona membrane v električni signal: [14]:

- Piezorezistivni senzor izrablja lastnost določenih materialov, da se jim pod mehansko obremenitvijo spremeni upornost.
- Kapacitivni senzor ob premiku membrane spremeni kapacitivnost.

[5] MEMS je angleška kratica za micro-electro-mechanical systems. Uporablja se tudi kratica MST, ki pomeni micro system technology.

- Senzor VRP meri reluktanco magnetne poti, ki vključuje membrano. Ta se spreminja z odklonom membrane.
- Optoelektronski senzor meri odklon preko interference.

2.8 Merjenje koncentracije trdnih delcev

»Koncentracija trdnih delcev vpliva bolj na ljudi kot kateri koli drugi onesnaževalec zraka.« [15]. Glavni sestavni deli tako imenovanih trdnih delcev so: sulfati, nitrati, amonijak, natrijev klorid, črni ogljik, mineralni prah in voda. Za zdravje ljudi so najbolj pomembne koncentracije delcev premera 10 mikronov (PM10[6]) ali manj. Kronična izpostavljenost visokim koncentracijam trdnih delcev lahko vodi k problemom s pljuči in srcem.

Koncentracije se ponavadi podajajo v enoti $\frac{\mu g}{m^3}$. Priporočene in izmerjene vrednosti so podane v poglavju Meritve in rezultati [15].

Za merjenje koncentracije trdnih delcev se v glavnem uporabljajo tri metode (16):

- gravimetrična, ki je najbolj natančna in se uporablja kot referenčna metoda,
- optična,
- metoda mikro-ravnovesja (TOEM[7]).

Instrument, ki smo ga uporabili mi, uporablja optično metodo in bo podrobneje predstavljen v naslednjem poglavju.

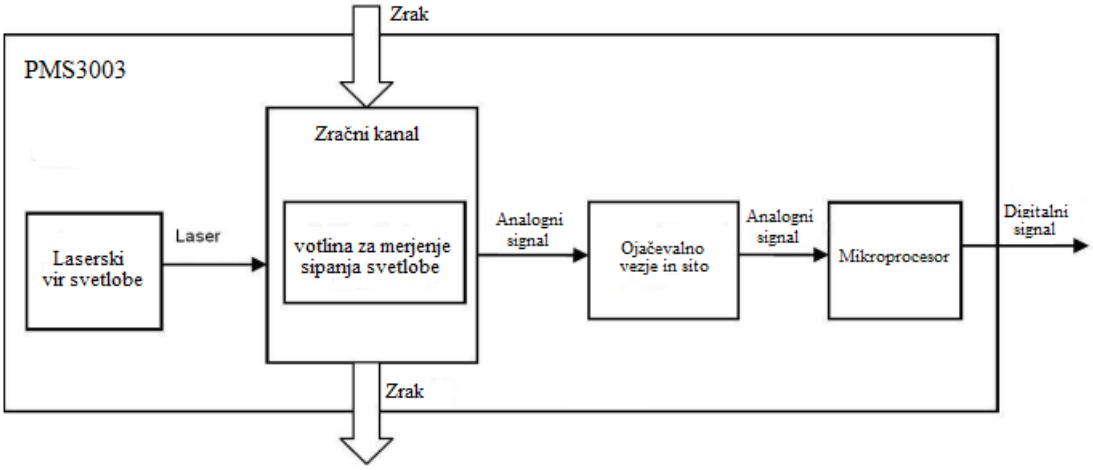
[6] PM10 je merilo, ki pove koncentracijo delcev velikosti 10 mikronov ali manj. Obstaja tudi npr. PM2.5, ki pove koncentracijo delcev velikosti 2.5 mikronov ali manj.
[7] Angleška kratica TOEM »Tapered element oscillating microbalance«.

2.9 Optična metoda merjenja koncentracije trdnih delcev

Optična metoda temelji na sipanju elektromagnetnih valov od trdnih delcev. Rezultat sipanja primerjamo s predvidenim rezultatom, ki ga dobimo s pomočjo Lorenz-Mieve rešitve Maxwellovih enačb (tudi Mieva teorija).

Lorenz-Mieva rešitev rešuje problem sipanja elektromagnetnih valov na sferičnih delcih, ki so primerljive velikosti kot valovna dolžina (17).

Blokovna shema prikazuje notranjost modula PMS3003, ki smo ga uporabili za merjenje koncentracije trdnih delcev.

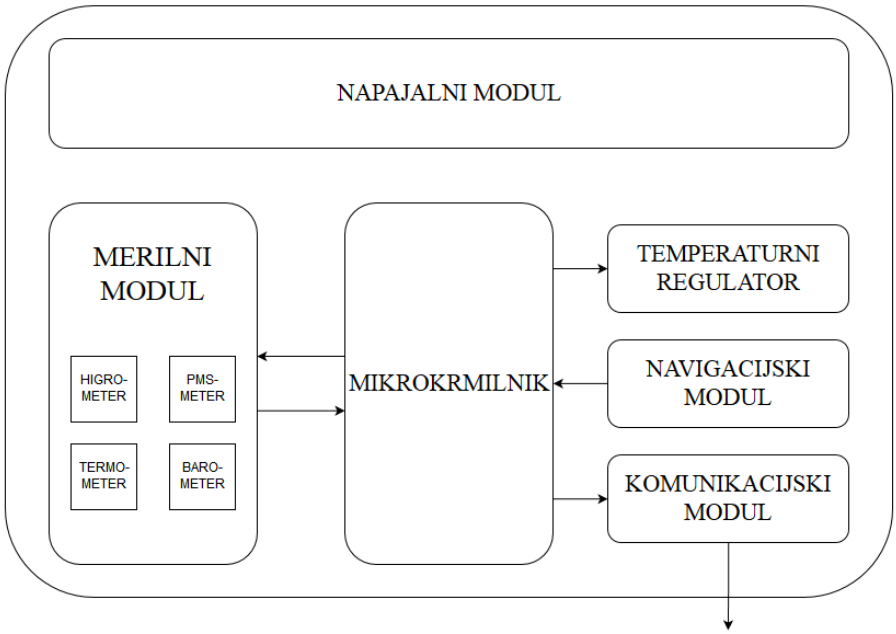


Slika 2.13: Blokovna shema PMS3003.

V votlino za merjenje sipanja svetlobe umetno ventiliramo zrak (z ventilatorjem); v to votlino nato svetimo z laserjem. Po votlini so nameščeni senzorji, ki zaznavajo elektromagnetno valovanje. Izhodi teh senzorjev gredo nato na ojačevalno vezje in sito, ki nato vodi v mikroprocesor. V mikroprocesorju se rezultati primerjajo z rezultati, ki so predvideni po Lorentz-Mievi rešitvi in glede na to se določi količina posameznih delcev v votlini (18).

3 ZASNOVA SISTEMA

3.1 Konceptualna zasnova



Slika 3.1 Blokovni diagram sistema

Zgoraj predstavljen blokovni diagram upošteva zahteve, ki smo jih dobili iz analize razmer.

Temperaturni regulator je podsistem, ki v izoliranem ohišju zagotavlja primerno temperaturo.

Navigacijski modul omogoča določitev položaja vremenskega balona. To je ključno, saj so meritve uporabne le, če so vezane na nadmorsko višino. Drugi razlog, zakaj je navigacijski modul uporaben, je, da omogoča določitev položaja radiosonde, ko pristane na Zemlji.

Komunikacijski modul omogoča pošiljanje zajetih podatkov nazaj na Zemljo. Komunikacijski modul ni nujno potreben, razen telemetrično bi lahko podatke iz radiosonde pridobili tudi po pristanku. Pri drugi možnosti tvegamo, da do radiosonde, zaradi kakršnega koli razloga, ne moremo več dostopati in s tem izgubimo podatke.

Napajalni modul zagotavlja energijo celotnemu sistemu. Energijo pridobiva iz baterij in jo dostavlja posameznim modulom. Modul zagotavlja tudi primerne nivoje napetosti, glede na specifikacije drugih vezij.

Merilni modul je modul, na katerem so senzorji za vlago, temperaturo, tlak in koncentracijo trdnih delcev (PM meter). Modul je z mikrokrmilnikom povezan preko vodila.

Mikrokrmilnik predeluje in shranjuje podatke, pridobljene od merilnega modula. Poleg tega krmili temperaturni regulator (glede na podatke, ki jih pridobi iz merilnega modula). Obdelane podatke nato pošlje na komunikacijski modul.

Zaradi omejenega časovnega okvira ni bilo mogoče razviti vseh modulov, zato smo se odločili razviti le merilni modul in ga povezati z mikrokrmilnikom.

3.2 Zasnova merilnega modula

Po analizi okolja smo lahko začeli snovati sistem, ki bo deloval pod zahtevanimi pogoji. Zahtevani so naslednji pogoji:

- Sistem mora delovati na temperaturnem področju od –85 °C do 40 °C.
- Sistem mora biti zmožen meriti pritiske od 10 mbar do 1050 mbar.
- Sistem mora biti zmožen meriti relativno vlago od 0 do 100 %.

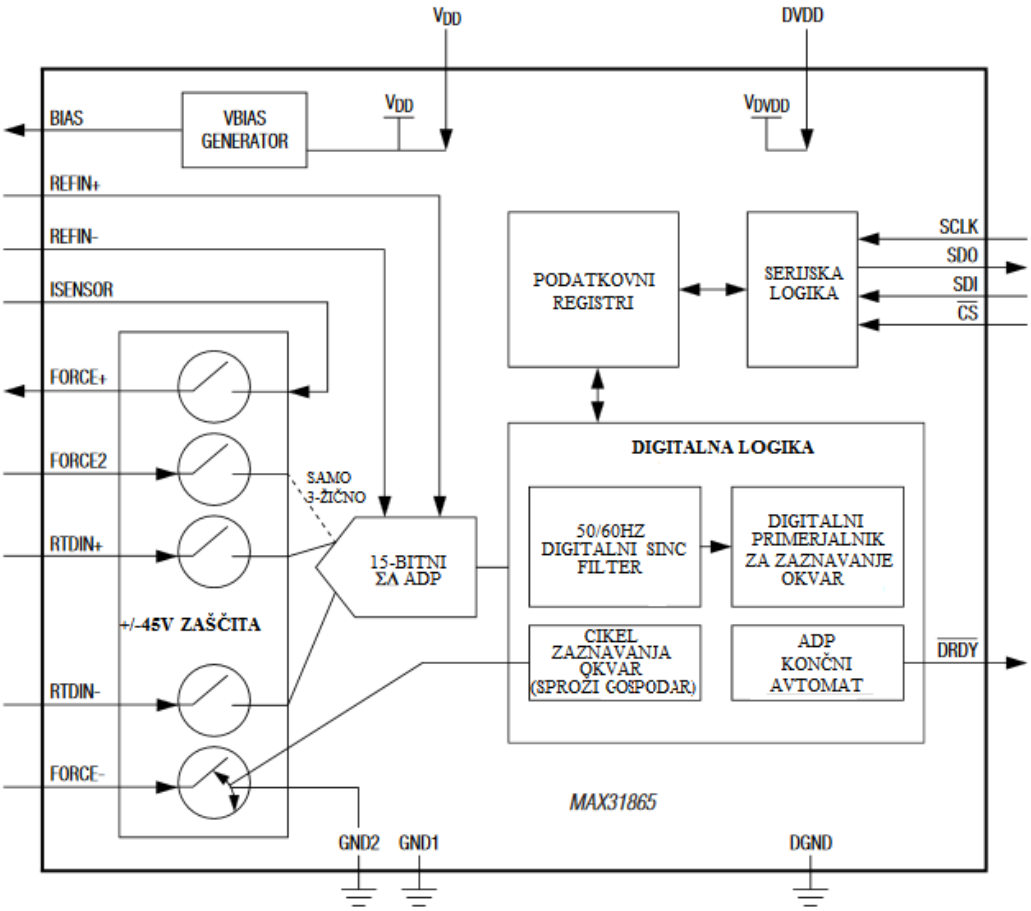
Na spletu smo začeli iskati senzorje, ki bi ugodili navedenim zahtevam. Omejili smo se na senzorje, ki imajo digitalni izhod. Hitro smo spoznali, da bo težava temperatura. Navadna tiskana in integrirana vezja namreč ne delujejo dobro pri nizkih temperaturah. Zato smo se odločili, da bomo vezje izolirali, temperaturo pa merili s tipalom. Izbrali smo naslednje digitalne senzorje za izvedbo meritev:

- Maxim integrated MAX31865 za merjenje upornosti PT1000 in tako posredno temperature,

- TE connectivity MS5607 za merjenje pritiska,
- Honeywell HIH9131 za merjenje vlage,
- PMS3003 za merjenje koncentracije trdnih delcev.

3.3 Merilnik upornosti in temperaturno tipalo

Za merjenje temperature smo izbrali tipalo PT1000, ki smo ga priklopili na čip MAX31865, ki meri upornost tipala.



Slika 3.2: Blokovna shema MAX31865 [15].

MAX31865 je merilnik upornosti, ki je preprost za uporabo in optimiziran za merjenje upornosti platinastih tipal. Z zunanjim uporom nastavimo velikost koraka ADP[8], ki pretvori napetost na uporu (in s tem posredno upornost) v digitalno vrednost.

[8] Analogno-digitalni pretvornik

Ko je meritev opravljena, spusti MAX31865 linijo DRDY nizko, s čimer signalizira gospodarju (mikrokrmilniku), da je na voljo nova meritev. Meritev se nato pošlje mikrokrmilniku preko protokola SPI; način 1[9] ali način 3.
MAX31865 med drugim omogoča tudi zaščito pred prenapetostmi (+/– 45 V) in programirljivo zaznavanje odprtih sponk ali kratkega stika.

MAX31865 vsebuje naslednje registre [15]:

- Configuration – Konfiguracijski register, ki omogoča izbiro način merjenja (samodejni ali ročni), izbiro dvo-, tro- ali štirižičnega priklopa, izklop drsne napetosti (U_{BIAS}) in omogoča nastavljanje zaznavanja napak na merjencu. Register lahko beremo in popišemo.
- RTD MSBs, RTS LSBs – Po opravljeni meritvi se rezultat meritve shrani v prej napisana registra. RTD MSBs vsebuje osem najbolj oteženih bitov, RTD LSBs pa sedem najmanj oteženih bitov meritve (meritev ima 15 bitov), na najmanj oteženem mestu registra pa je podatek o tem, ali je med meritvijo čip na merjencu zaznal kakšno napako (kratek stik ali odprte sponke). Če je bila napaka zaznana, postavi najmanj oteženi bit RTD LSBs na 1, če ne, je bit na 0. Registra lahko samo beremo.
- Registra High Fault Threshold MSB in Low Fault Threshold LSB vsebujeta nastavitev o tem, kaj naj MAX31865 zazna kot odprte sponke. Če je meritev večja od petnajst najbolj oteženih bitov registrov High Fault Threshold MSB in High Fault Threshold LSB, se gospodarju sporoči (skupaj z meritvijo), da je prišlo do napake. Registra lahko beremo in popišemo.
- Registra Low Fault Threshold MSB in Low Fault Threshold LSB delujeta popolnoma enako kot registra High Fault Threshold. Edina razlika je v tem, da postavljata spodnjo mejo in tako zaznavata prisotnost kratkega stika.
- Fault Status register nam da natančnejše podatke o tem, kakšna napaka se je zgodila. Register lahko samo beremo.

[9] Pod načinom 1 in 3 (angl. mode 1/3) je mišljeno, kako v okviru protokola SPI čip zaznava signale, in sicer polariteto urinega signala in trenutek, v katerem se vzorči podatkovna linija.

Meritev, pridobljeno iz registrov RTD MSBs in RTD LSBs, nato pretvorimo v Ohme in stopinje Celzija po enačbah 3.1 in 3.2:

$$R = \frac{ADP \cdot R_{REF}}{2^{15}} \qquad \text{Enačba 3.1}$$

$$T[°C] = \frac{R - R_{REF}}{\alpha}, \qquad \text{Enačba 3.2}$$

kjer je:

R – izmerjena upornost merjenca v Ohmih,

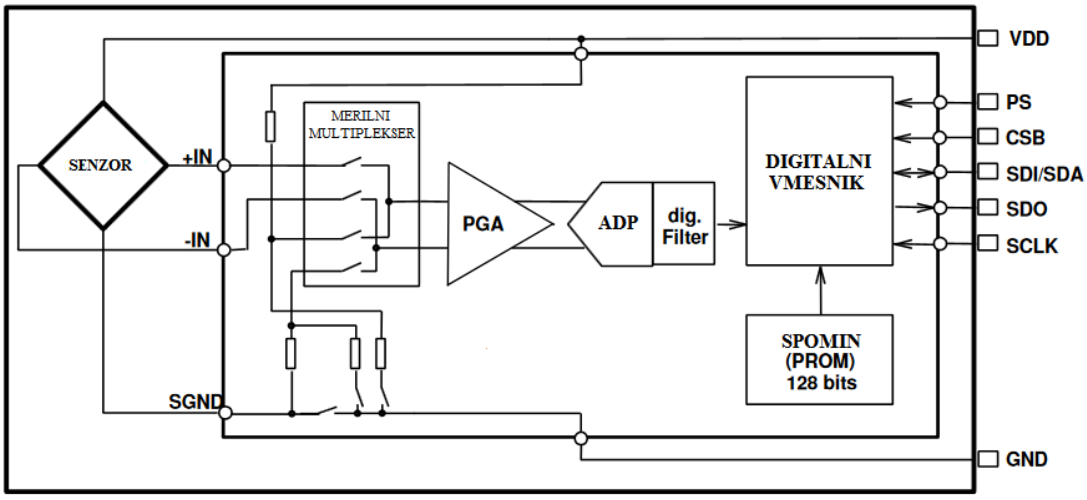
ADP – petnajst-bitna vrednost (pretvorjena v decimalno), ki jo dobimo iz registrov RTD MSBs in RTD LSBs (brez enote),

R_{REF} – vrednost v Ohmih referenčnega upora, ki je prispajkan na tiskano vezje,

α – koeficient temperaturne odvisnosti tipala PT1000, podan v enoti $\frac{\Omega}{°C}$; koeficient je podan v dokumentaciji proizvajalca temperaturnega tipala.

3.4 Merilnik pritiska

MS5607-02BA je zelo natančen (24-bitni) digitalni senzor pritiska. Zaradi visoke resolucije lahko zazna premike v višini (sprememba tlaka) samo dvajsetih centimetrov. Poleg tega senzor meri tudi temperaturo, s 24-bitno natančnostjo.



Slika 3.3: Blokovni diagram MS5607-02BA [16].

MS5607 je senzor MEMS, ki uporablja piezouporovni princip za pretvorbo odklona v električni signal. Po pretvorbi lahko podatek pošlje gospodarju preko vodila SPI ali preko vodila I2C. Uporabili smo vodilo SPI, ker smo ga uporabili že pri dveh drugih senzorjih. Senzor lahko komunicira po SPI način 0 ali način 3.

Vsak senzor se v tovarni posebej kalibrira pri dveh različnih temperaturah in dveh različnih tlakih. Rezultat tega je šest koeficientov, ki jih potrebujemo za pretvorbo digitalnega izhoda senzorja v pritisk.

MS5607 ima pet različnih tipov ukazov [16]:

1. ukaz za ponastavitev (angl. reset),
2. ukazi za branje kalibracijski koeficientov iz spomina PROM,
3. ukaz za sprožitev pretvorbe D1 (uporablja se za pridobitev podatka o pritisku),
4. ukaz za sprožitev pretvorbe D2 (uporablja se za pridobitev podatka o temperaturi),
5. preberi rezultat pretvorbe analogno-digitalnega pretvornika (pritisk in temperatura).

3.5 Merilnik relativne vlažnosti

Honeywell HIH9131 je digitalni senzor relativne vlažnosti in temperature. Senzor dosega natančnost ±1,7 % pri merjenju relativne vlažnosti in natančnost ±0,3 °C pri merjenju temperature.

Slika 3.4: Honeywell HIH9131 [17].

Čip omogoča komunikacijo tako po protokolu SPI kot po protokolu I2C. Ker smo pri dveh drugih čipih uporabili protokol SPI, smo se odločili, da tudi tukaj uporabimo SPI. Komunikacija s čipom je zelo preprosta. V načinu SPI čip nima linije, ki bi služila temu, da bi gospodar poslal ukaze senzorju (ni linije MOSI[10]). Samodejno je HIH9131 v načinu spanja, zbudi pa ga to, da spustimo njegovo linijo SS[11]. Po tem nam HIH9131 po liniji pošlje podatke, ki jih lahko ignoriramo, hkrati pa začne izvajati meritve. Po času 36,65 ms lahko ponovno spustimo linijo SS in tokrat preberemo pravilne podatke [17].
HIH9131 po spustu linije SS pošlje skupaj 32 bitov podatkov, ki vsebujejo naslednje informacije:

- statusna bita: prvi dva bita povesta status meritve oz. senzorja;
- meritev relativne vlažnosti: naslednjih štirinajst bitov je podatek o relativni vlažnosti;
- meritev temperature: za meritvijo relativne vlažnosti pride podatek o temperaturi, ki je dolg 14 bitov;

[10] MOSI – angl. Master Out Slave In
[11] SS – angl. Slave Select

- polnilna bita: na koncu sta dodana še dva bita, katerih vrednost ignoriramo, saj sta brez pomena (angl. don't care).

Vrednosti, pridobljene od senzorja, po vodilu SPI nato pretvorimo v relativno vlažnost oz. temperaturo po enačbah 3.3 in 3.4:

$$Relativna\ vlažnost\ [\%] = \frac{Štirinajst\ bitni\ podatek\ o\ vlažnosti}{2^{14}-2} \cdot 100\ \%$$ Enačba 3.3

$$Temperatura\ [°C] = \frac{Štirinajst\ bitni\ podatek\ o\ temperaturi}{2^{14}-2} \cdot 165 - 40$$ Enačba 3.4

3.6 Merilnik koncentracije trdnih delcev

PMS3003 komunicira z mikrokrmilnikom preko serijskega vodila. Skupaj ima modul šest linij:

- napajalna linija: 5 V,
- Zemlja,
- SET: ko je visoko, je naprava v normalnem načinu delovanja, ko je nizko, je v načinu spanja,
- RESET: linija ponastavi modul,
- Liniji RX in TX: liniji za serijsko komunikacijo.

Po nastavitvi linije SET naprava začne oddajati podatke po serijskem vodilu. Naprava pošlje skupno 24 zlogov, med drugim začetno besedo, meritev PM1.0, meritev PM2.5, meritev PM10 in CRC[12]. Posamezne meritve so podane neposredno, v enoti $\mu g/m^3$.

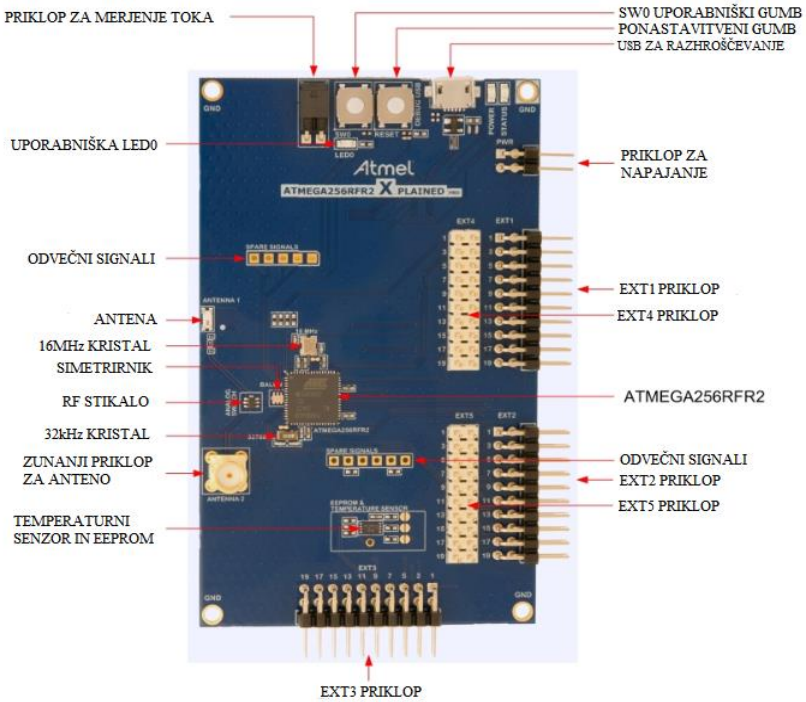
[12] CRC – Ciklično preverjanje redundance (angl. cyclic redundancy check) je metoda odkrivanja napak pri komunikaciji, s katero preverimo, ali so se podatki prenesli pravilno.

3.7 Razvojna plošča z mikrokrmilnikom

Slika 3.5: Razvojna plošča Atmel ATMEGA256RFR2 Xplained Pro [18].

ATMEGA256RFR2 Xplained Pro je razvojna plošča ameriškega podjetja Atmel. Namenjena je preizkušnji procesorja Atmega256RFR2. Plošča je priročna, saj vsebuje vgrajen razhroščevalnik, zaradi česar jo lahko samo preko vodila USB priklopimo na računalnik in takoj začnemo programirati.

Atmega256RFR2 je 8-bitni mikroprocesor z arhitekturo RISC (Atmel jo imenujejo arhitektura AVR). Vsebuje tudi 256 kB vgrajenega Flash spomina, 8 kB vgrajenega EEPROM-a in 32 kB vgrajenega SRAM-a [18].

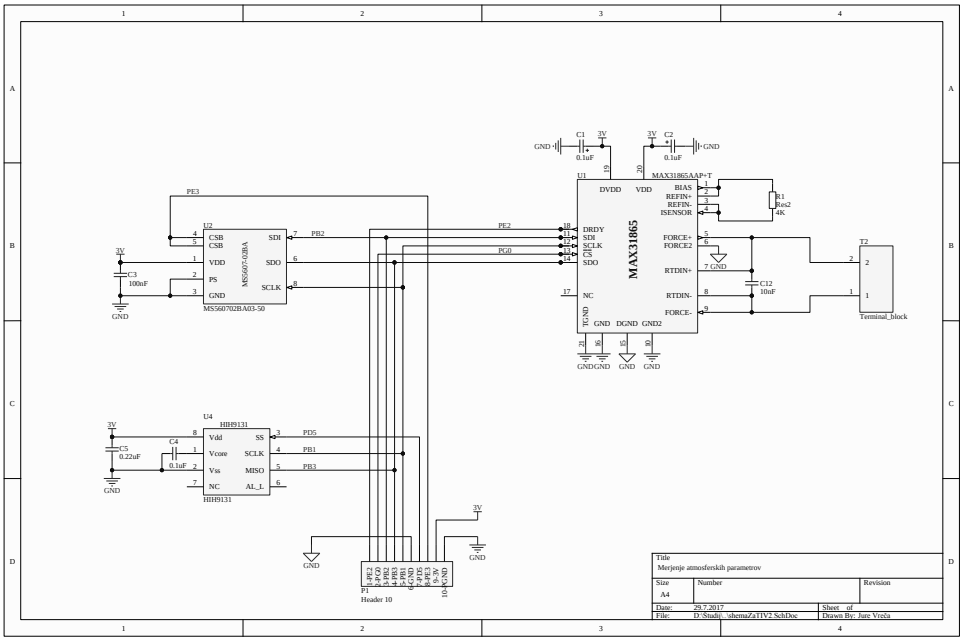


Slika 3.6: Pregled razvojne plošče ATMEGA256RFR2 Xplained Pro [18].

3.8 Načrtovanje tiskanega vezja

Po izbiri senzorjev smo se lotili načrtovanja tiskanega vezja. Uporabljali smo program Altium Designer. Vezje smo prilagodili na uporabo mikrokrmilnika Atmel ATmega256RFR2 Xplained Pro. Napajanje za vezje smo dobili kar iz razvojne plošče.

Najprej smo narisali shemo vezja. Večinoma smo sledili priporočilom, napisanim v dokumentaciji posameznih senzorjev.

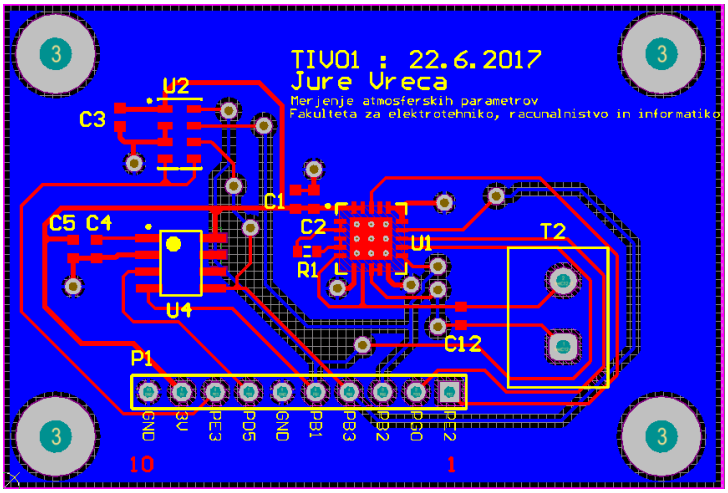


Slika 3.7: Shema merilnega modula (večja kopija v prilogi).

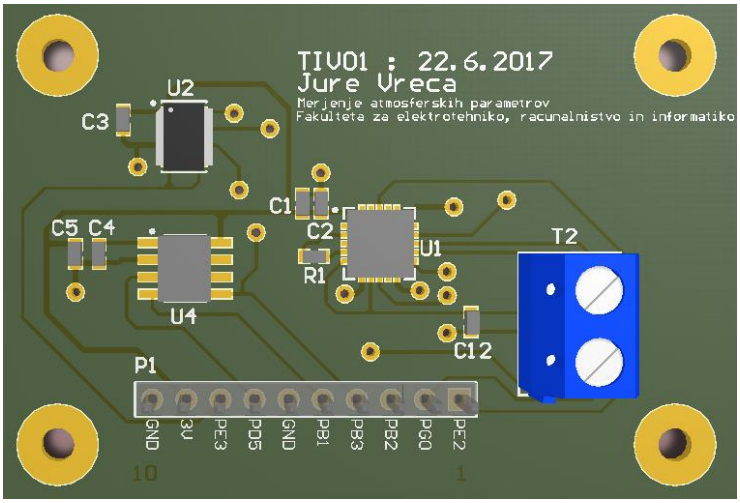
Po končanju sheme smo se lahko lotili načrtovanja TIV[13]. Ker je vezje zelo preprosto, smo lahko vse komponente brez težav spravili na dvoslojno tiskanino. Prav tako vezje ne deluje pri visokih frekvencah, zato nam ni bilo treba upoštevati zapletov, ki nastanejo pri tem. Na tiskano vezje smo dodali tudi luknje za namestitev na ohišje. Ohišja sicer v okviru te diplomske naloge ne bomo izdelali ali načrtovali.

Komponente smo najprej razmestili, nato pa smo se lotili ročnega povezovanja. Končni rezultat je bil naslednji:

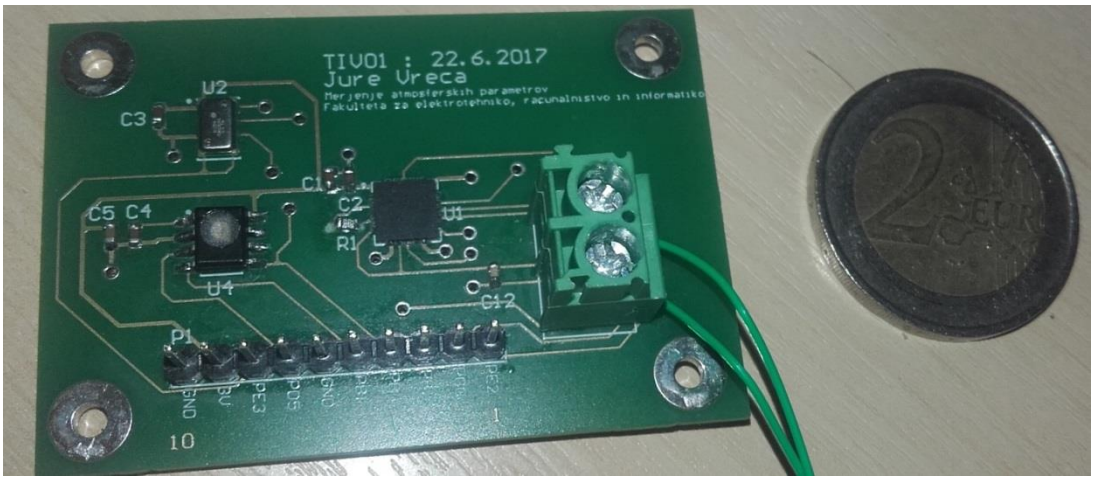
[13] TIV – tiskano vezje



Slika 3.8: Končno tiskano vezje v 2D-pregledu.



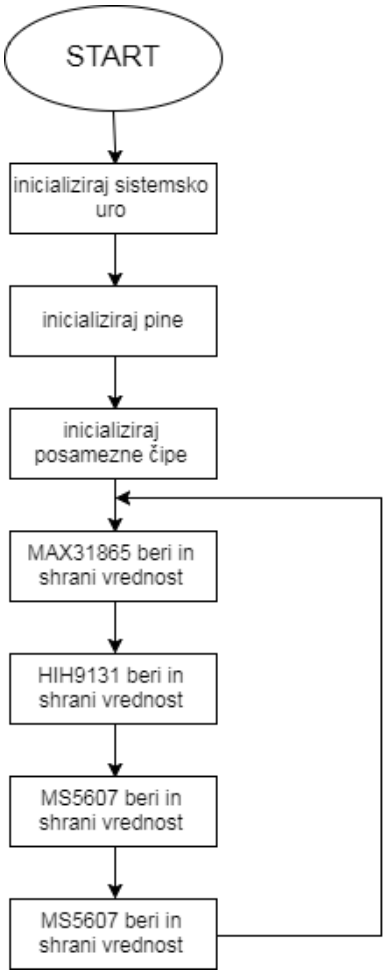
Slika 3.9: Končno vezje v 3D-pregledu.



Slika 3.10: Slika dejanskega tiskanega vezja.

3.9 Načrtovanje vgrajene programske opreme

Programska oprema je bila napisana v programu Atmel Studio 7, ki je namensko orodje za pisanje programske opreme za čipe podjetja Atmel. Program je napisan v programskem jeziku C (standard C99). Slika 3.11 prikazuje diagram poteka programa.



Slika 3.11: Diagram poteka vgrajenega programa.

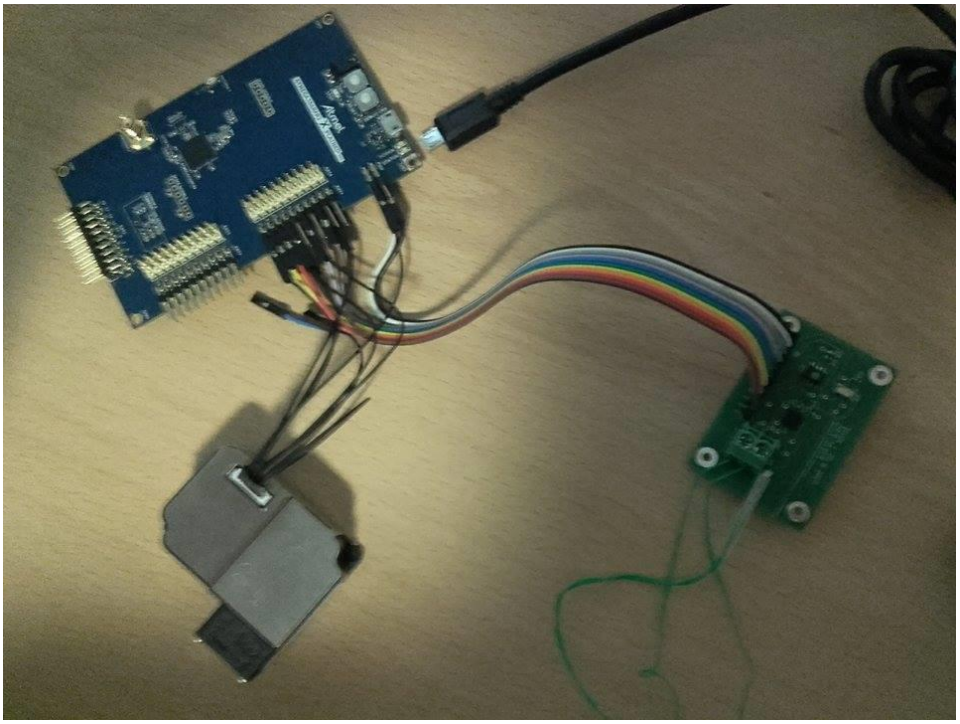
Od bližje poglejmo posamezne dele programa na sliki 3.11.

Program začnemo z inicializacijo sistemske ure. To nastavimo na 8 MHz. Atmel za (večino) nastavitev ure uporablja posebne »fuse« registre, ki se jih sprogramira pred začetkom programa in tako niso del programske kode. Za tem izvedemo inicializacijo vseh pinov. Posamezne pine nastavimo kot vhode ali izhode in jim nastavimo začetno vrednost (v primeru, da so izhod). Preglednica 3.1 podaja seznam vseh pinov in njihovih nastavitev.

Preglednica 3.1: Uporabljeni pini na razvojni plošči

Barva priključka [14]	**Vrata/številka pina**	**Zaporedno število na plošči**	**VLOGA**	**NASTAVITVE PINA**	**ZAČETNA VREDNOST**
črna		PWR/2	GND		
bela		PWR/4	3V		
siva	PE3	EXT1/6	CSB/MS560702 (SPI SS)	vhod	
vijolična	PD5	EXT1/10	HIH9131 SPI SS	vhod	
modra		PWR/2	GND		
zelena	PB1	EXT1/18	SPI SCLK	izhod	visoko
rumena	PB3	EXT1/17	SPI MISO	vhod	
oranžna	PB2	EXT1/16	SPI MOSI (SDI)	Izhod	visoko
rdeča	PG0	EXT1/15	CS MAX31865 (SPI SS)	vhod	
rjava	PE2	EXT1/5	DRDY MAX31865	vhod	
	PE5	EXT1/9	PMS3003 SET	izhod	nizko
	PF1	EXT1/4	PMS3003 RESET	izhod	Nizko
	PE0	EXT1/13	PMS3003 RXD	izhod	visoko
	PE1	EXT1/14	PMS3003 TXD	vhod	
		PWR/3	5V		

[14] Za povezovanje smo v nekaterih primerih uporabili barvne kable (glej sliko 3.12).



Slika 3.12: Povezana razvojna plošča.

Ko so pini pripravljeni, nadaljujemo z inicializacijo posameznih čipov in modula PMS3003. Čipi se med seboj razlikujejo po tem, kaj je treba nastaviti pred uporabo. V enem primeru (HIH9131) ni treba nastaviti čisto nič. Inicializacijo izvedemo s klicem funkcij s končnico »inic«.

Za tem začnemo neskončno zanko, v kateri neprestano beremo vrednosti, ki nam jih dajejo posamezni čipi in modul PMS3003.

V prilogo smo dodali izvleček programske kode.

4 MERITVE IN REZULTATI

4.1 Referenčni merilniki in kraji merjenja

Da bi preverili smiselnost naših rezultatov, smo potrebovali referenčne merilnike. Žal smo imeli težave z dostopom do natančnih kalibriranih merilnikov posameznih količin, zato smo morali biti nekoliko iznajdljivi. Za referenčno merjenje temperature, tlaka in relativne vlažnosti smo izbrali razširitveno ploščo X-NUCLEO-IKS01A1, ki smo jo dali na razvojno ploščo STM32 Nucleo-L053R8. Prej naštete količine smo izmerili tudi s poceni analognim termo-higro-barometrom TFA-20.2045. Meritev temperature, tlaka in relativne vlažnosti smo izvedli na dveh različnih mestih: na hribu blizu Maribora (Kalvarija) in blizu reke Drave.

Pri referenčnem merjenju koncentracije trdnih delcev pa smo imeli večje težave. Uspelo nam je najti referenco le za merjenje PM10. Agencija Republike Slovenije za okolje izvaja redne meritve veličine PM10 in jih v živo (vsako uro) objavlja na svoji spletni strani. Našli smo eno izmed teh mest [21] v Mariboru in tam eno uro izvajali meritve, iz katerih smo na koncu izračunali povprečje (meritve koncentracij trdnih delcev se vedno podajajo kot povprečje v nekem časovnem obdobju).

Preglednica 4.1: Kraji in časi merjenja.

kraj merjenja	čas merjenja	merjene količine
Kalvarija (46°34'17˝S in 15°38'05˝V)	29. 8. 2017 ob 20.33	temperatura, pritisk, relativna vlažnost
ob reki Dravi (Lent) (46°33'26˝S in 15°38'16˝V)	29. 8. 2017 ob 21.10	temperatura, pritisk, relativna vlažnost
Maribor – merilna postaja (46°33'34˝S in 15°39'05˝ V)	25. 8. 2017 od 19.00 do 20.00	koncentracije trdnih delcev PM10 in PM2.5

4.2 Merilna negotovost posameznih meritev

Preglednica 4.2: Negotovosti posameznih senzorjev.

merilni instrument/senzor	**negotovost**	**območje merjenja**	**komentar**
MAX31865 + PT1000	±0,5 °C	–70 °C do +500 °C[15]	zraven še negotovost zaradi toleranc uporov
MS560702	±3,5 mbar	10 do 1200 mbar	velja za temperature od –20 do 85 °C
HIH9131	1,7 %	0 do 100 %	
PMS3003	$\pm 1 \frac{\mu g}{m^3}$	Ni podano	
HTS221 (IKS01A1) (relativna vlažnost)	±3,5 %	0 do 100 %	velja za rezultate med 20 in 80 %
HTS221 (IKS01A1) (temperatura)	±0,5 °C	–40 do +120 °C	
LPS25HB (IKS01A1)	±1 mbar	260 do 1260 mbar	

[15] Območje merjenja je sicer izven tega, kar smo predvideli za primerno, vendar bi v dejanskem sistemu z lahkoto prilagodili kodo kaki drugi sondi, ki ima v negativni smeri širše območje.

4.3 Meritve temperature, pritiska in relativne vlažnosti

Preglednica 4.3: Meritve temperature[16]

Merilni instrument	MAX31865 [°C]	HTS221 (referenčni) [°C]	Analogni TFA-20.2045 [°C]	Razlika [°C]
Kalvarija	19,74	19,30	20	0,44
ob reki Dravi (Lent)	17,92	17,30	18,9	0,62

Preglednica 4.4: Meritve pritiska

Merilni instrument	MS560702 [mbar]	LPS25HB (referenčni) [mbar]	Analogni TFA-20.2045 [mbar]	Razlika [mbar]
Kalvarija	976,44	980,98	980,0	–4,54
ob reki Dravi (Lent)	989,85	994,36	991 ,0	–4,51

Preglednica 4.5: Meritve relativne vlažnosti

Merilni instrument	HIH9131 [%]	HTS221 (referenčni) [%]	Analogni TFA-20.2045 [%]	Razlika [%]
Kalvarija	65,53	58,6	55	6,93
ob reki Dravi (Lent)	68,8	72,3	66	-3,5

Vidimo, da so rezultati med seboj primerljivi. Meritve temperature se zelo lepo ujemajo, nekoliko bolj problematične so meritve pritiska. Ker senzorjev nismo kalibrirali, je med meritvami razlika približno 4,5 mbar. Razlike pri merjenju relativne vlažnosti pa nekoliko

[16] Razlika pri vseh meritvah se računa glede na referenčni merilnik (glede na sredinski stolpec).

odstopajo od predvidenih toleranc. Najverjetnejši razlog za to je, da merilnika ob merjenju nista bila na popolnoma enakem položaju – gre za lokalne variacije.

4.4 Meritev koncentracije trdnih delcev

Preglednica 4.6: Meritve koncentracije trdnih delcev med 19.00 in 20.00

PMS2.5 [$\frac{\mu g}{m^3}$]	PM10 [$\frac{\mu g}{m^3}$]
30	35
33	36
32	38
33	37
34	37
36	42
34	37
35	40
35	40
37	45
35	40
33	39
33	37
45	55
38	45
35	41
39	46
31	32
33	35

Povprečje PM2.5 je 34,79 $\frac{\mu g}{m^3}$, povprečje PM10 pa je 39,84 $\frac{\mu g}{m^3}$. To smo primerjali z meritvijo na spletni strani ARSO [21], kjer podajajo urna povprečja za PM10. Urno povprečje na dan merjenja 25. 8. 2017 od 19.00 do 20.00 v Mariboru je bilo 36 $\frac{\mu g}{m^3}$. Odstopanje je večje od predvidenega v dokumentaciji. Možen razlog za odstopanje je dejstvo, da se koncentracije trdnih delcev krajevno zelo spreminjajo in je bila na naši lokaciji, kljub temu, da smo bili blizu referenčne merilne naprave, koncentracija malenkost drugačna.

Svetovna zdravstvena organizacija podaja največje dovoljene vrednosti PM10 in PM2.5. Vrednosti so sicer podane kot dnevna ali letna najvišja dovoljena povprečja in so prikazane v spodnji tabeli [22]:

Preglednica 4.7: Največja dovoljena povprečja koncentracije trdnih delcev PM10

največje dovoljeno letno povprečje za PM10	20 $\frac{\mu g}{m^3}$
največje dovoljeno dnevno povprečje za PM10	50 $\frac{\mu g}{m^3}$

Preglednica 4.8: Največja dovoljena povprečja koncentracije trdnih delcev PM2.5

največje dovoljeno letno povprečje za PM2.5	10 $\frac{\mu g}{m^3}$
največje dovoljeno dnevno povprečje za PM2.5	25 $\frac{\mu g}{m^3}$

Vidimo, da urno povprečje za PM2.5 nekoliko presega dovoljeno dnevno, vendar je te rezultate napačno dojemati kot dnevno povprečje (vrednost čez dan zelo niha).

5 ZAKLJUČEK

Cilj projekta je bil zasnovati sistem, ki bi zajemal razne atmosferske parametre in to zmogel tudi do 30 km nadmorske višine. Zaradi omejenosti s časom nismo razvili celotnega sistema, ampak le merilni modul. Razvili in tudi izdelali smo tiskano vezje in pripadajočo programsko rešitev. Merili smo naslednje fizikalne količine: temperatura, pritisk, relativna vlažnost in koncentracija trdnih delcev.

Pri projektu smo se srečali s problemom načrtovanja elektronike za zelo hladne okolice. Edini rešitvi za to sta izolacija in temperaturna regulacija sistema.

Sistem meri parametre z zadovoljivo natančnostjo, ki bi jo lahko še povečali s kalibracijo instrumentov in upoštevanjem dejanskih vrednosti uporov.

Upamo, da bomo v prihodnosti sistemu dodali še druge module in ga v celoti končati. Nekaj težav so nam povzročale slabe možnosti za razhroščevanje na mikrokrmilniku Atmel, zato bi v prihodnosti verjetno tudi zamenjali mikroprocesor in ga dodali tiskanemu vezju.

VIRI

[1] R. J. C. Roger G. Barry, Atmosphere, Weather and Climate, London: The Chaucer Press, 1995.

[2] „Wikipedia,“ 16. 1. 2017. [Elektronski]. Dostopno na: https://sl.wikipedia.org/wiki/Ozra%C4%8Dje. [Poskus dostopa 9. 3. 2017].

[3] T. V. Jože Rakovec, Osnove meteorologije za naravoslovce in tehnike, Ljubljana: Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije, 1998.

[4] „Google,“ Google, 3. 5. 2017. [Elektronski]. Dostopno na: https://www.google.si/maps/ dne 3.5.2017. [Poskus dostopa 3. 5. 2017].

[5] J. Strnad, „O merjenju temperature in termometrih: Iz zgodovine fizike,“ *Presek,* št. 1, 1984.

[6] „Wikipedia,“ 20. 6. 2017. [Elektronski]. Dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Temperature_measurement. [Poskus dostopa 23. 7. 2017].

[7] „National Physical Laboratory,“ 23. 7. 2017. [Elektronski]. Dostopno na: http://www.npl.co.uk/publications/good-practice-online-modules/temperature/types-of-thermometer/electrical-thermometers-resistance-thermometers/. [Poskus dostopa 23. 7. 2017].

[8] „National Instruments,“ 30. 3. 2016. [Elektronski]. Dostopno na: http://www.ni.com/tutorial/7115/en/. [Poskus dostopa 23. 7. 2017].

[9] „CAPGO,“ 2013. [Elektronski]. Dostopno na: http://www.capgo.com/Resources/Temperature/RTDs/RTD_Con.GIF. [Poskus dostopa 23. 7. 2017].

[10] „Maxim integrated,“ 1. 7. 2015. [Elektronski]. Dostopno na: https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31865.pdf. [Poskus dostopa 6. 6. 2017].

[11] „National Physical Laboratory,“ National Physical Laboratory, 1. 9. 2011. [Elektronski]. Available: http://www.npl.co.uk/upload/pdf/Beginner%27s%20guide%20to%20humidity%20measurement%20(draft%20for%20comment).pdf. [Poskus dostopa 29. 7. 2017].

[12] J. Fraden, Handbook of Modern Sensors: Physics, design, and Applications (Third edition), San Diego: Springer-Verlag, 2003.

[13] S. Soloman, Sensors Handbook : Second Edition, The McGraw-Hill Companies, 2010.

[14] J. Fraden, Handbook of Modern Sensors: Physics, design, and Applications (Third edition), San Diego: Springer-Verlag, 2003.

[15] S. z. organizacija, „WHO," 1. 9. 2017. [Elektronski]. Dostopno na: http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/. [Poskus dostopa 8. 8. 2017].

[16] J. S. C. K. C. K. Sergei Yushanov, „Comsol," 9. 10. 2013. [Elektronski]. Available: https://www.comsol.com/paper/download/181101/crompton_paper.pdf. [Poskus dostopa 8. 8. 2017].

[17] M. Integrated, „MAX31865 Datasheet," San Jose, 2012.

[18] "MS5607-02BA03 Datasheet," TE Connectivity, Schaffhausen, 2017.

[19] Honeywell, „Honeywell Sensing," Honeywell, 1. 7. 2012. [Elektronski]. Dostopno na: https://sensing.honeywell.com/spi-comms-with-digital-humidity-temp-sensors-tn-009071-1-en-final-07jun12.pdf. [Poskus dostopa 14. 8. 2017].

[20] „Atmel," Atmel, 1 12 2015. [Elektronski]. Dostopno na: http://www.atmel.com/Images/Atmel-42079-ATMEGA256RFR2-Xplained-Pro_User-Guide.pdf. [Poskus dostopa 8. 8. 2017].

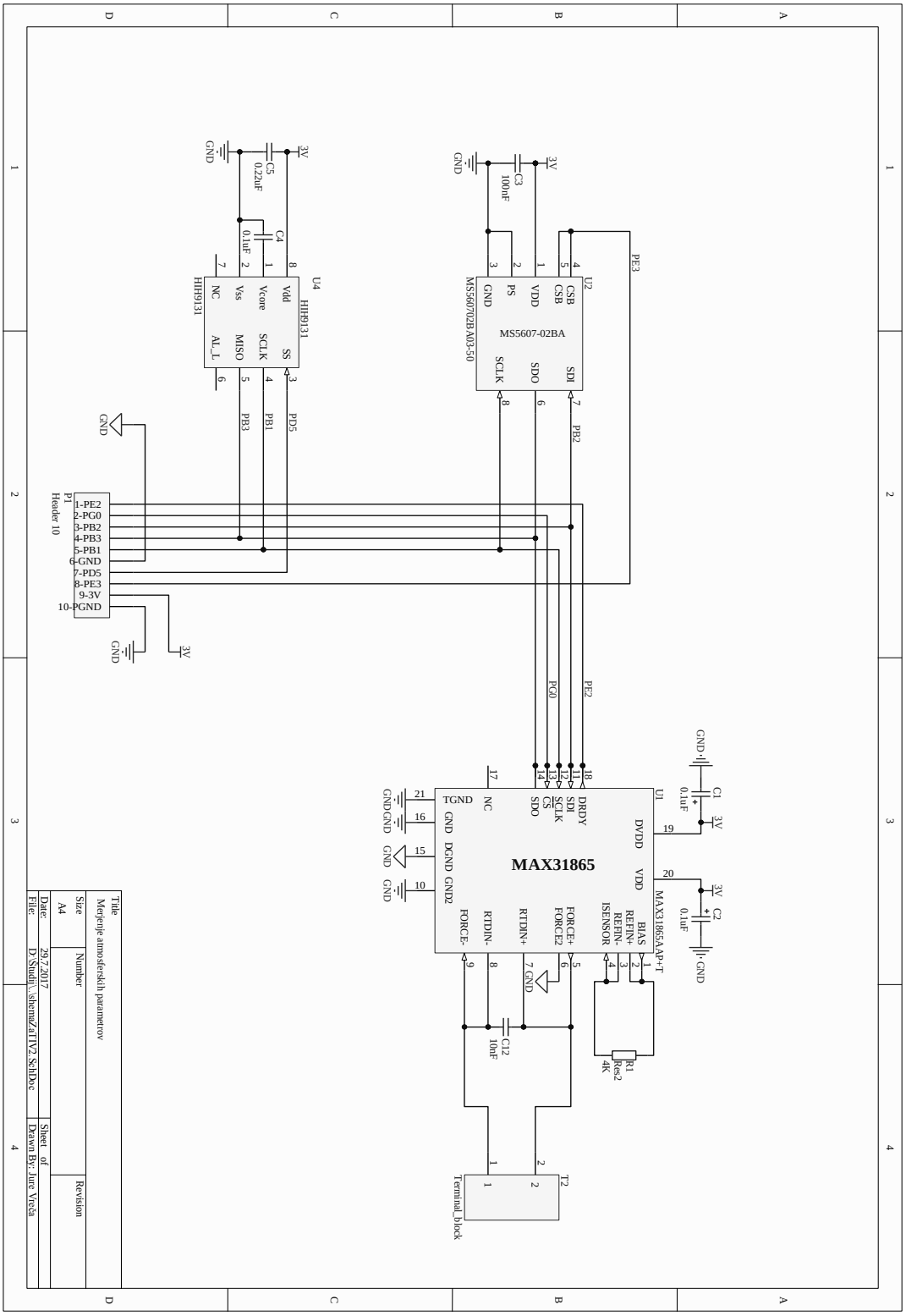
[21] A. R. S. z. okolje, „Zadnje urne in dnevne koncentracije onesneževal," 29. 8. 2017. [Elektronski]. Available: http://www.arso.gov.si/zrak/kakovost%20zraka/podatki/dnevne_koncentracije.html. [Poskus dostopa 29. 8. 2017].

[22] S. z. organizacija, „WHO," 2005. [Elektronski]. Dostopno na: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69477/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf. [Poskus dostopa 30. 8. 2017].

[23] „Honeywell Sensing," 14. 8. 2017. [Elektronski]. Dostopno na: https://sensing.honeywell.com/soic-8-smd-with-filter-lowres-photo.jpg.

PRILOGE

A. Shema merilnega modula



B. Izvleček iz programa

```
/*      diplomska6.c
 *      Datum nastanka: 15. 8. 2017 10:53:21
 *      Avtor: Jure Vreča
 */
#include "include/main.h" // Stavek mora biti nad stavkom #include <util/delay.h>
#include "include/pms3003.h"
#include "include/max31865.h"
#include "include/hih9131.h"
#include "include/ms560702.h"
#include <util/delay.h>
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>

static void Ura_inic();
static void Pin_inic(); // Opravi inicializacijo pinov za vse čipe.
static double max_temperatura = 0;
static double hih_temperatura, hih_vlaznost;
static double ms_temperatura, ms_pritisk;
static uint16_t  pms_meritev[12];
static uint16_t  pms_pm1, pms_pm2_5, pms_pm10;

static void Ura_inic() {...}
static void Pin_inic(void) {...}
void Postavi_pin(Port port, uint8_t pin_num) {...}
void PoNastavi_pin(Port port, uint8_t pin_num) {...}
bool Beri_pin(Port port, uint8_t pin_num) {...}

int main(void)
{
        Ura_inic();
        Pin_inic();
        Ms5607_inic();
        Max_inic();
        Pms3003_inic();

  while (1)
  {
                Max_beri(&max_temperatura);
                Hih9131_beri(&hih_vlaznost, &hih_temperatura);
                Ms5607_beri(&ms_temperatura, &ms_pritisk);
                Pms3003_beri(pms_meritev);
                pms_pm1 = pms_meritev[PM1_AE];
                pms_pm2_5 = pms_meritev[PM25_AE];
                pms_pm10  = pms_meritev[PM10_AE];
  }
}
```