

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 1

**METEOROLOŠKA STANICA ZA UDALJENA
MJERENJA**

Nikša Maslović

Zagreb, lipanj 2010.

*Zahvaljujem svome mentoru prof. dr.
sc.Vedranu Bilasu na savjetima i smjernicama*

*Mnogo hvala djelatnicima Zavoda za
elektroničke sustave i obradu informacija
Tihomiru Marijanoviću, Miri Raniloviću i
Marijanu Kuriju na stručnoj pomoći i
savjetima*

*Hvala obitelji i prijateljima na podršci prilikom
izrade ovog rada*

SADRŽAJ

1. UVOD	6
2. METEOROLOŠKA STANICA	8
2.1. PRIMJER KORIŠTENJA METEOROLOŠKIH PARAMETARA	8
2.1.1. <i>Maslinet</i>	8
2.1.2. <i>Promatranje ledenjaka</i>	9
2.2. UOBIČAJENO KORIŠTENI SENZORI U METEOROLOŠKIM STANICAMA	10
2.2.1. <i>Temperatura</i>	11
2.2.2. <i>Vlaga zraka</i>	12
2.2.3. <i>Tlak zraka</i>	12
2.2.4. <i>Svjetlo</i>	14
2.2.5. <i>Količina padalina</i>	14
3. METODE MJERENJA BRZINE VJETRA	16
3.1. ANEMOMETRI S LOPATICAMA	16
3.2. ZVUČNI ANEMOMETRI	18
3.3. LASER DOPPLER ANEMOMETAR (LDA)	19
4. ANEMOMETRI S UGRIJANOM ŽICOM	21
4.1. ANEMOMETRI U NAČINU RADA S KONSTANTNOM TEMPERATUROM	24
4.2. ANEMOMETRI U NAČINU RADA S KONSTANTNOM STRUJOM	25
5. UREĐAJ ZA MJERENJE BRZINE I SMJERA VJETRA - ANEMOMETAR S UGRIJANIM OTPORNIM ELEMENTOM U NAČINU RADA S KONSTANTNOM STRUJOM	27
5.1. OSJETILNI ELEMENT	28
5.1.1. <i>Mjerenje temeprature</i>	31
5.1.2. <i>Prednosti i nedostaci Pt100 senzora</i>	32
5.2. IZVOR KONSTANTNE STRUJE	33
5.3. NAPONSKE RAZINE	33
5.4. INSTRUMENTACIJSKO POJAČALO	35
5.5. MIKROKONTROLER	35
6. UMJERAVANJE SENZORA	37
7. REZULTATI MJERENJA	39
7.1. ODREĐIVANJE SMJERA VJETRA	39
7.2. UTJECAJ MATERIJALA CILINDRA	42
7.3. UTJECAJ PROMJENE TEMPERATURE OKOLINE	44

7.4. ODZIV OTPORNIČKOG ELEMENTA PRI MANJOJ STRUJI.....	45
8. ZAKLJUČAK	46
9. LITERATURA.....	48
10. SAŽETAK	50

1. UVOD

Vrijeme je skup svih pojava u atmosferi (npr. padanje snijega, grmljavina...) i stanja atmosfere (temperatura, tlak, vlažnost zraka...) na nekom prostoru u određenom trenutku, koje se većim dijelom odvijaju u troposferi. Bitan utjecaj vremenskih pojava na ljude i ljudske aktivnosti doveo je do razvoja znanosti o prognoziranju vremena. Meteorologija je znanost o Zemljinoj atmosferi i promjenama temperature i vlage u njoj koje uzrokuju različite vremenske uvjete, a pomoću koje se nastoji predvidjeti vrijeme na nekom području.

U počecima meteorologije ljudi su se služili svojim osjetilima za promatranje trenutnog vremena i nagađanja kakvo bi ono moglo biti u vrlo bliskoj budućnosti. Razvijanje meteorologije omogućilo je njeno iskorištavanje u svakodnevnom životu za potrebe čovjeka. Nastale su prve meteorološke službe, koje su započele s međunarodnom suradnjom. 1951. godine nastaje *Svjetska meteorološka organizacija* (*World Meteorological Organization – WMO*) u koju je uključena i Hrvatska. Njena je zadaća organiziranje mreže meteoroloških postaja na kojima će se mjeriti i opažati meteorološki elementi i pojave, brza razmjena meteoroloških izvještaja i pomaganje kod primjene meteorologije u svim ljudskim djelatnostima. Razvoju meteorologije pomogla su računala koja omogućuju automatizaciju rada, brzu i jednostavniju obradu velikog broja mjernih podataka dobivenih s velikog broja meteoroloških stanica u pojedinim zemljama i svijetu kako bi se pravovremeno predvidjelo stanje atmosfere. Meteorološka mjerenja su vrlo bitan dio meteorologije jer njihovom pravilnom analizom nastojimo potpuno razumijeti ponašanje vremenskih pojava. Ljudska osjetila mogu samo približno procijeniti neke meteorološke vrijednosti, kao npr. temperaturu, vlagu... No, da bi se precizno odredile neke meteorološke veličine koristimo se mjernim instrumentima.

Meteorologija se danas koristi u mnogim granama znanosti koje se bave čovjekovom okolinom od kojih su neke agrokultura, ekologija, aeronautika, oceanografija, proizvodnja energije, šumarstvo. Mnoge od navedenih znanosti uvelike ovise o učincima vremena na određenom mjestu. Utjecaj vremenskih pojava na ljude te na čitav niz ljudskih aktivnosti i djelatnosti, biljni i životinjski svijet, očituje se na različite načine; npr.

na rasprostranjenost biljnih i životinjskih vrsta, na način života ljudi (nepovoljne vremenske prilike mogu nanijeti velike štete gospodarstvu i okolišu, sušna razdoblja uzrokuju nestašicu pitke vode, štete na usjevima, te se povećava opasnost od šumskih požara).

Tako se bez promatranja i predviđanja stanja atmosfere ne može zamisliti moderna poljoprivreda. Ono je nužno u poljoprivredi radi planiranja proizvodnje i uzgoja. Time se postiže pravilan odabir sjemena, količina i vrijeme navodnjavanja, predviđa se pojava bolesti i štetočina u voćnjacima, vinogradima, odnosno na ratarskim kulturama, određuju se zaštitna sredstva, planira se vrijeme sadnje, berbe, žetve, a to sve u konačnici daje bolje i kvalitetnije prinose poljoprivredne kulture. Promatranje vremenskih prilika važno je i u ekologiji, kod analiza utjecaja na okoliš različitih objekata kao što su tvornice, elektrane, naselja, te na planiranje novih izvora onečišćenja.

U sljedećim poglavljima biti će opisani senzori koji se koriste u meteorološkim stanicama, a posebna pažnja biti će posvećena metodama za mjerenje brzine i smjera vjetra. Ujedno će se prikazati izvedba jedno takvog mjerila koje koristi ugrijani otpornički element u načinu rada s konstantnom strujom, kako bi se odredila brzina i smjer vjetra kao i temperatura.

2. METEOROLOŠKA STANICA

Uređaj sa instrumentima i opremom za promatranje atmosferskih uvjeta kojim se izvode meteorološka mjerenja da bi se dobila vremenska prognoza, naziva se meteorološka stanica. Meteorološka stanica mora biti što dalje od značajnijih objekata kako oni ne bi utjecali na mjerenje. U posljednje vrijeme sve su raširenije automatizirane stanice pomoću kojih se svakih nekoliko sekundi mogu obaviti mjerenja koja zatim mogu spremi u memoriju ili pomoću GPRS veze poslati u središnje računalo na daljnju obradu ili prikazati na web portalu. Cijena tih stanica kreće se od par stotina kuna pa sve do nekoliko desetaka ili stotina tisuća kuna. Takve se meteorološke stanice postavljaju na teško dostupna mjesta, pa nije potreban motritelj koji bi te podatke trebao očitati. Budući da su mjesta na kojima se koriste nepristupačna, najčešće ne postoji neki stalni izvor napajanja. Zbog toga se nastoji smanjiti potrošnja kako bi se osigurao što dulji rad stanice bez promjene baterija. Stanice se osim pomoću baterijskog napajanja obično mogu napajati energijom iz okoline kao što je Sunčeva energija, energija vjetra i slično.

Tipične veličine koje se mjere u meteorološkim stanicama su temperatura, tlak, vlaga, brzina i smjer vjetra, količina padalina. Naravno postoje i specijalizirane meteorološke stanice kao one koje se koriste u poljoprivredne svrhe koje mjere i neke veličine koje su važne u tom području, kao isparavanje tla, isparavanje biljaka, temperatura tla na nekoliko dubina, vlažnost lista i slično.

2.1. PRIMJER KORIŠTENJA METEOROLOŠKIH PARAMETARA

2.1.1. *Maslinet*

Jedan od primjera korištenja meteoroloških parametara u poljoprivredi je sustav bežične senzorske mreže *Maslinet*. Budući da je maslinarstvo vrlo važna grana u Dalmaciji, nastoji se uvođenjem tehnologija smanjiti upotreba pesticida, poboljšati kvalitetu maslinova ulja i povećati proizvodnja kako bi se moglo konkurirati ostalim zemljama, proizvođačima maslinova ulja. Podatke iz okoline prikupljaju čvorovi malih dimenzija, za

koje se nastoji da što dulje vrijeme budu energetske neovisni, tj. da što dulje vremena rade koristeći samo baterijsko napajanje i energiju iz ambijenta (Slika 1.).



Slika 1. Bežična senzorska mreža Maslinet (Maslinet,2009.)

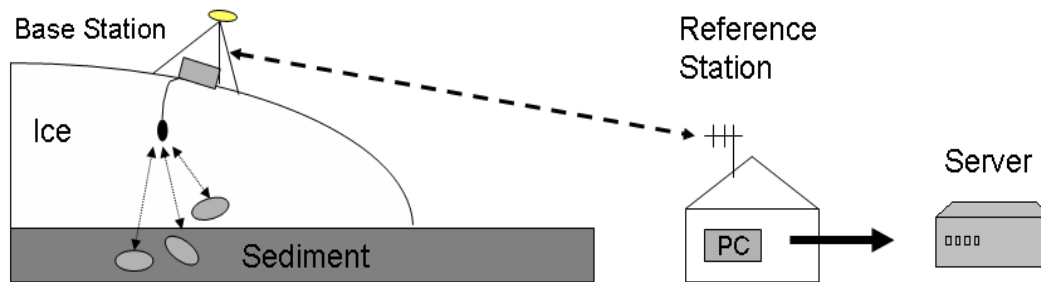
Čvorovi prikupljaju i obrađuju podatke, a s ostalim čvorovima i nadzornim sustavom komuniciraju bežično. Podaci koji se prikupljaju su meteorološki parametri i detekcija štetnika. Na temelju njih se upravlja upotrebom zaštitnih sredstava, donosi odluka o tome treba li koristiti pesticide za obranu maslina od štetnika, te u slučaju da je to potrebno, određuje se vrsta, količina i vrijeme upotrebe.

2.1.2. Promatranje ledenjaka

Korištenjem senzorskih mreža u ekologiji prikupljaju se meteorološki podaci i nastoji se dobiti što jasnija slika o tome kako se mijenja naš okoliš. U Briksdalsbreenu u Norveškoj prikupljaju se meteorološki podaci s ledenjaka kako bi se što bolje razumijela klima Zemlje, tj. utjecaj globalnog zagrijavanja na podizanje razine mora. Pri tome su ledenjaci ključni element, ali njihovo ponašanje je za sada slabo razumljivo. Topljenje leda

na Antartici ne kontrolira samo količina snježnih padalina nego i procesi pod ledom. Zato su od posebnog interesa pomaci i dinamika unutar ledenjaka.

Senzorski čvorovi su postavljeni u rupe na različitim dubinama u ledenjaku i ispod ledenjaka (Slika 2).



Slika 2. Senzorska mreža za promatranje ledenjaka (Glacsweb)

Senzorski čvorovi su opremljeni sensorima za mjerenje meteoroloških parametara, senzorom napreznja i senzorom nagiba, kako bi se odredila orijentacija čvora. Senzorski čvorovi komuniciraju s baznom stanicom na vrhu ledenjaka. Bazna stanica mjeri gibanje ledenjaka koristeći GPS, a prikupljene podatke šalje preko GSM-a. Ključni problem je komunikacija kroz led i vodu. Senzorska mreža mora zadovoljavati uvjete niske potrošnje, robusnosti i prilagodljivost.

2.2. UOBIČAJENO KORIŠTENI SENZORI U METEOROLOŠKIM STANICAMA

Složeni fizički i kemijski procesi u atmosferi nastoje se prikazati sustavom jednadžbi. Njihovim rješavanjem pomoću numeričkih metoda simulira se ponašanje atmosfere u vremenu i tako se nastoji odrediti stanje atmosfere u budućnosti, što je glavni zadatak meteorologije. Dakle, određivanjem meteoroloških parametara (vjetar, temperatura, tlak, oborine, vlaga) u meteorološkim stanicama diljem svijeta i njihovim ubacivanjem u numerički model nastoji se točno predvidjeti prognoza vremena u budućnosti. Na točnost prognoze bitno utječe točnost meteoroloških parametara te je

zbog toga potrebno da su senzori kojima se oni mjere što točniji. U nastavu ovog poglavlja biti će opisani uobičajeno korišteni senzori u meteorološkim stanicama: senzori temperature, vlage, tlaka, svjetla i količine padalina, dok će senzori brzine i smjera vjetra biti opisani u posebnom poglavlju.

2.2.1. Temperatura

Temperatura je fizikalna veličina koja pokazuje stupanj zagrijanosti neke tvari te ovisi o tome koliko energije sadrži neko tijelo određene mase i tlaka. Jedinica za mjerenje i izražavanje temperature u SI sustavu je Kelvin (K), dok se u Europi temperatura uobičajeno izražava u Celzijevim stupnjevima ($^{\circ}C$). Veza između te dvije jedinice je $T(K) = 273,15 + t(^{\circ}C)$. U meteorologiji se najčešće mjeri temperatura zraka, obično na visini od 2 metra iznad tla kako bi postojala cirkulacija zraka. Instrument za mjerenje temperature mora biti u hladovini, dakle zaklonjen od izravnog Sunčevog zračenja, te ne smije biti izložen izravnom utjecaju vjetra. Postoji i poseban minimalni termometar koji se postavlja na visinu od 5 cm iznad tla i koji mjeri iznos minimalne temperature koja se očitava ujutro. Mjerenje te temperature posebice je važno zbog praćenja pojave mraza, s obzirom na to da je noću, pri situacijama bez vjetra temperatura i nekoliko stupnjeva niža nego ona na 2 metra. Osim toga, na meteorološkom stanicom se može mjeriti i temperatura tla na nekoliko različitih dubina. Najčešće je to dubina od 5 cm, ali može biti i dublje, većinom do metra.

Za mjerenje temperature mogu se koristiti otpornički senzori (RTD), termistori ili termoparovi (Fraden, 2004.). Kod otporničkih senzora koristi se promjena otpora metala, koja je ovisna o temperaturi. Konstantna struja prolazi kroz otpornički senzor i stvara pad napona koji je ovisan o otporu, a time i o temperaturi. Ova vrsta senzora detaljnije će biti opisana u nastavku rada jer su upotrebljavani pri izradi uređaja za mjerenje brzine i smjera vjetra. Termistori su temperaturno osjetljivi otpornici kojima se električni otpor mijenja ovisno o temperaturi. Postoje dvije vrste termistora: NTC (negative temperature coefficient) termistori koji služe za mjerenje temperature i PTC (positive temperature coefficient) termistori koji se koriste u zaštitnim sklopovima. Kod NTC termistora otpor

opada s porastom temperature. Termoparovi su senzori koji se sastoje od dvije žice od različitih metala koje su spojene na jednom kraju. Princip rada termopara zasniva se na termoelektričnom efektu tj. do pojave napona pri izlaganju metala temperaturnom gradijentu. Ovisno o kombinaciji metala mijenja se točnost mjerenja, stabilnost, troškovi...

2.2.2. Vlaga zraka

Vlažnost zraka iskazuje se na nekoliko načina, a najčešće je to relativna vlažnost. Relativna vlažnost zraka na određenoj temperaturi jednaka je omjeru tlaka vodene pare i tlaka zasićene vodene pare na toj temperaturi.

Jedan od načina kako izmjeriti vlagu zraka jest pomoću kapacitivnog senzora. Sastoji se od podloge na kojoj je tanki film polimera ili metalnog oksida koja se nalazi između dvije vodljive elektrode. Osjetilna površina obložena je poroznim materijalom kako bi ju zaštitio od onečišćenja i izlaganja kondenzaciji. Podloga je obično od stakla, keramike ili silicija. Sloj polimera je dielektrik koji absorbira molekule vode iz zraka, pri čemu se bitno mijenjaju dielektrična svojstva, a time i kapacitet. Dakle, vrijedi da je kapacitet proporcionalan relativnoj vlažnosti. Ovi senzori vlažnosti imaju raspon mjerenja od 1 do 100% s rezolucijom od $\pm 3\%$.

Senzor za mjerenje vlage je smješten odmah pokraj termometara kako bi se osigurala korelacija između očitavanja relativne vlažnosti i temperature. Ta dva očitavanja se koriste za izračun točke rosišta.

2.2.3. Tlak zraka

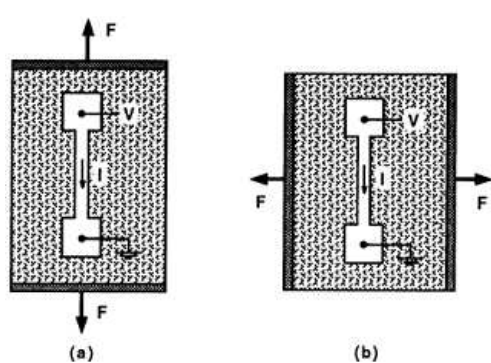
Atmosferski tlak je tlak na bilo kojem dijelu Zemljine atmosfere. Jedinica za tlak je Paskal, dok se u meteorologiji koristi hektopaskal (hPa). Jedan hektopaskal odgovara jednom milibaru ($1\text{hPa} = 1\text{mbar}$). Tlak zraka mijenja se s visinom, pa se pri izražavanju

tlaka zraka u meteorološkim stanicama on svodi na srednju razinu mora kako bi ga bilo moguće uspoređivati na svim stanicama međusobno.

Tlak se može mjeriti mjerenjem pomaka osjetnog elementa. Zbog razlike tlakova doći će do pomaka osjetnog elementa (membrana, mijeh, spiralna cijev) koji se može detektirati pretvornikom pomaka. U automatiziranim meteorološkim stanicama koriste se senzori tlaka kod kojih se mjerenje svodi na mjerenje promjene napona uslijed promjene otpora koja nastaje kao posljedica promjene naprezanja u osjetnom elementu. Takvi senzori su piezootpornici. U silicij n-tipa se p-baznom difuzijom difundiraju područja koja čine piezootpornike. Kod piezootpornog senzora promjena specifičnog otpora materijala (ρ) pod utjecajem naprezanja (σ) može se izraziti relacijom 1

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi \sigma \quad (1)$$

gdje je π konstanta piezootpornika.



Slika 3. Naprezanje piezootpornika

S obzirom na smjer djelovanja sile u odnosu na tok struje i orijentaciju kristalne rešetke, razlikuju se longitudinalni i transverzalni piezootpornički koeficijent (Slika 3). Otpornici su orijentirani i postavljeni tako da dominira jedan od koeficijenta. Otpornici su smješteni na mjesta na površini membrane, koja se najviše deformiraju pod utjecajem tlaka. Piezoelektrični senzori temperaturno su ovisni. Posljedica toga je smanjenje osjetljivosti s

porastom temperature. Zbog toga je potrebna temperaturna kompenzacija tj. izlaz senzora biti će ovisan i o tlaku i o temperaturi.

2.2.4. Svjetlo

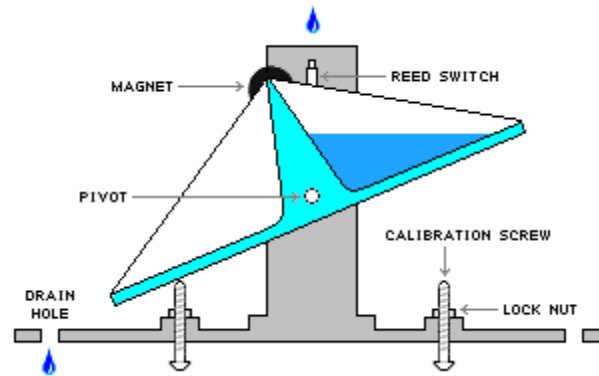
Kod meteoroloških mjerenja ponekad je korisno imati podatak o intenzitetu svjetlosti. Jedinica za intenzitet svjetlosti je lux. Intenzitet svjetlosti se može mjeriti foto-diodama (Webster, 1999.) To su poluvodičke komponente koje pretvaraju svjetlosnu energiju u električnu. Kada svjetlost padne na poluvodič (p-n spoj), fotoni se apsorbiraju i stvaraju slobodne elektrone i šupljine. Na taj način nastaje fotostruja kroz p-n barijeru. Fotodiode se mogu koristiti u propusnoj ili nepropusnoj polarizaciji. U propusnoj polarizaciji svjetlost koja pada na diodu uzrokuje pojavu napona na diodi, koji zatim potjera struju od p - tipa prema n - tipu poluvodiča. U nepropusnoj polarizaciji, pojavom svjetlosti dovoljne frekvencije na diodi, veliki otpor diode se drastično smanjuje, pa se detekcijom struje (fotostruje) kroz nju nepropusno polarizirana fotodiode može koristiti kao detektor svjetlosti. Ovaj način korištenja fotodiode je puno osjetljiviji na svjetlost.

2.2.5. Količina padalina

Oborina je skupina vodenih čestica koje padaju iz oblaka na tlo, bilo u tekućem ili krutom stanju. Oborine nastaju kondenzacijom vodene pare u zraku. Najvažnije je mjerenje ukupne količine oborina tijekom jednog sata, dana, mjeseca, godine, ali i intenzitet same oborine koja se izražava (mm/h). Oborina se izražava u litrama (l) ili milimetrima (mm) palim na jedan kvadratni metar (1mm = 1l).

Najčešća vrsta senzora za mjerenje količine padalina koji se koristi u automatiziranim meteorološkim stanicama je "tipping bucket" senzor (Webster, 1999). Kiša, snijeg, tuča i/ili ostale oborine upadaju u posudu koja je obično valjkasta posuda s otvorom na vrhu. Oborina se zatim slijeva kroz otvor na posudi i skuplja se u jednu od dvije male komore koje se gibaju oko točke oslonca. Ove male komore napravljene su u uskim tolerancijama kako bi se postigao točan iznos padalina u svakoj od njih (tipično oko 0,2 mm). Kiša se iz

posude prelijeva u jednu od komora. Kada se ona napuni odgovarajućim iznosom oborine, koji je jednak inkrementu koji komora mjeri (0,2 mm), komore se prevagnu na jednu stranu i tada se puna komora prazni, a prazna dolazi na odgovarajuću poziciju da bi se u sljedećem koraku u nju prelijevala oborina. Svaki put kad se komore prevagnu dolazi do spajanja sklopke te se stvaraju se impulsi koji se broje (Slika 4).



Slika 4. "Tipping bucket" (WheatherShack)

Tijelo i baza posude napravljene su od tvrde, UV otporne plastike. Komore se gibaju na ležajevima koji minimiziraju trenje i habanje. Podesivi vijci od nehrđajućeg čelika ispod svake komore "tipping bucket" senzora dopuštaju fino kalibriranje. Uređaj se obično postavlja na 1 metar visine, te treba paziti da je na čistini. Ukoliko je pala oborina u krutom stanju (snijeg, tuča), oborinu treba rastopiti, a potom izmjeriti količinu vode.

3. METODE MJERENJA BRZINE VJETRA

Funkcija anemometra je mjerenje nekoliko ili svih komponentata vektora vjetra. Idealni senzor vjetra bi trebao:

- reagirati na najmanji povjetarac i vjetrove poput uragana
- imati linearni izlaz
- trenutno reagirati na turbulentne fluktuacije

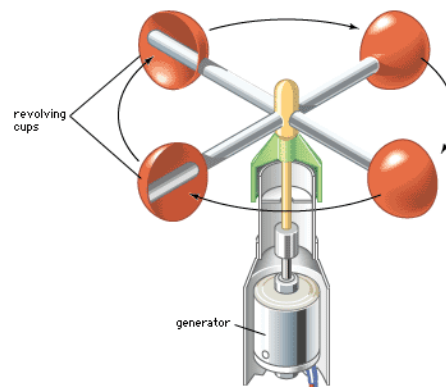
U stvarnosti senzori ne mogu reagirati na vjetrove male snage, a ni izdržati jake vjetrove. Potrebno je odabrati senzor koji zadovoljava sve uvjete koji su pred njega postavljeni.

Vjetar je horizontalno strujanje zraka koje nastaje zbog nejednakosti tlaka u zemljinoj atmosferi. Određen je brzinom i smjerom. U meteorologiji službena jedinica za brzinu vjetra je m/s, dok je smjer određen engleskim kraticama strana svijeta (npr. E, NE, SW...). Mjerenje vjetra vrši se na visini od 10 metara iznad tla kako bi se izbjegli negativni utjecaji od miješanja vjetra pri samom tlu uzrokovani od raznih faktora. Brzina se izražava najčešće u km/h, m/s ili čvorovima (kn).

3.1. ANEMOMETRI S LOPATICAMA

Anemometri s lopaticama su najčešće upotrebljavana vrsta anemometra. Jeftiniji su u odnosu na druge vrste anemometara i mogu biti vrlo robusni. Sastoje se od 3 ili 4 lopatice koje su smještene vertikalno na horizontalne nosače. Horizontalni nosači smješteni su na zajedničku osovinu koja se okreće zajedno s lopaticama (Slika 5). Osovina je spojena na električni pretvornik koji proizvodi električni izlazni AC signal čiji napon i/ili frekvencija je proporcionalna brzini vjetra. Još jedan od načina mjerenja brzine vjetra je preko optičkog pretvornika tako da se stvaraju impulsi, svaki put kad rotirajući krug

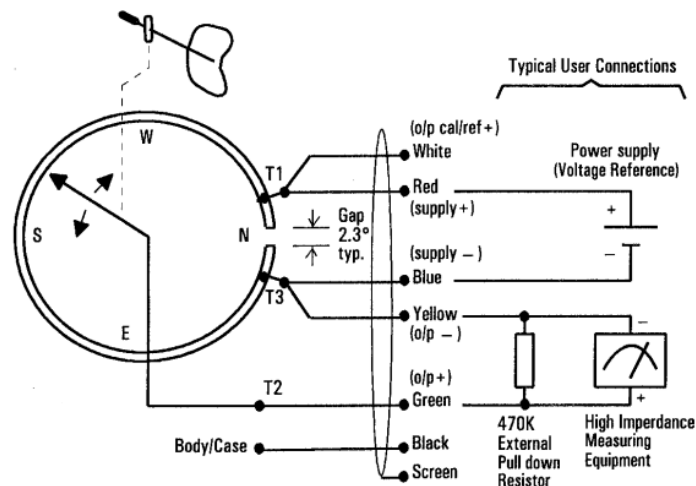
prekine zraku svjetlosti. U slučaju da se generiraju impulsi srednja brzina vjetra izračuna se na osnovu poznavanja broja impulsa u određenom vremenskom intervalu.



Slika 5. Anemometar s lopaticama

Neke karakteristične vrijednosti vezane uz ovu vrstu anemometra su točnost od $\pm 4\%$, rezolucija 0,1 m/s, te mjerni opseg od 1-75 m/s.

Smjer vjetra se osim stranama svijeta može prikazati i u obliku stupnjeva ($W= 270^\circ$, $SW= 225^\circ$). Može se odrediti npr. potenciometrom. Napon uzbude se dovede na potenciometar, a izlazni signal je analogni napon direktno proporcionalan kut azimuta (Slika 6).

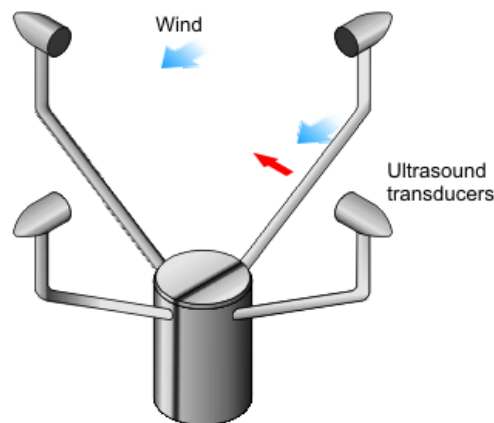


Slika 6. Određivanje smjera vjetra potenciometrom

Ovi instrumenti prikazuju kut od 0° do 360° sa točnošću od $\pm 5^\circ$ i rezolucijom od 1° .

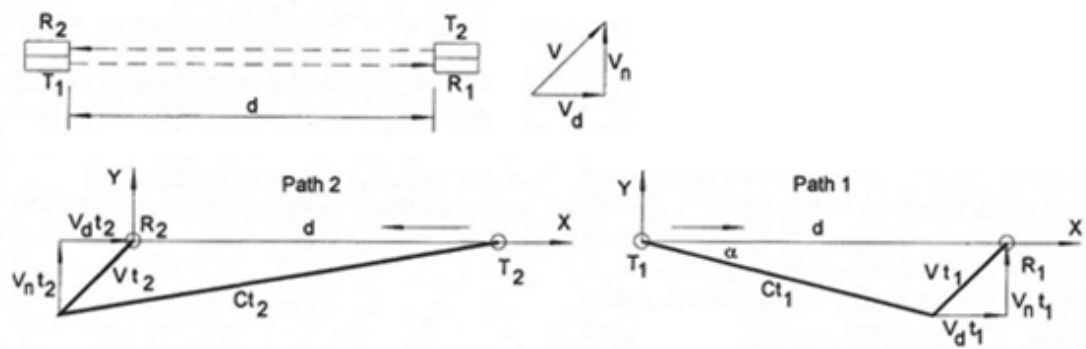
3.2. ZVUČNI ANEMOMETRI

Ova vrsta anemometara koristi ultrazvučne valove za mjerenje brzine i smjera vjetra. Brzina vjetra određuje se tako da se mjeri vrijeme koje je potrebno ultrazvučnom impulsu da prođe put između fiksnog odašiljača i fiksnog prijemnika. Brzina vjetra će povećati ili smanjiti brzinu zvuka ovisno o tome u kojem smjeru vjetar puše. Određuje se komponenta brzine vjetra na tom putu.



Slika 7. Ultrazvučni anemometar

Brzina vjetra na ravninu između jednog para odašiljača i prijemnika može se izračunati iz sljedećih relacija:



$$t_2 = \frac{d}{C \cos \alpha - V_d} \quad (2)$$

$$t_1 = \frac{d}{C \cos \alpha + V_d} \quad (3)$$

$$\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = \frac{C \cos \alpha + V_d}{d} - \frac{C \cos \alpha - V_d}{d} = \frac{2V_d}{d} \quad (4)$$

$$V_d = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) \quad (5)$$

gdje je:

t_1 – vrijeme potrebno da zvuk dođe od odašiljača T_1 do prijemnika R_1

t_2 – vrijeme potrebno da zvuk dođe od odašiljača T_2 do prijemnika R_2

d – udaljenost između para odašiljača i prijemnika

v_d – komponenta brzine na d

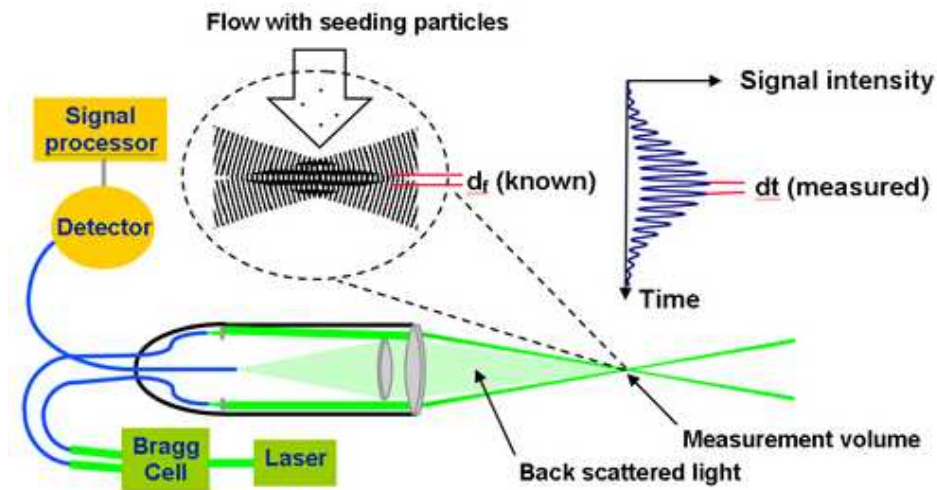
c – brzina zvuka

Pomoću para pretvarača mjerenje može biti kombinirano za određivanje 1-, 2-, ili 3-dimenzije gibanja vjetra. Razmak između pretvarača je tipično 10 - 20 cm. Vrlo su prikladni za mjerenje turbulencija. Kako nemaju pomične dijelove pogodni su za dugoročnu upotrebu u udaljenim automatiziranim stanicama i tamo gdje na točnost i pouzdanost tradicionalnih anemometara s lopaticama utječe slani zrak ili velike količine prašine. Neki od nedostataka su im skupoća i gubitak signala za vrijeme jake kiše ili snijega.

3.3. LASER DOPPLER ANEMOMETAR (LDA)

Laser doppler anemometar služi za mjerenje smjera i brzine fluida. Ovi anemometri rade na načelu križanja dvije zrake monokromatskog, koherentnog svjetla iz lasera (F. Durst, 1981.). Laserska zraka se najprije podijeli u dvije zrake jednakog intenziteta. Zatim su zrake usmjerene u optička vlakna koja ih dovode do optike sonde. Žarišna duljina leća sonde određuje veličinu i poziciju na kojemu se križaju te dvije zrake.

Optika se koristi da bi se dvije laserske zrake dovele u točku za mjerenje gdje se one križaju. Mjerni volumen koji nastaje križanjem te dvije zrake ima oblik elipsoida. Tamo gdje se zrake križaju nastaju ravnine visokog intenziteta svjetlosti i između njih ravnine niskog intenziteta koje su okomite na ravninu laserske zrake. Prostor između ravnina je određen postavljenim optičkim parametrima, odnosno valnom duljinom optičkog svjetla i kutom između zraka.



Slika 8. Princip rada laser Doppler anemometra

Protok je prepun malih čestica. Kada ove čestice prođu kroz mjerni volumen one raspršuju svjetlost i reflektiraju je, ali samo na mjestima konstruktivne interferencije. To svjetlo prima fotodetektor. Intenzitet fluktuacija raspršene svjetlosti ovisi o brzini čestica. Vrijeme dt može se relativno lako izmjeriti i tada je vrlo lako izračunati brzinu čestica dijeljenjem prijednog puta df i vremena potrebnog za to dt .

4. ANEMOMETRI S UGRIJANOM ŽICOM

Anemometri s ugrijanom žicom (eng. „hot-wire anemometer“) mjere brzinu vjetra tako da opažaju odvođenje topline zbog gibanja zraka. Glavni dio ovih senzora je ugrijana žica kojoj se mijenja otpor zbog odvođenja topline koja je u ovisnosti o brzini vjetra kojemu je žica izložena. Žica se grije zbog prolaska struje. Ako se pretpostavi da je žica u temperaturnoj ravnoteži s okolinom, tada je energija potrebna da bi se ugrijala žica jednaka energiji koja se gubi zbog odvođenja topline konvekcijom:

$$I^2 R_w = h \cdot A_w (T_w - T_f) \quad (6)$$

gdje je:

I = ulazna struja

R_w = otpor žice

T_w i T_f = temperature žice i fluida

A_w = projicirana površina žice

h = koeficijent prijenosa topline žice.

Otpor žice R_w također ovisi o temperaturi i mijenja se prema relaciji 7:

$$R_w = R_{ref} [1 + \alpha(T_w - T_{ref})] \quad (7)$$

gdje je:

α = temperaturni koeficijent,

R_{ref} = otpor na referentnoj temperaturi.

Koeficijent prijenosa topline žice je funkcija brzine strujanja prema Kingovom zakonu

$$h = a + b v_f^n; \quad n \sim 0,5 \quad (8)$$

gdje su:

a, b - koeficijenti ovisni o obliku senzora i izračunati tijekom kalibracije

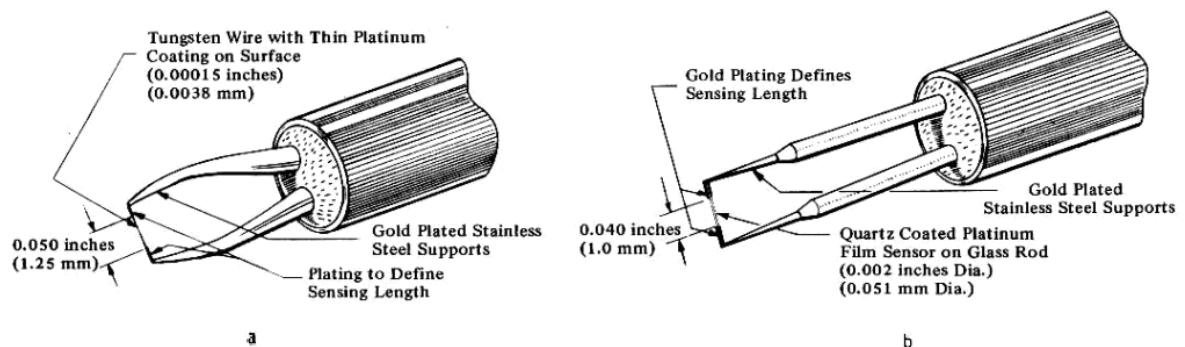
v - brzina strujanja fluida

Uvrštavanjem prethodno tri navedene jednadžbe dobije se

$$a + bv_f^n = \frac{I^2 \cdot R_{ref} [1 + \alpha(T_w - T_{ref})]}{A_w(T_w - T_f)} \quad (9)$$

$$v_f = \left\{ \left[\frac{I^2 \cdot R_{ref} [1 + \alpha(T_w - T_{ref})]}{A_w(T_w - T_f)} - a \right] \cdot \frac{1}{b} \right\}^{1/n} \quad (10)$$

Anemometri s ugrijanom žicom zbog svoje velike brzine odziva najčešće se koriste za mjerenje turbulentnih strujanja. Također se koriste za mjerenje svih brzih promjena fluktuacija. Umjesto ugrijane žice često se koristi i metal film. Izgled anemometra s ugrijanom žicom odnosno metal filmom prikazan je na Slici 9.



Slika 9. Anemometri s ugrijanom žicom a) i metal filmom b)

Anemometri sa ugrijanom žicom mora zadovoljavati sljedeće dvije karakteristike:

- imati veliki temperaturni koeficijent otpora
- imati takav električni otpor koji može biti jednostavno zagrijan električnom strujom

Kod anemometara s ugrijanom žicom, žica je pričvršćena za dva držača malih dimenzija kako ne bi znatnije utjecali na brzinu strujanja na mjestu na kojem je postavljen

anemometar. Žica je najčešće izrađena od platine jer je dobro otporna na oksidaciju i ima dobar temperaturni koeficijent ($0,003/^\circ\text{C}$). Dimenzije žice su od 4-10 μm u promjeru i 1mm u duljinu. Zbog svojih malih dimenzija su krhke i zbog toga pogodne samo za mjerenje strujanja čistih plinova. Za onečišćene plinove i fluide koristi se platinasti film koji je premazan na kvarcnu ili keramičku podlogu. Kada ih se uspoređuje sa anemometrima sa ugrijanom žicom imaju sljedeće prednosti:

- bolji frekvencijski odziv
- veća fleksibilnost kod konfiguracije senzora
- manje osjetljivi na nakupljanje neželjenog materijala i lakše se čiste; tanka kvarcna prevlaka na površini sprječava nakupljanje neželjenog materijala

Da bi zagrijali žicu na odgovarajuću temperaturu koriste se različite metode zagrijavanja i postizanja određene temperature, stoga po načinu rada razlikujemo dvije metode:

- s konstantnom strujom
- s konstantnom temperaturom

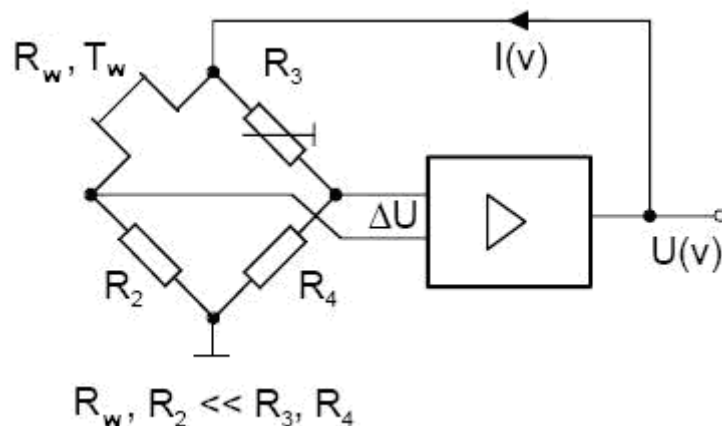
Moderni anemometri s ugrijanom žicom koriste integrirana pojačala u svojim izvedbama koji će svojim parametrima utjecati na karakteristiku anemometra. Anemometri s konstantnom temperaturom više se koriste jer su mnogo jednostavniji za korištenje od anemometara s konstantnom strujom. Prilikom odabira anemometara s konstantnom strujom ili s konstantnom temperaturom moramo uzeti u obzir utjecaj šuma. Omjer signal-šum je važan prilikom mjerenja malih razina signala i kod mjerenja turbulentnih strujanja koja imaju sadržane visoke frekvencije (s povećavanjem frekvencije raste i utjecaj šuma).

4.1. ANEMOMETRI U NAČINU RADA S KONSTANTNOM TEMPERATUROM

Anemometri s ugrijanom žicom u načinu rada s konstantnom temperaturom (eng. „*constant temperature anemometer*“) rade tako da je struju koja zagrijava žicu moguće prilagođavati kako bi se temperatura žice održala konstantnom. Povećanjem brzine vjetra otpor žice se smanjuje te je potrebna veća jakost struje kako bi se održala konstantna temperatura senzora. Također vrijedi da će se smanjenjem brzine vjetra morati smanjiti i struja kako bi se ispunio uvjet konstantne temperature. Vrijedi da su T_w i R_w konstante. Brzina fluida je funkcija struje i temperature fluida koji hladi žicu.

$$a + bv_f^n = \frac{I^2 \cdot R_w}{A_w(T_w - T_f)} = f(I, T_f) \quad (11)$$

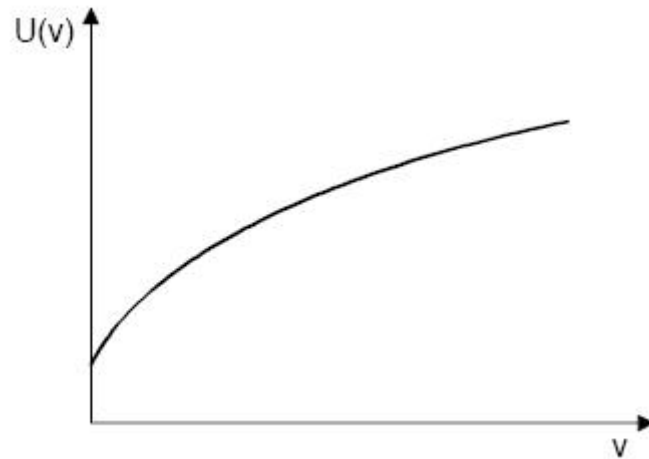
Električni krug je prikazan na slici 10.



Slika 10. Anemometri s ugrijanom žicom u načinu rada s konstantnom temperaturom

Krug radi tako da se promjenjivi otpornik namjesti na onu vrijednost otpora za koju želimo da ima i sonda za vrijeme rada. Pojačalo nastoji održati da napon pogreške bude 0 tako da prilagođava napon na mostu. Zbog toga će struja koja prolazi kroz most zagrijevati sondu na temperaturu koja će dati zadani otpor. Kada stavimo sondu na mjesto strujanja zraka ona će se hladiti. Zbog toga što nastojimo održati temperaturu (otpor) konstantan, napon

na mostu će porasti. Vrijedi da je napon veći što je strujanje zraka brže. Na Slici 11 prikazana je ovisnost izlaznog napona o brzini strujanja.



Slika 11. Ovisnosti izlaznog napona o brzini strujanja

Značajke anemometara koji rade s konstantnom temperaturom su:

- mogućnost mjerenja brzina vjetra od nekoliko cm/s do nadzvučnih
- mjerenje svih triju komponenti vjetra istovremeno
- davanje trenutne informacije o brzini
- točnost $\pm 1 \%$

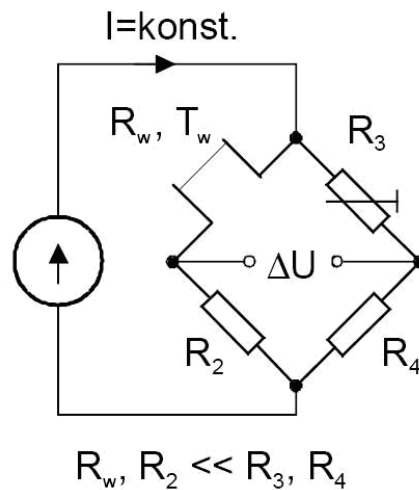
4.2. ANEMOMETRI U NAČINU RADA S KONSTANTNOM STRUJOM

Anemometri u načinu rada s konstantnom strujom (eng. „*constant current anemometer*“) rade na način da se kroz žicu anemometra propušta konstantna struja zbog koje se žica zagrije na neku određenu temperaturu. Zbog strujanja vjetra odvodi se toplina sa žice i ona se hladi. Pri tome joj se smanjuje otpor, a time i temperatura žice.

Dakle, mjerenjem otpora žice moguće je dobiti i temperaturu žice. Brzina fluida je funkcija temperature žice i fluida.

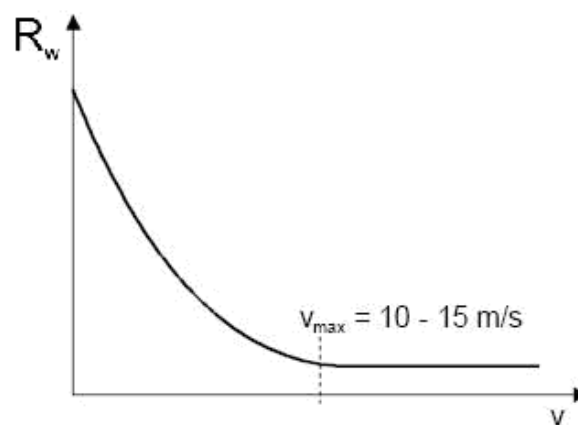
$$a + bv_f^n = \frac{I^2 \cdot R_{ref} [1 + \alpha(T_w - T_{ref})]}{A_w(T_w - T_f)} = g(T_w, T_f) \quad (12)$$

Električni krug za ovaj način rada prikazan je na Slici 12



Slika 12. Anemometri s ugrijanom žicom u način rada s konstantnom strujom

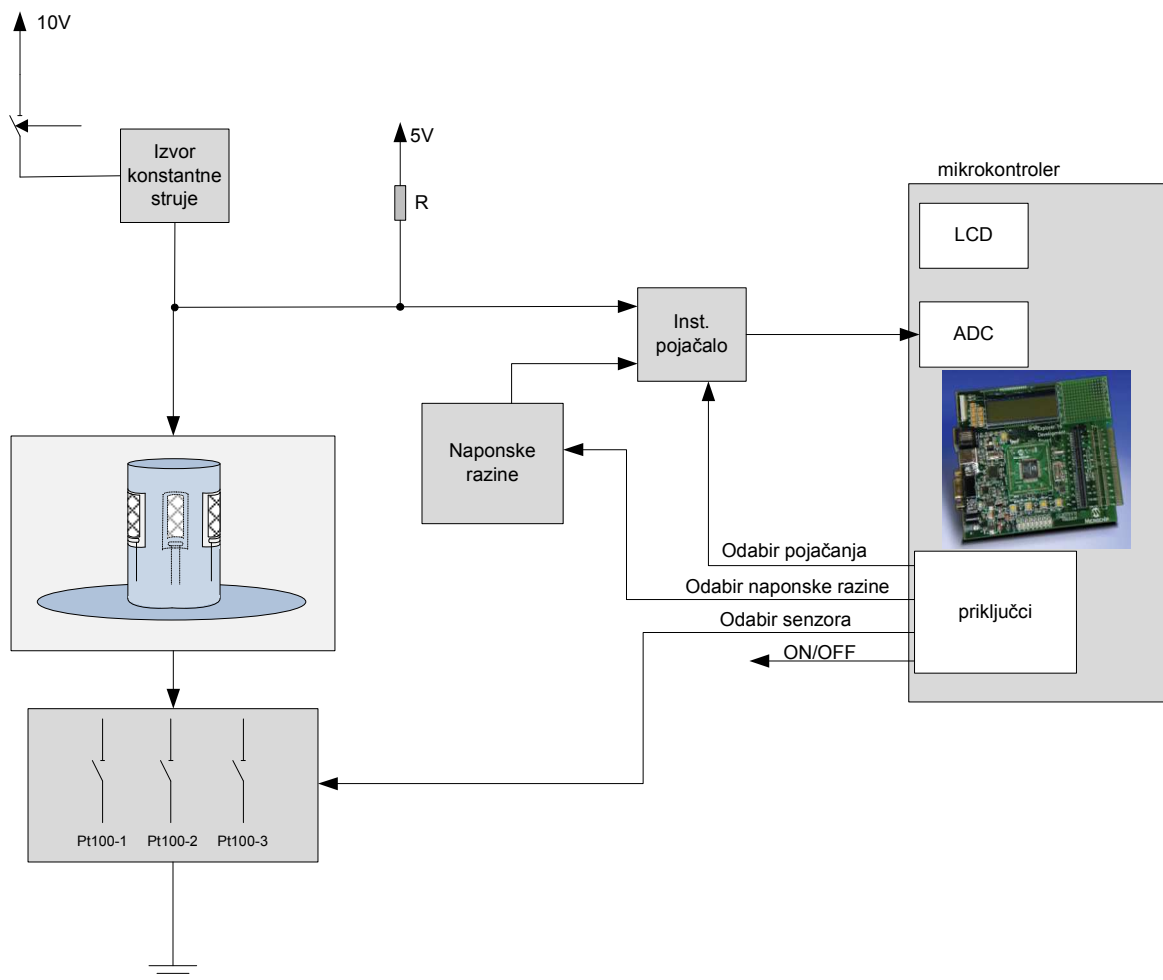
Smanjenjem otpora žice, most postaje neuravnotežen i mijenja se napon na njegovim dijagonalama. Ova vrsta anemometra ima veliku osjetljivost pri malim brzinama koja opada s porastom brzine strujanja (Slika 13). Zbog tog razloga ova se metoda ne može upotrijebiti za mjerenje velikih brzina. Maksimalna brzina strujanja koja se ovom metodom može mjeriti iznosi oko 15 m/s, s rezolucijom od 0,1 m/s i točnošću od $\pm 1\%$.



Slika 13. Promjena otpora ovisno o promjeni brzine

5. UREĐAJ ZA MJERENJE BRZINE I SMJERA VJETRA - ANEMOMETAR S UGRIJANIM OTPORNIM ELEMENTOM U NAČINU RADA S KONSTANTNOM STRUJOM

U sljedećem poglavlju biti će opisana konstrukcija uređaja za mjerenje brzine, smjera vjetra i temperature. Koristi se metoda opisana u prethodnom poglavlju, tj. metoda u kojoj se konstantnom strujom zagrijava otporni element i na kojem se promatra promjena napona ovisno o brzini vjetra. Blok shema uređaja prikazana je na Slici 14.

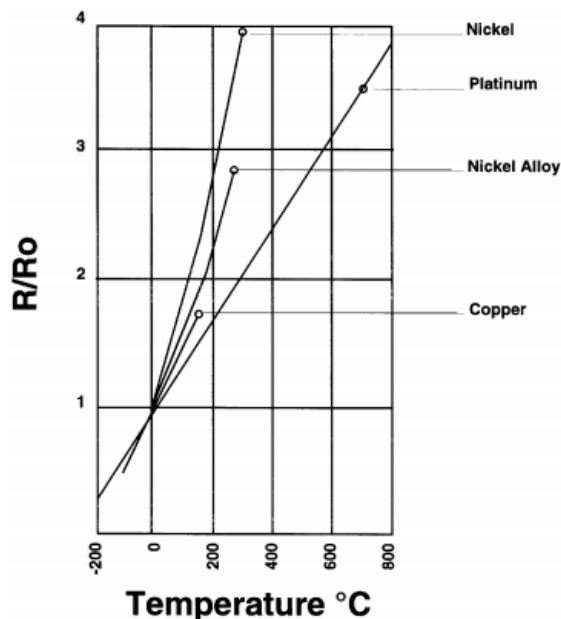


Slika 14. Blok shema sklopa

Kao otporni elementi koriste se Pt100 otpornici koji su izvedeni kao tanki film platine koji se nanosi na keramičku podlogu. U ovom slučaju se koriste tri otpornička elementa kako bi se mogao odrediti smjer vjetra. Oni su smješteni na cilindrično tijelo i to tako da su na jednakim udaljenostima jedan od drugog. Cilindrično tijelo mora biti od materijala koji ima malu toplinsku vodljivost kako bi izmjena topline između otporničkog elementa i cilindričnog tijela bila što manja. Da bi se dobio podatak o brzini i smjeru vjetra potrebno je imati očitavanja sa sva tri otpornička elementa. Uređaj radi tako da najprije izmjeri temperatura okoline pomoću jednog od otporničkih elementa jer je i ona potrebna za proračun. Zatim se uključuje izvor konstantne struje koja grije jedan od tri otpornička elementa. Vrijeme koje je potrebno da se otpornički element zagrije kako bi se mogao očitati pad napona ovisi o aplikaciji. Pod tim se podrazumijeva vrsta otporničkog elementa, materijal cilindričnog tijela, jakost struje koja zagrijava... Pad napona ovisi o odvođenju topline sa žice. Na odvođenje topline utječe brzina i smjer vjetra. Nakon očitavanja pada napona sa prvog otporničkog elementa on se prestaje zagrijevati, a isti postupak se ponovi za ostale. Padovi napona se dovode na jednu od stezaljki instrumentacijskog pojačala. Na drugu stezaljku se dovode različite naponske razine (ovisno mjeri li se brzina vjetra ili temperatura) pomoću kojih se skupa sa promjenjivim pojačanjem instrumentacijskog pojačala signal sa otporničkog elementa prilagođava ulazu u A/D pretvornik. Signali se sa A/D pretvornika obrađuju u mikrokontroleru nakon čega se brzina, smjer vjetra i temperatura prikazuju na LCD pokazniku.

5.1. OSJETILNI ELEMENT

Kao osjetilni element koristi se Pt100 senzor. Pripada skupini otporničkih senzora koje odlikuje visoka točnost. To su temperaturni senzori koji koriste predvidljivu promjenu otpora nekih materijala ovisno o promjeni temperature. Porastom temperature električni otpor materijala raste, a smanjenjem temperature otpor opada. Otporni temperaturni senzori rade se od platine, bakra i nikla. Na Slici 15. prikazana je osjetljivost materijala koji se koriste za izradu temperaturnih otpornih senzora.



Slika 15. Usporedba osjetljivosti materijala (Webster, 1999.)

Nikal ima ograničeno temperaturno područje primjene jer promjena otpora ovisno o temperaturi postaje vrlo nelinearna na temperaturama većim od 300°C. Bakar ima vrlo linearnu otporno-temperaturnu karakteristiku, ali oksidira na određenim temperaturama i ne može se koristiti iznad 150°C. Platina ima najstabilniju otporno-temperaturnu vezu na najširem temperaturnom području (-180°C – 640°C). Nije najosjetljiviji materijal, ali ju odlikuje odlična stabilnost. Zbog toga je platina najbolji izbor za ovu vrstu senzora.

Tablica 1. Usporedba pojedinih materijala za izradu otporničkih senzora

MATERIJAL	TEMPERATURNO PODRUČJE	TEMP. KOEFICIJENT α [$\Omega/\Omega^\circ\text{C}$]	OTPOR PRI 0°C R_0 [Ω]
PLATINA (Pt)	-200 do +850 °C	0.00385	25, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000
NIKAL (Ni)	-80 do +320 °C	0.00672	50, 100, 120
BAKAR (Cu)	-200 do +260 °C	0.00427	10 Ω pri 20°C

Promjena otpora se najčešće prikazuje pojednostavljenim linearnim modelom, dok se nelinearnost prikazuje tablično.

$$R(T) = R_{ref} [1 + \alpha(T - T_{ref})] \quad (13)$$

$R_{ref} = 100\Omega$, otpor pri 0°C ,

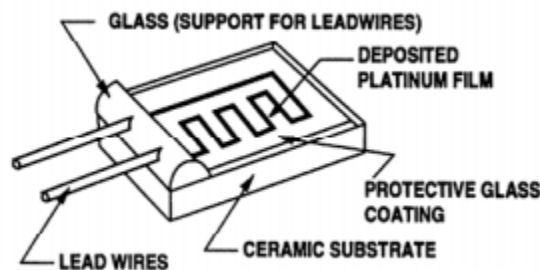
$$\alpha = \frac{R_{100} - R_{ref}}{100^{\circ}\text{C} \cdot R_{ref}} \left[\frac{\Omega}{\Omega^{\circ}\text{C}} \right], \text{ temperaturni koeficijent}$$

Svi otpornički elementi imaju pozitivni temperaturni koeficijent. Neke norme određuju vrijednost otpora Pt100 otporničkog elementa:

IEC 751 definira dvije klase industrijskih Pt otporničkih elemenata:

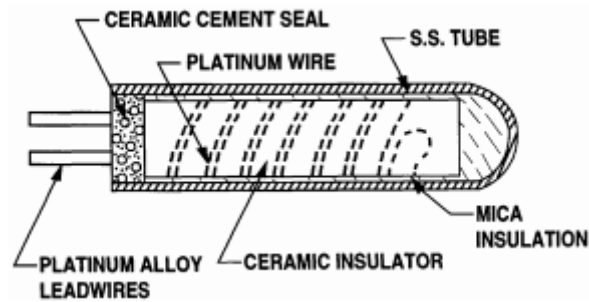
- Klasa A: -200°C do 650°C , tolerancija pri 0°C iznosi $\pm 0,15\Omega$,
- Klasa B: -20°C do 850°C , tolerancija pri 0°C iznosi $\pm 0,30\Omega$.

Postoji nekoliko izvedbi otporničkih elemenata od platine koji se koriste. Jedna od njih je nanošenje vrlo tankog filma (manje od $1,6\mu\text{m}$) platine na keramičku podlogu. Zatim se sloj platine prekriva staklom kako bi se platina zaštitila od vlage i prljavštine. Najčešće korišten otpornički element s tankim filmom je Pt100. Ovi elementi mogu biti izrazito trajni ako su žičani izvodi i sam tanki film dobro zaštićeni. Prednosti ove izvedbe su relativno niska cijena i brz odziv.



Slika 16. Pt100 senzori s tankim filmom (Webster, 1999.)

Osim tankog filma, platina se može namatati kao žica na cilindričnu keramičku podlogu. Da bi se izradio otpornik iznosa 100Ω , a da se ne potroši previše platine (skupoća platine) koristi se vrlo tanka žica debljine $7-50\mu\text{m}$. Ova izvedba ima visoku točnost posebno na velikom području temperatura.



Slika 17. Pt100 senzori s namotanom žicom (Webster, 1999.)

5.1.1. Mjerenje temeprature

Da bi se mogla izmjeriti temperatura potrebno je da struja prolazi kroz otpornički element i na taj način stvara naponski signal koji je ovisan o otporu otporničkog elementa. Detekcijom naponskog signala i uz poznatu struju lako se izračuna otpor, a iz njega odredi temperatura. Zbog prolaska struje dolazi do povišenja temperature samog otporničkog elementa i stvara se Jouleova toplina. Zbog ovog efekta temperatura koja se detektira senzorom veća je nego što je zapravo stvarna temperatura. Kaže se da je nastala pogreška u mjerenju zbog samozagrijavanja (Webster, 1999.). Pogreške uslijed samozagrijavanja ovise o aplikaciji u kojoj se nalaze otpornički senzori, a mogu se kretati od zanemarivih do pogrešaka do 1°C. Veće pogreške uslijed zagrijavanja javljaju se zbog slabog prijenosa topline sa senzorskog elementa u okolinu u kojoj se nalazi ili pretjerane struje koja se koristi za mjerenje otpora. Koeficijent samozagrijavanja K navodi se za zrak ili za vodu. Tipično iznosi 4mW/°C. Radi smanjenja problema samozagrijavanja standardni otpornici imaju otpor 0,25, 2,5 ili 25 Ω. Da bi pogreške uslijed samozagrijavanja bile što manje općenito vrijedi:

- Smanjiti disipaciju energije na senzoru. Veća struja će dati veći naponski signal, ali će i povećati samozagrijavanje. Tipično se za mjerenje koriste struje do 1mA
 - Koristiti senzor sa malim toplinskim otporom. Što je manji toplinski otpor senzora to on bolje disipira I^2R snagu i manje raste temperatura senzora.
- Senzori s malim temperaturnim koeficijentom imaju malu vremensku konstantu.

- Maksimizirati termički kontakt između senzora i okoline

U ovom uređaju postavljaju se različiti uvjeti za otpornički element ovisno o tome da li se mjeri temperatura ili brzina vjetra. Kao što je već navedeno dobar termički kontakt smanjuje samozagrijavanje, ali utječe na mjerenje brzine vjetra jer se otpornički element hladi preko valjkastog tijela. U ovom uređaju se koristi otpornički Pt100 element tvrtke *Labfacility* koji je izveden kao tanki film platine na keramičkoj podlozi. Nakon što se isključi izvor konstantne struje, poteče struja od $\sim 0,5\text{mA}$ iz izvora napona 5V preko otpornika R i otporničkog elementa.

5.1.2. Prednosti i nedostaci Pt100 senzora

Termoparovi su jeftini i imaju brzi odziv, ali su manje točni, manje stabilni i osjetljivi od ostalih vrsta senzora. Termopar mjeri samo relativnu temperaturnu razliku dok otpornički senzori i termistori očitavaju apsolutnu temperaturu. Termistori imaju brzi odziv i relativno su jeftini, ali su lomljivi i imaju ograničen temperaturni opseg. Također zahtijevaju strujni izvor i zbog toga imaju problem samozagrijavanja koje je veće nego kod otporničkih senzora. Još jedna od karakteristika termistora je nelinearnost. Otpornički senzori najbolji su izbor za ponovljiva mjerenja. Najstabilniji su i najtočniji. U usporedbi s termistorima imaju sporiji odziv i manju osjetljivost. Također, kao i termistori, imaju pogreške uslijed samozagrijavanja. Prednosti i nedostaci pojedinih vrsta senzora prikazani su i u tablici 2.

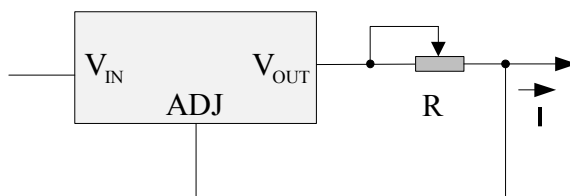
Tablica 2 Usporedba različitih vrsta senzora (National Instruments)

Criteria	Thermocouple	RTD	Thermistor
Temp Range	-267°C to 2316°C	-240°C to 649°C	-100°C to 500°C
Accuracy	Good	Best	Good
Linearity	Better	Best	Good
Sensitivity	Good	Better	Best
Cost	Best	Good	Better

5.2. IZVOR KONSTANTNE STRUJE

Kao izvor konstantne struje koristi se LM317. To je pozitivni naponski regulator koji na svom izlazu može dati struje do 1,5A i napone od 1,2V do 37V. LM317 između pinova V_{OUT} i ADJ održava referentni napon V_{REF} od 1,25V. Referentni napon se nalazi na otporniku R pa vrijedi da je uz neku vrijednost otpornika R i struja I konstantna (National Semiconductor, 2010.)(Slika 18.)

$$I = \frac{V_{REF}}{R} \quad (14)$$



Slika 18. LM317 kao izvor konstantne struje

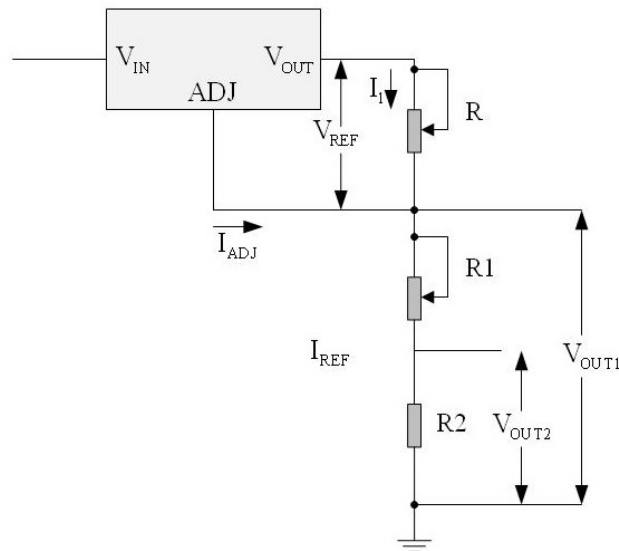
U ovom uređaju se za grijanje otporničkog elementa koristi konstantna struja od 38mA. Eksperimentalno je utvrđeno da je ta struja dovoljna da se postigne odgovarajuća osjetljivost i brzina odziva otporničkog elementa, a da se pri tom smanji potrošnja uslijed zagrijavanja. Iz relacije 14 slijedi da otpornik R ima vrijednost 33Ω .

5.3. NAPONSKE RAZINE

LM317 se koristi kao zamjena za fiksne naponske regulator. Jednostavan je za upotrebu jer se dodavanjem vanjskih otpornika lako određuje izlazni napon. Ovisno o tome da li se mjeri brzina vjetra ili temperatura koriste se različite naponske razine koje se dovode na negativnu stezaljku instrumentacijskog pojačala. Tako je pri mjerenju brzine vjetra pad napona na otporničkom elementu veći od ulaznog napona na A/D pretvorniku

te se zbog toga mora prilagoditi za spajanje na A/D pretvornik. Ako se želi mjeriti temperatura u granicama od 0°C do 50°C promjena napona zbog protjecanja struje od 0,5mA kreće se od 50mV do 60mV. Zbog toga se na negativnu stezaljku instrumentacijskog pojačala dovodi naponska razina od 50mV. Nakon oduzimanja napona na pozitivnoj i negativnoj stezaljki instrumentacijskog pojačala i pojačanja napon na ulazu A/D pretvornika će ispunjavati znatno veći opseg nego u slučaju da nema naponske razine na negativnoj stezaljki.

Kao što je već objašnjeno u prethodnom poglavlju na otporniku R je konstantna struja. Zbog toga je i na otpornicima R_1 i R_2 također konstantna struja I_1 koja daje na izlazu potrebne naponske razine.



Slika 19. LM317 u spoju kao naponski regulator

Najprije se odredi naponska razina V_{OUT2} odabirom struje I_1 koja će na otporniku R_2 stvoriti odgovarajući pad napona

$$V_{OUT2} = I_1 \cdot R_2 \quad (15)$$

Naponska razina V_{OUT1} namješta se pomoću promijenjivog otpornika R_1 te će vrijediti

$$V_{OUT1} = V_{OUT2} + I_1 \cdot R_1 \quad (16)$$

5.4. INSTRUMENTACIJSKO POJAČALO

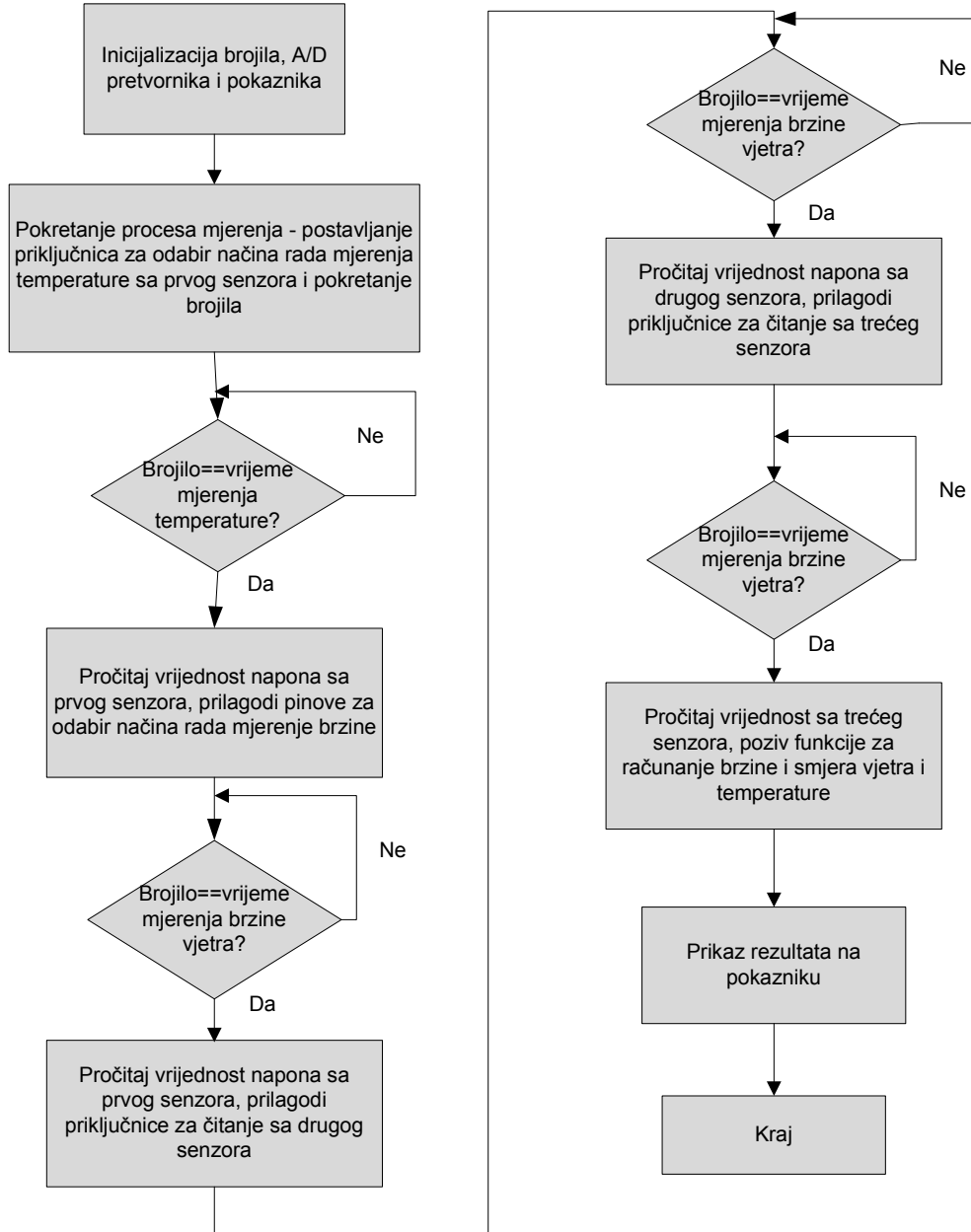
Kao što je već objašnjeno pad napona s otporničkog elementa dovodi se na pozitivnu stezaljku instrumenacijskog pojačala AD623 (Analog Devices, 2008.) dok se na negativnu stezaljku dovodi jedna od naponskih razina s naponskog regulatora. Instrumentacijska pojačala AD623 imaju malenu potrošnju pa se koriste za uređaje napajane baterijom. Izlazna dinamika pokriva skoro čitav raspon napona napajanja, a moguće ih je napajati i bipolarno i unipolarno. Ovisno o tome da li se mjeri temperatura ili brzina vjetrova ovom uređaju implementirana je mogućnost promjene pojačanja instrumenacijskog pojačala. Ako se mjeri brzina vjetrova instrumenacijsko pojačalo ima jedinično pojačanje (stezaljke 1 i 8 su odspojene), a ukoliko se mjeri temperatura zraka onda se odredi pojačanje da se ispuni cijeli ulazni opseg A/D pretvornika. Pojačanje se određuje prema:

$$G = \frac{100k}{R_G} - 1 \quad (13)$$

5.5. MIKROKONTROLER

Upravljanje radom uređaja, digitalizacija signala, obrada podataka, te ispis rezultata brzine, smjera vjetrova i temperature realizira se pomoću *dsPIC33FJ256GP710* mikrokontrolera (Microchip), Explorer16 razvojne pločice i *MP Lab* razvojnog okruženja tvrtke *Microchip*. U sklopu ovog rada koristi se 10-bitni A/D modul, ulazno-izlazni priključci kojima se upravlja radom uređaja, 16-bitno brojilo kojim se upravlja vremenom zagrijavanja pojedinog otporničkog elementa i LCD pokaznik za prikaz rezultata.

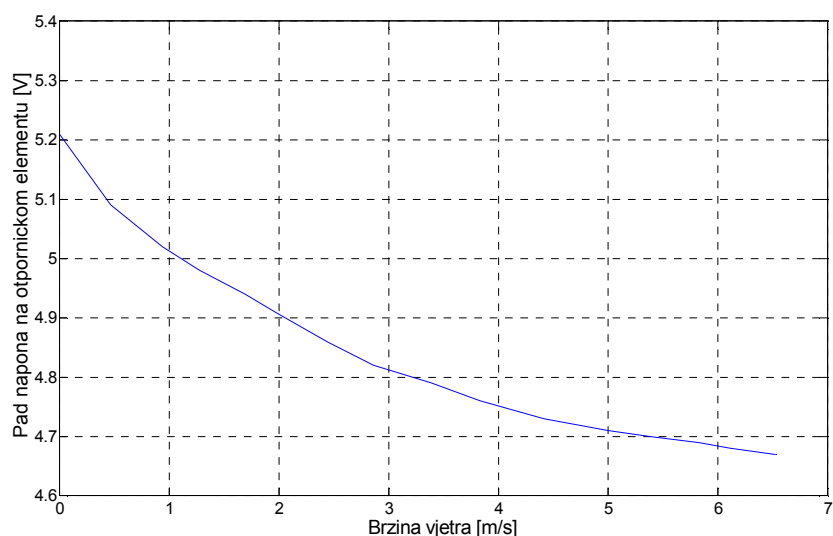
5.5.1. Dijagram toka



Slika 20. Dijagram toka

6. UMJERAVANJE SENZORA

Postupak umjeravanja radi se tako da se koristi referentni izvor vjetra koji se usmjeri da puše na otpornički element. Tada se očitavaju vrijednosti pada napona na otporničkim elementima za različite brzine vjetra i pomoću njih se izračunaju koeficijenti a , b i n koji ovise o obliku otporničkog elementa. Kao što je već opisano u poglavlju 4.2. koeficijenti su potrebni za određivanje brzine vjetra. Za potrebe ovog rada napravljen je improvizirani „zračni tunel“ u kojem se strujanje zraka postiže okretanjem lopatica ventilatora. Na ventilator se dovodi vanjski napon čijom se promjenom postižu različite brzine strujanja zraka. Na jednom kraju tunela postavljen je džepni DVM 9500 anemometar tvrtke *La Crosse Technology* koji mjeri stvarnu brzinu vjetra u tunelu. Na drugom kraju postavljen je otpornički element koji se zagrijava konstantnom strujom od 38,2mA i kojemu se mijenja pad napona ovisno o brzini vjetra u zračnom tunelu. Na Slici 21. je prikazana promjena napona na otporničkom elementu ovisna o brzini vjetra u zračnom tunelu. Otpornički element je prilijepljen na cilindar i namješten tako da je strujanje zraka okomito na njega. Osjetljivost se nelinearno mijenja ovisno o brzini vjetra. Tako je pri brzinama do 1m/s prosječna osjetljivost $56 \frac{mV}{m/s}$, a na vrijednosti iznad 6m/s se smanji do $8,33 \frac{mV}{m/s}$.



Slika 21. Pad napona na otporničkom elementu ovisno o brzini vjetra

Nakon toga se izračunaju vrijednosti koeficijenta prijenosa topline žice h prema formuli 17.

$$h = \frac{I^2 R_{ref} [1 + \alpha(T_w - T_{ref})]}{A_w(T_w - T_f)} \quad (17)$$

Izračunate vrijednosti prikazane su u tablici 3.

Tablica 3. Koeficijent prijenosa topline žice h

V (m/s)	h (W/m ² K)
0	181,82
0,472	201,97
0,944	216,57
1,277	226,03
1,694	236,55
1,972	245,19
2,444	261,42
2,861	276,49
3,388	288,73
3,833	302,49
4,416	318,16
5	329,19
5,388	335,31
5,833	341,62
6,111	348,02
6,527	354,91

Za računanje koeficijenta koristi se relacija

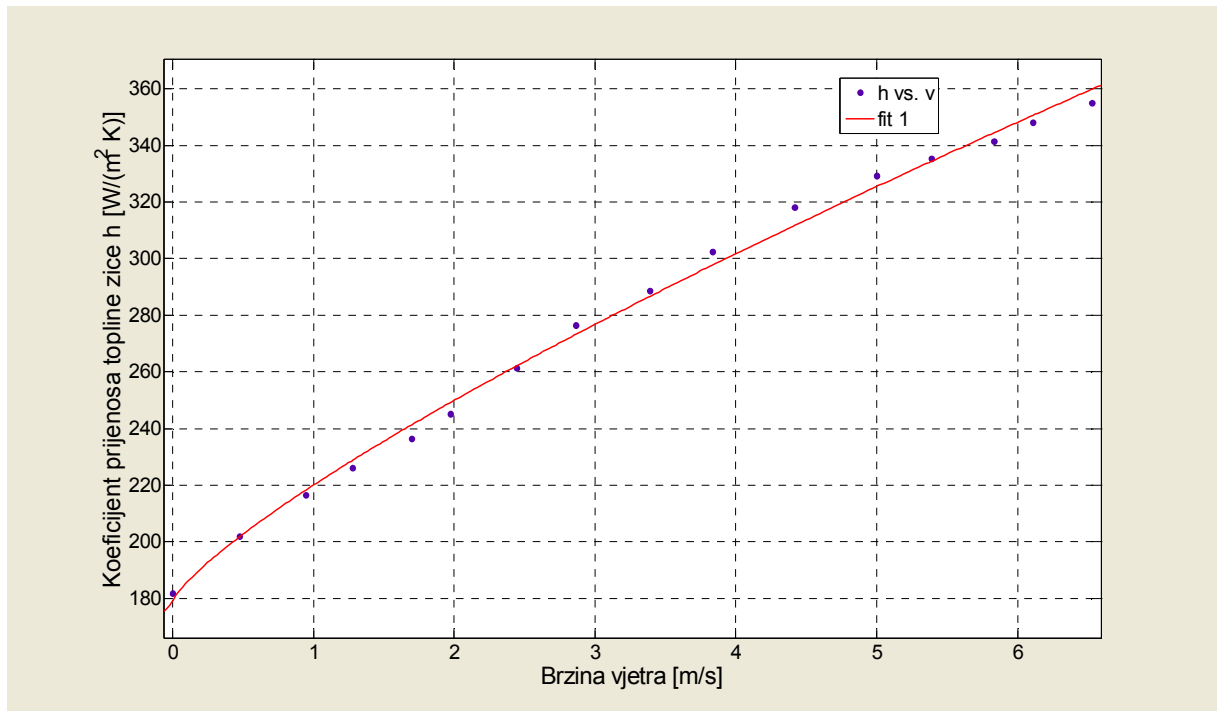
$$h = a + bv_f^n \quad (18)$$

Kako bi se odredili koeficijenti a , b i n koristi se *Matlab* u kojem se pokreće alat *cftool*.

Dobivene vrijednosti koeficijenta su:

a	179
b	41
n	0,7909

Grafička ovisnost koeficijenta prijenosa topline žice h ovisno o brzini vjetra izgleda kao na slici 22.



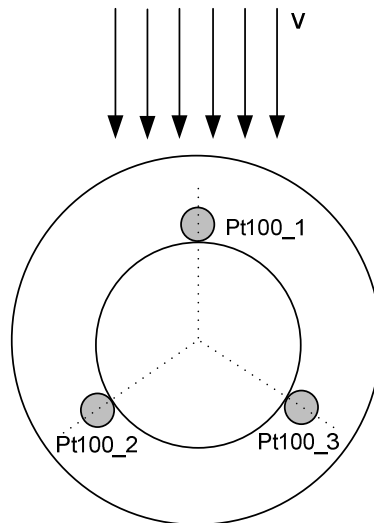
Slika 22. Ovisnosti koeficijenta prijenosa topline žice h o brzini vjetra

7. REZULTATI MJERENJA

7.1. ODREĐIVANJE SMJERA VJETRA

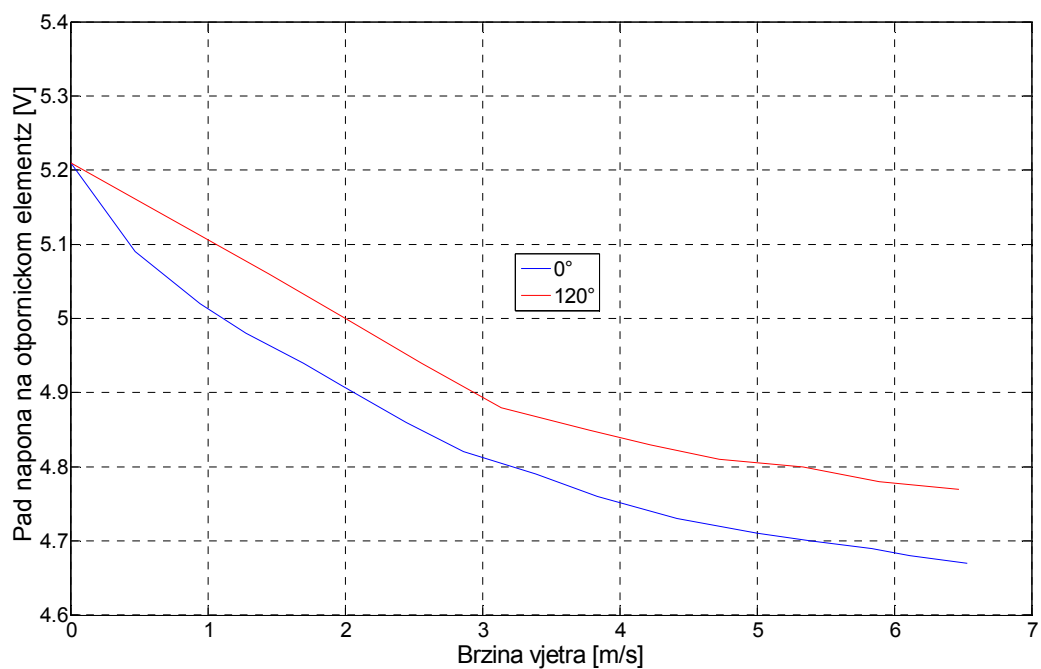
Za određivanje smjera vjetra koriste se tri identična Pt100 elementa koji su postavljeni na poznate kutove na cilindrično tijelo polumjera 20mm. Ako se odredi da je Pt100_1 referentan i da je njegov kut 0° onda se Pt100_2 nalazi na kutu od 120° , a Pt100_3 na 270° . Ovakav dizajn je vrlo jednostavan i robustan budući da nema nikakvih pomičnih dijelova. Osnovna ideja je da će ovisno o kutu vjetra na cilindrično tijelo

otpornički elementi imati različite padove napona. U slučaju da vjetar puše okomito na otpornički element Pt100_1 (smjer vjetra je 0°), kao što je prikazano na Slici 23, on će se najviše hladiti i na njemu će biti najmanji pad napona.



Slika 23. Vjetar puše okomito na Pt100_1 otpornički element

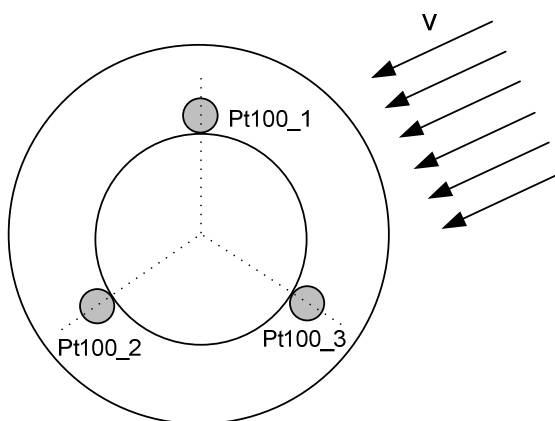
Ostala dva otpornička elementa hladiti će manja struja zraka, te će zbog toga njihov otpor biti veći, a time i pad napona. Budući da su na jednakom razmaku od Pt100_1 otporničkog elementa na njima će biti jednak pad napona.



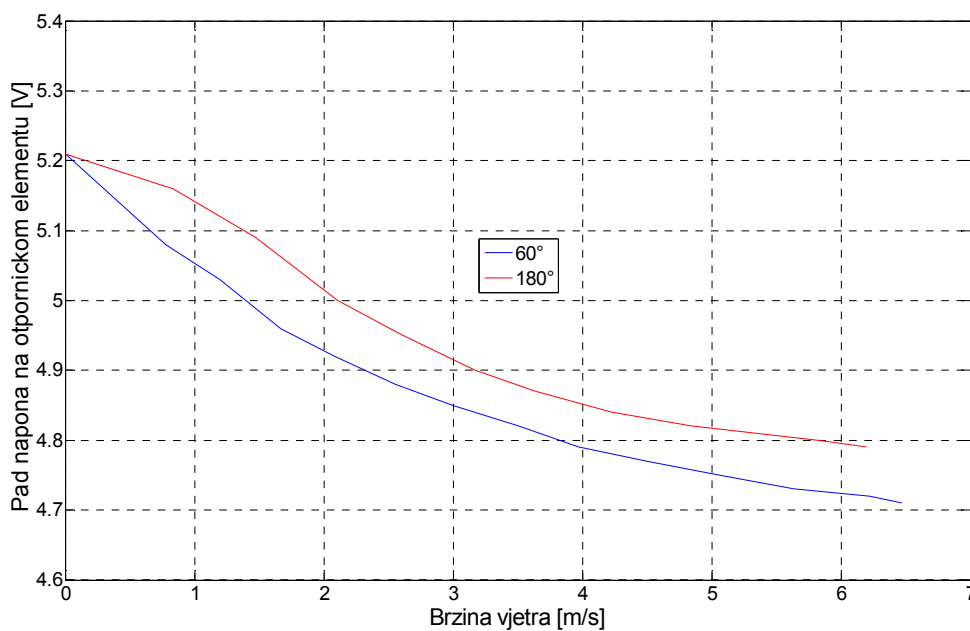
Slika 24. Pad napona na otpornickim elementima kada vjetar puše okomito na Pt100_1

Na slici 24. je prikazana promjena pada napona na otporničkom elementu Pt100_1 na kojeg vjetar puše okomito (plava linija) te promjena pada napona za Pt100_2 i Pt100_3 (crvena linija).

Za slučaj kao što je prikazan na Slici 25. vjetar puše između dva senzora Pt100_1 i Pt100_3 (smjer vjetra je 60°) i jednoliko ih hladi jer je strujanje zraka jednako na njima. Pad napona će biti jednak dok će na trećem otporničkom elementu (Pt100_2) biti najveći jer će njega hladiti najmanja struja zraka.

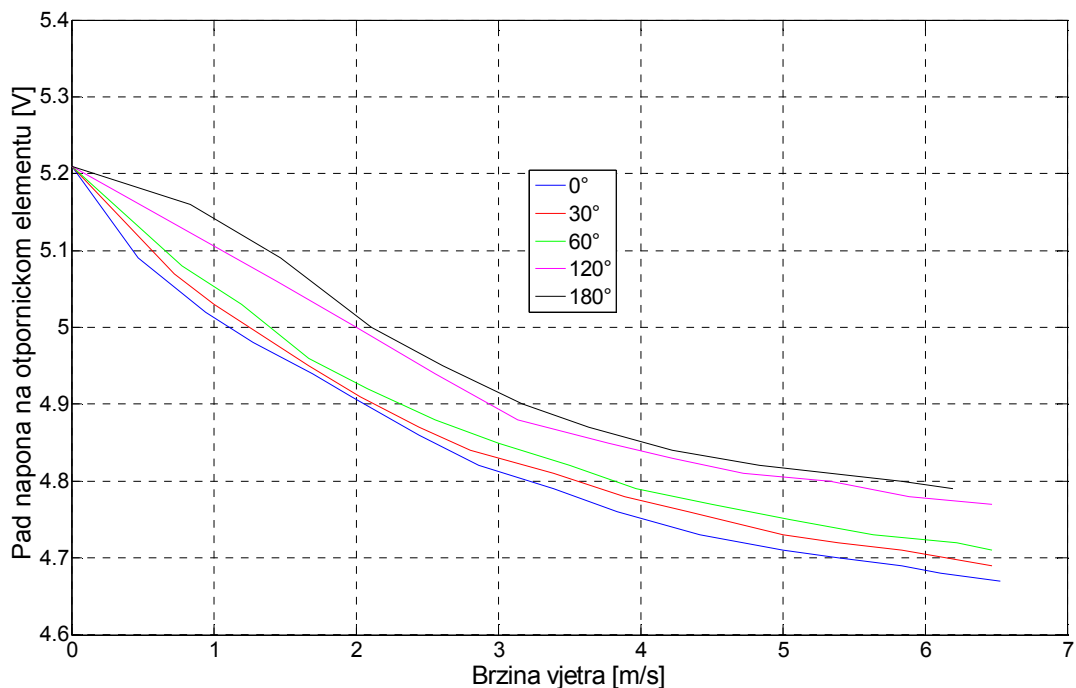


Slika 25. Vjetar puše između dva otpornička elementa



Slika 26. Pad napona kada vjetar puše između Pt100_1 i Pt100_3

Promjena pada napona na otporničkim elementima Pt100_1 i Pt100_3 prikazana je na slici 26. crvenom linijom, dok je na istoj slici promjena napona na Pt100_2 prikazana plavom linijom. Na slici 27. je prikazano kako se mijenja napon na Pt100_1 ovisno o smjeru vjetra.



Slika 27. Pad napona na otporničkom elementu ovisno o smjeru vjetra

7.2. UTJECAJ MATERIJALA CILINDRA

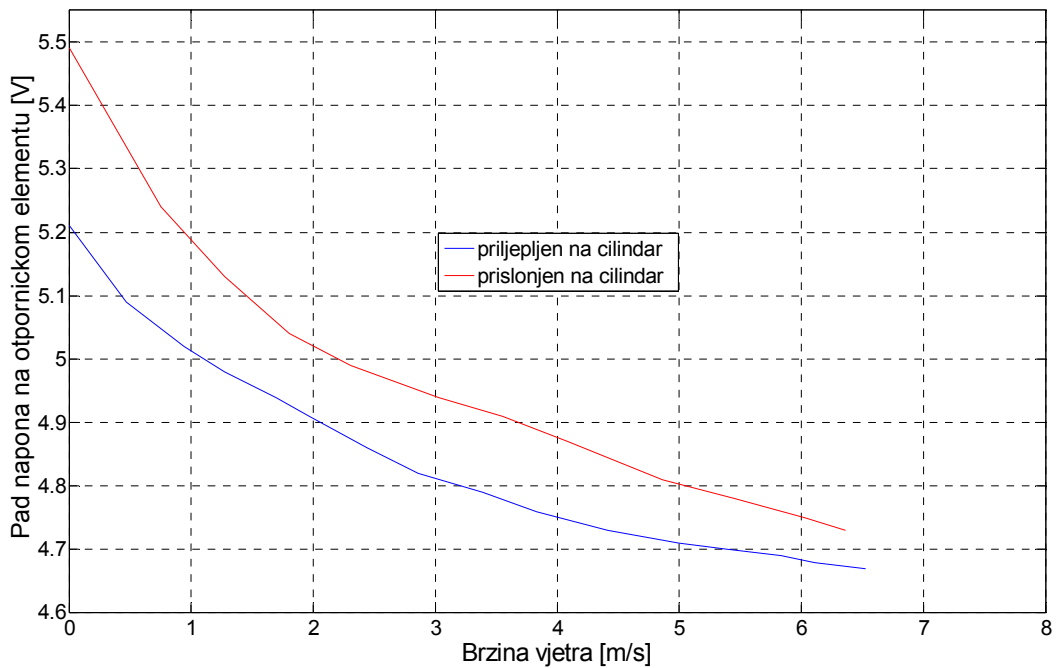
Toplinska vodljivost je veličina za toplinsko djelovanje materijala izražena u $W/(m \cdot K)$. Pokazuje količinu topline koja se vodi unutar jednog sata preko jednog kvadratnog metra sloja materijala debljine od 1 metra, pri temperaturnoj razlici od jednog Kelvina (odgovara $1^{\circ}C$). Što je toplinska vodljivost manja to je izolacijsko djelovanje veće, tj. minimizira se odvođenje topline sa otporničkog elementa uslijed kondukcije pa mjerenje ovisi samo o toplini koja se odvodi zbog utjecaja vjetra. Budući da se otpornički elementi moraju zagrijati iznad temperature okoline dolazi do prijelaza topline na cilindrično tijelo zbog čega dolazi do njegovog hlađenja. Zbog toga cilindar na koji se lijepe otpornički

elementi mora imati što manju toplinska vodljivost. U tablici 4. navedene su toplinske vodljivosti za neke od materijala. Za ovaj se uređaj kao materijal za cilindar koristi plastika.

Tablica 4. Toplinska vodljivost nekih materijala

Materijal	Toplinska vodljivost (W/mK) pri 25°C
Aluminij	237
Nehrđajući čelik	16
Staklo	1,05
Gips	0,48
Plastika	0,17
Drvo	0,12
Pluto	0,07
Zrak	0,024

Na slici 28. Je prikazana promjena pada napona ovisno o promjeni brzine vjetra za dva slučaja.

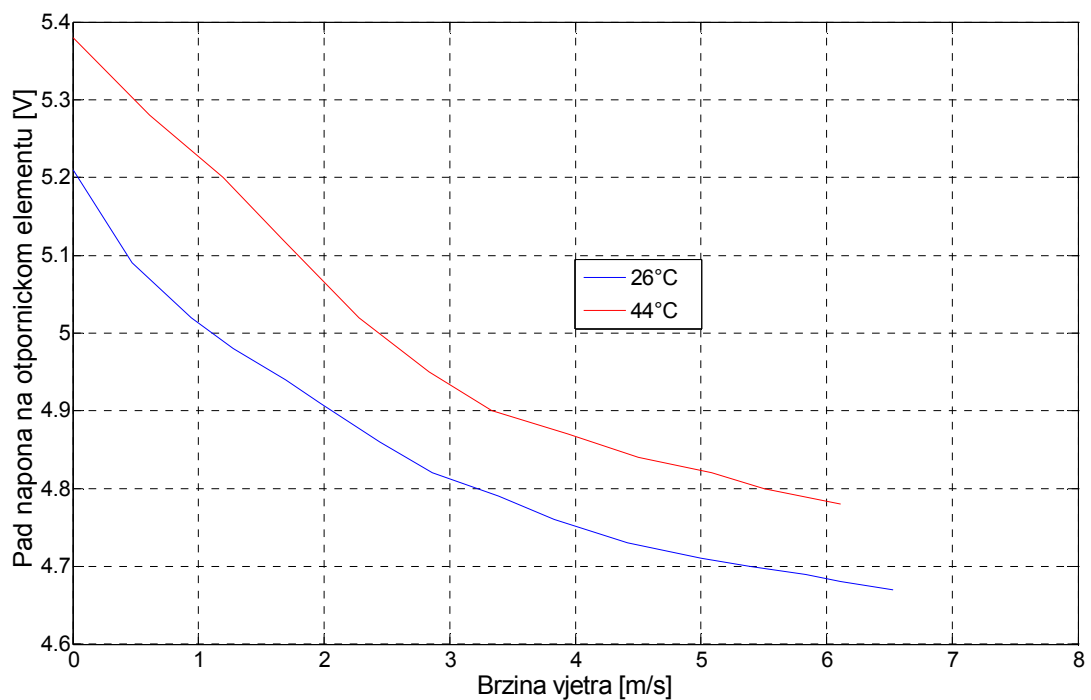


Slika 28. Pad napona ovisno o načinu pričvršćivanja na cilindar

U prvom slučaju je otpornički element prilijepljen za cilindar (plava linija) i time je ostvaren maksimalan termički kontakt između ova dva elementa. U drugom slučaju otpornički element je samo prislonjen, nema dobrog kontakta nego je na nekim mjestima između ova dva elementa zrak. Sa slike se vidi da je u prvom slučaju manji pad napona nego u drugom. Budući da plastika ima bolju toplinsku vodljivost od zraka otpornički element u prvom slučaju se više hladi, bolje se prenosi toplina na cilindar te se on manje zagrije (manji mu je otpor). U drugom slučaju nema dobrog prijanjanja između ova dva elementa pa se zbog toga on manje hladi, ima veći otpor, a time je i pad napona na njemu veći. Time je pokazan utjecaj materijala cilindra na mjerenje.

7.3. UTJECAJ PROMJENE TEMPERATURE OKOLINE

Promjena temperature okoline utječe na promjenu pada napona na otporničkom elementu (slika 29.).

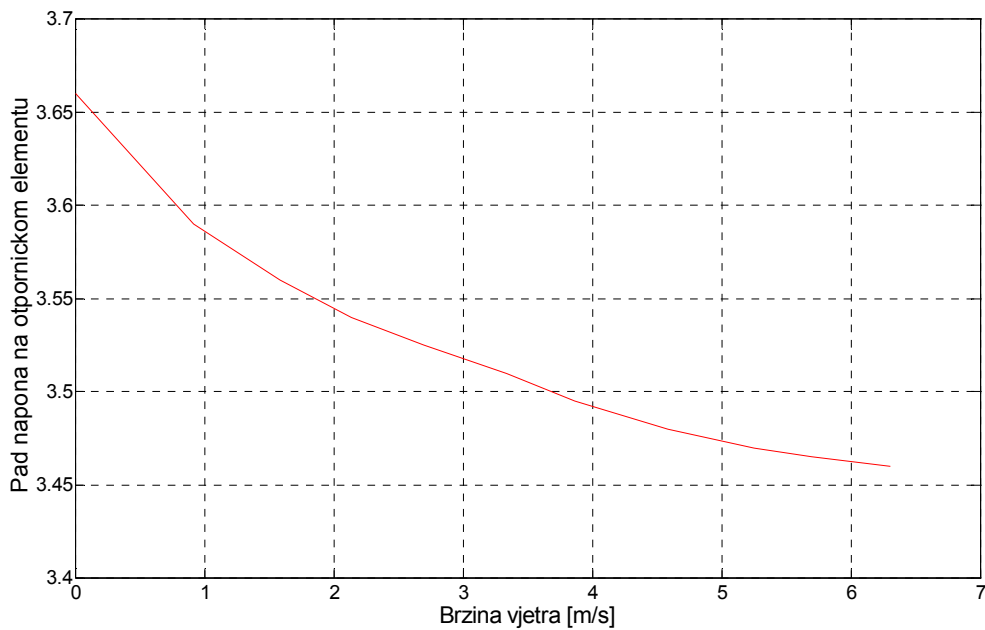


Slika 29. Promjena pada napona ovisno o temperaturi okoline

S porastom temperatura okoline raste i otpor na otporničkog elementa, pa zbog toga raste i pad napona. Treba voditi pažnju da otpor ne poraste preko neke vrijednosti tako da disipacija snage na njemu bude izvan njegovih granica.

7.4. ODZIV OTPORNIČKOG ELEMENTA PRI MANJOJ STRUJI

Na slici je prikazana promjena pada napona na otporničkom elementu kada se za zagrijavanje koristi struja od 29,3mA. Osjetljivost za brzine vjetra do 1m/s je $21,2 \frac{mV}{m/s}$, a na brzinama vjetra oko 6m/s iznosi $2,3 \frac{mV}{m/s}$.



Slika 30. Pad napona na otporničkom elementu kada ga zagrijava struja od 29.3mA

8. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu pokušalo se ukazati na važnost meteoroloških stanica za mjerenja u ekologiji i poljoprivredi. U drugom poglavlju opisani su uobičajeno korišteni senzori u meteorološkim stanicama: senzori temperature, vlage zraka, tlaka zraka, svjetlosti i padalina. U trećem poglavlju su prikazane metode mjerenje brzine i smjera vjetra. Najviše pažnje je posvećeno anemometrima s ugrijanom žicom jer se za predloženu konstrukciju uređaja koja je opisana u petom poglavlju koristi upravo ta metoda.

U nastavku je opisan uređaj za mjerenje brzine i smjera vjetra koji koristi ugrijani otporni element u načinu rada s konstantnom strujom. Uređaj najprije izmjeri temperaturu okoline koja je potrebna za izračun brzine vjetra. Zatim se naizmjenice zagrijavaju tri otpornička elementa konstantnom strujom i očitavaju se vrijednosti padova na svakom od njih. Brzinu i smjer vjetra ovisni o očitavanjima sa svakog od ta tri otpornička elementa. Uređajom se upravlja pomoću priključaka na mikrokontroleru, a padovi napona sa otporničkih elemenata se očitavaju A/D pretvornikom.

Opisan je način umjeravanja uređaja pomoću referentnog izvora vjetra. Nadalje je prikazano kako smjer vjetra na otpornički element utječe na odvođenje topline sa njega. Također je opisan utjecaj materijala cilindra na koji se lijepe otpornički elementi na mjerenje. Da bi mjerenje bilo što točnije na temperaturu otporničkih elementa mora utjecati samo vjetar, a ne i prijelaz topline sa otporničkih elemenata na cilindar. To će se postići što boljim odabirom materijala cilindra, tj. odabirom materijala koji imaju najmanju toplinsku vodljivost.

Otpornički elementi se zagrijavaju strujom od 38 mA i to najviše utječe na potrošnju uređaja.

$$P_R = I_{OUT}^2 * (R_{pt100} + R) = 0.245W.$$

Manja struja zagrijavanja znači i manja promjena napona ovisno o promjeni brzine vjetra pogotovo što više brzina vjetra raste. Zbog toga bi ovaj signal trebalo pojačavati. Osim toga, manja struja znači i dulje vrijeme odziva pa bi u tom razdoblju uređaj također trošio

snagu. Na vrijeme odziva, a time i na potrošnju se može utjecati odabirom nekog drugog načina za izvor konstantne struje. U ovom uređaju se kao izvor konstantne struje koristi LM317 koji crpi dosta energije.

$$\begin{aligned} P_{VR} &= (V_{IN} - V_{OUT})I_{OUT} = (V_{IN} - I_{OUT}R_{pt100} - V_{REF})I_{OUT} = \\ &= (9V - 6.4V)*38mA=0.1W \end{aligned}$$

Također na vrijeme odziva utječe i materijal cilindra. Što je veća toplinska vodljivost to se otpornički element više hladi i sporije dolazi u stanje ravnoteže.

U slučaju da ne puše vjetar, a pokrene se mjerenje na jednom otporničkom elementu vrijeme koje je potrebno da on dođe u stanje ravnoteže, dakle kada će na njemu biti maksimalan pad napona je 70s.

9. LITERATURA

- [1] J.G. Webster, *Measurement, instrumentation and sensor Handbook*, CRC press, 1999.
- [2] J.Fraden, *Handbook of modern sensor*, New York: Springer, 2004.
- [3] H.H. Bruun, *Hot-Wire Anemometry: Principles and Signal Analysis*, Oxford University press, 1995.
- [4] C.G.Lomas, *Fundamentals of Hot Wire Anemometry*, Cambridge University press, 1986.
- [5] *Thermal conductivity of some common materials*, 20.4.2010.
http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html
- [6] K. Martinez, R. Ong, J. K. Hart, and J. Stefanov, *GLAC-SWEB: A Sensor Web for Glaciers* Berlin, Germany, 2004.
- [7] Glacsweb,
<http://envisense.org/glacsweb/tech.html>, 20.3.2010.
- [8] Maslinet, *Konferencija za medije, Petrčane, 21. listopada 2008*.
<http://www.maslinet.com/main.html>
- [9] *Naputak za opažanja i mjerenja na glavnim meteorološkim postajama*, Državni hidrometeorološki zavod, 2008. Zagreb.
- [10] WeatherShack, *Tipping bucket rain gauge; The most common type of automated rain sensor*, 20.4.2010.
<http://www.weathershack.com/education/tipping-bucket-rain-gauge.html>
- [11] F. Durst, A. Melling, J. Whitelaw, *Principles and Practices of Laser-Doppler Anemometry*, 1981.
- [12] Laser-Doppler Anemometry,
<http://www.tut.fi/units/me/ener/laitteistot/EFD/LDA.html>, 22.4.2010.
- [13] National Instruments, *Temperature Measurement Comparison*,
<http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/C50FA55B3B2F85D9862572D00083350E>, 10.5.2010.
- [14] National Semiconductor, 1.3.2010., *LM117/LM317A/LM317 3-Terminal Adjustable Regulator*, 20.3.2010.
<http://www.national.com/ds/LM/LM117.pdf>

[15] Analog Devices, 2008., *AD623: Single Supply, Rail-Rail, Low Cost Instrumentation Amplifier*, 15.4.2010.

http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD623.pdf

[16] Microchip, 2009, *dsPic33fj256gp710*, 20.4.2010.

<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en024679>

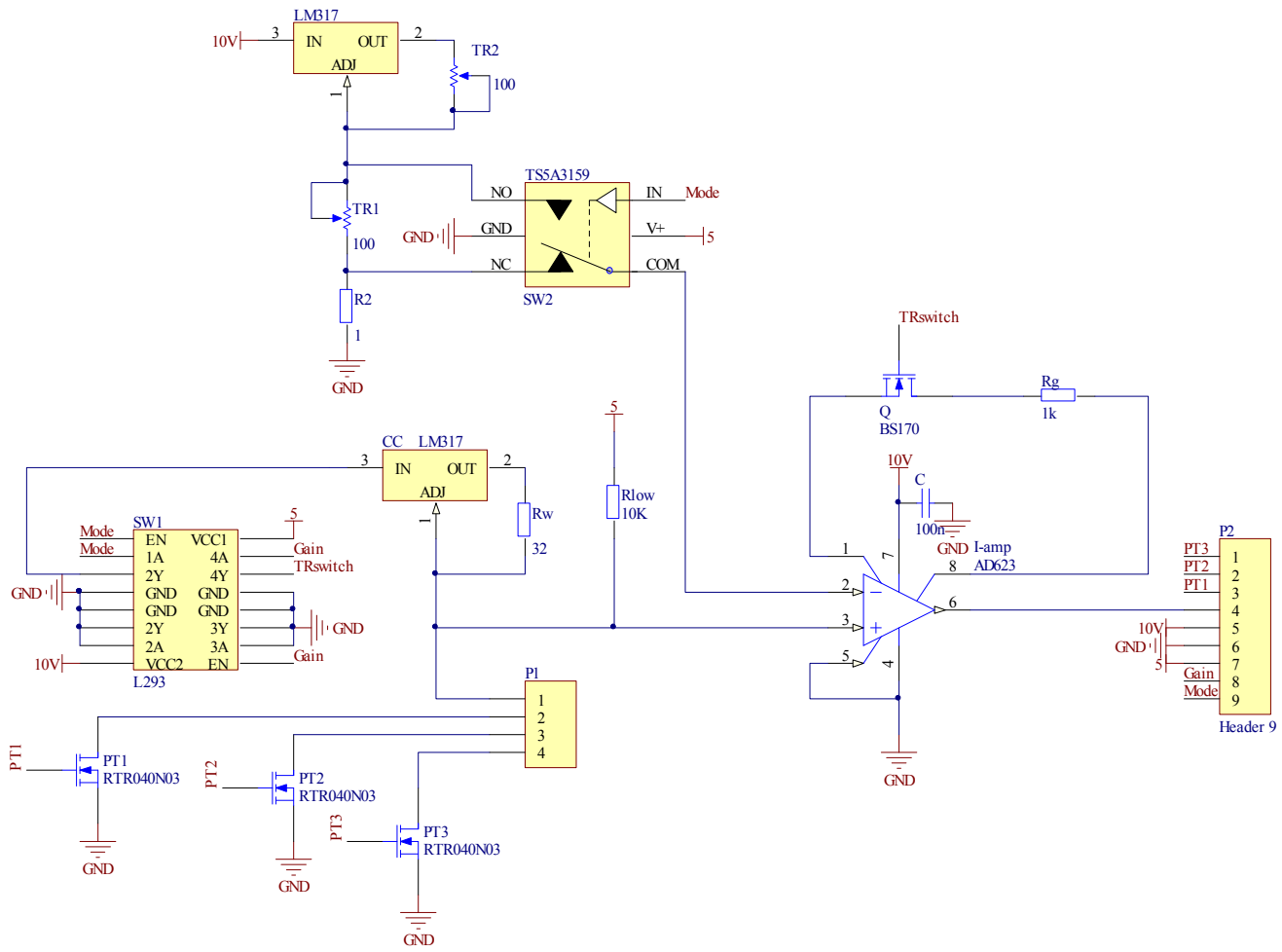
10. SAŽETAK

METEOROLOŠKA STANICA ZA UDALJENA MJERENJA

Cilj ovog diplomskog rada je bio upoznati se sa sensorima koji se koriste u meteorološkim stanicama za mjerenja u ekologiji i poljorivredi te projektirati i izvesti mjerilo brzine i smjera vjetra. Opisani su senzori koji se koriste u meteorološkim postajama za mjerenje temperature, vlage, tlaka zraka, svjetlosti i padalina. Posebna pažanja se obratila na različite metode mjerenja brzine i smjera vjetra. Poblize je opisana metoda mjerenja brzine vjetra pomoću anemometara s ugrijanom žicom. Projektiran je i izveden uređaj za mjerenje brzine i smjera vjetra koji koristi ugrijani otporni element u načinu rada s konstanom strujom, te je opisan način umjeravanja i utjecaji nekih parametara na mjerenje.

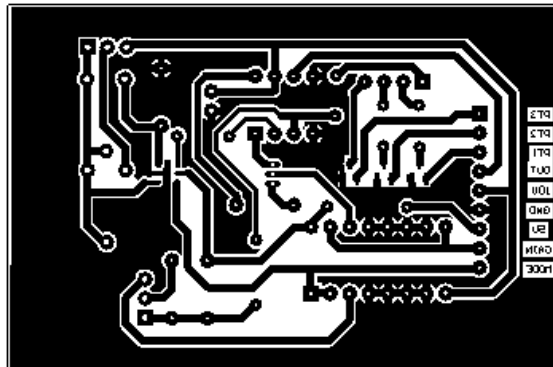
Summary

The goal of this thesis was to give an insight to sensors used in weather stations for measurement in ecology and agriculture and to design and implement a wind speed and direction measurement unit. Description was given for sensors used in weather stations for temperature, moisture, air pressure, illumination and wind direction measurement. Special focus was given to different methods of wind speed and direction measurement. The method for wind speed measurement with heated wire anemometer was described in more detail. A measurement device using a heated resistant element in constant current mode was designed and implemented for wind speed and direction measurement, and some calibration methods and influences of important parameters on measurement were described.



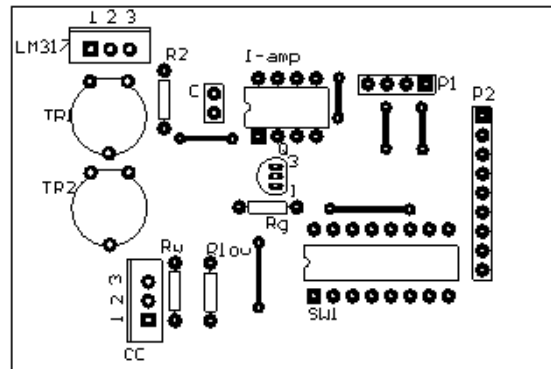
Prilog A: Električna shema uređaja

Prilog B: Tsikana pločica, donji sloj

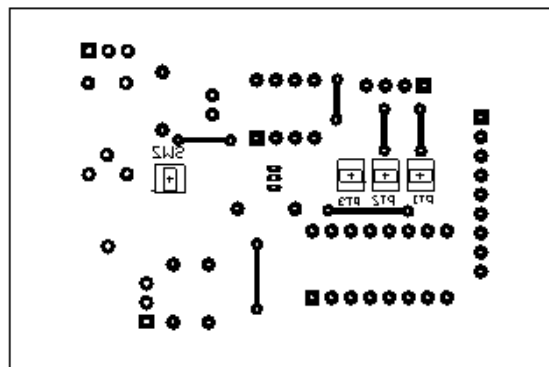


Prilog C: Tiskana pločica, položajni nacrt komponenti

gornji sloj



donji sloj



Prilog D: Sastavnica

Redni broj	Opis	Designator	Footprint	Količina	Kataloški broj	Dobavljač
1	Capacitor	C	RAD-0.1	1	3120009000	Chipoteka
2	L293	SW1	DIP16	2	0180029301	Chipoteka
3	LM317	LM317, CC	TO220AB	2	0180031703	Chipoteka
4	Trimer	Tr1, Tr2	Trimer	2	2710020001	Chipoteka
5	TS5A3159DBVRG4	SW2	SOT23-6	1	662-2808	RS-Components
6	Header, 9-Pin	P2	HDR1X2	1		Chipoteka
7	Header, 4-Pin	P1	HDR1X2	1		Chipoteka
9	Resistor 10k	Rlow	AXIAL-0.3	1	2210074001	Chipoteka
10	Resistor 1k	R2	AXIAL-0.3	1	2210050001	Chipoteka
11	Resistor 32,2	Rw	AXIAL-0.3	1	2210013001	Chipoteka
12	Resistor 1,2	R2	AXIAL-0.3	1	2210000112	Chipoteka
16	RTR040N03	U1	SOT95	3	1525562	Farnell
17	BS170	Q	TO92	1	671-4736	RS-Components
18	Low-Power Instrumentation Amplifier AD623	I-amp	DIP8	1	523-8575	RS-Components