

Vežba 3 – Anemometar

Vetar predstavlja kretanje vazduha usled razlike atmosferskih pritisaka. Do razlike atmosferskih pritisaka može doći usled neravnomernog zagrevanja Zemljine površine, koje se može javiti usled različitog upadnog ugla Sunčevog zračenja, tipa površine koja je ozračena, atmosferskih prilika, doba dana, godišnjeg doba i niza drugih razloga. Kretanje vazduha je usmereno iz oblasti višeg vazdušnog pritiska ka oblasti sa nižim vazdušnim pritiskom.

Merenje brzine vetra je od suštinskog značaja za adekvatno predviđanje vremenskih uslova. Takođe, pri testiranjima i radu vetroturbina, posebno u pogledu procene performansi, brzina i profil vetra predstavljaju ključne informacije, neophodne za dobar proračun isplativosti ovih sistema. Pored dve primene koje su već navedene, informacija o brzini vetra je neophodna i u mnogim drugim, na prvi pogled manje očiglednim proračunima, kao što su procena širenja zagađenja, bezbednost visokih građevina, ili pak procena uticaja vetra na useve. Uređaji koji se koriste za merenje brzine vetra se nazivaju anemometri. Anemometre je moguće klasifikovati na osnovu principa rada, na one koji brzinu strujanja vazduha mere direktno, i one koji do informacije o brzini vetra dolaze na osnovu razlike pritisaka koju detektuju. Tipičan primer anemometra koji brzinu vetra meri na osnovu razlike pritisaka je *Pitot*-ova cev sa "U" manometrom. U zavisnosti od primene, od anemometra se može zahtevati da ispuni neke od sledećih osobina:

- robustnost,
- brz odziv (veliki frekvencijski opseg),
- širok merni opseg,
- otpornost na habanje (odsustvo pokretnih delova),
- male dimenzije (kako svojim prisustvom ne bi značajno remetio strujanje vazduha),
- imunost na elektromagnetnu interferenciju,
- niska cena,
- dug radni vek.

Termalni anemometri merenje vetra baziraju na promeni disipacije zagrejanog otpornog elementa, izloženog strujanju vetra. Kako nemaju pokretnih delova i obično su malih dimenzija, ovi senzori neretko predstavljaju najbolje rešenje za merenje brzine vetra. Karakterišu ih visoka osetljivost i širok dinamički opseg. Zbog veoma visoke osetljivosti pri merenju malih brzina vetra, ovi anemometri su u tom opsegu brzina značajno ispred anemometara sa pokretnim delovima. Njih pri takvim merenjima karakteriše slab i često nedovoljno precizan izlaz. Otporni element može biti zagrevan eksterno korišćenjem grejača koji se nalazi u njegovoj neposrednoj blizini, ili interno kada je njegovo zagrevanje posledica proticanja električne struje.

3.1 Teorijski osnov

Najstariji i najpoznatiji vid termalnih anemometara su anemometri sa užarenom žicom (*Hot-wire anemometer*). Žica koja predstavlja senzor je veoma malih dimenzija, tipične dužine 1-2 mm i prečnika od svega 4-5 μm . Otpornost žice je mala, obično do 10 Ω . Zavisnost otpornosti žice od temperature je data sledećom relacijom:

$$R_s = R_0(1 + \alpha(T_s - T_0)) \quad (1)$$

gde je R_0 otpornost žice na temperaturi T_0 , dok α označava temperaturski koeficijent otpornosti. Žice se najčešće prave od platine, nikla, ali i legure platine i iridijuma, gde izbor materijala zahteva kompromis u pogledu dobrih mehaničkih karakteristika (volfram, legura platine i iridijuma), visokog temperaturskog koeficijenta otpornosti (volfram, platina) i otpornosti na oksidaciju (platina, legura platine i iridijuma).

Princip rada podrazumeva interno zagrevanje žice na temperaturu koja je značajno iznad ambijentalne temperature. Pri strujanju vetra preko užarene žice dolazi do odvođenja toplote sa žice konvekcijom i promene njene otpornosti, što se može detektovati pridruženim električnim kolom. Pretpostavlja se da je hlađenje konvekcijom dominantno u poređenju sa radijativnim i kondukcijskim odvođenjem toplote. Umesto žice je moguće koristiti i tanak užareni provodni film izrađen od istih materijala i deponovan na izolatorsku podlogu. Korišćenjem filma se prevazilazi nekoliko osnovnih problema užarenih žica, poput fleksibilnosti dizajna senzorske glave, boljih mehaničkih karakteristika, smanjene kondukcije prema senzorskoj glavi, i boljeg frekvencijskog odziva. Kako koeficijent konvekcije zavisi od brzine vetra, na ovaj način je brzinu vetra moguće jednoznačno odrediti. Po *King*-ovom zakonu, za slučaj žice važi:

$$h(v) = A + Bv^{0.5} \quad (2)$$

gde je $h(v)$ oznaka koeficijenta konvekcije, v je oznaka brzine vetra, a A i B su konstante, određene osobinama žice i fluida. Prema *Newton*-ovom zakonu konvekcije važi da je:

$$P = hS(T_s - T_a) \quad (3)$$

gde je S oznaka za površinu senzora (žice), T_s je temperatura senzora, dok je T_a oznaka za ambijentalnu temperaturu. U stacionarnom stanju je moguće izjednačiti snagu *Joule*-ovih gubitaka sa snagom koja se odvodi konvekcijom, te važi sledeća relacija:

$$\frac{V_s^2}{R_s} = R_s I_s^2 = h(v)S(T_s - T_a). \quad (4)$$

U prethodnoj relaciji R_s predstavlja otpornost otpornog elementa, V_s njegov napon, a I_s njegovu struju. Ukoliko je neophodno uzeti u obzir prelazni režim, prethodna relacija se modifikuje uvođenjem sabirka sa desne strane znaka jednakosti:

$$\frac{V_s^2}{R_s} = R_s I_s^2 = h(v)S(T_s - T_a) + mc \frac{dT_s}{dt} \quad (5)$$

gde je m masa senzora, c njegova specifična toplota, a t predstavlja vreme.

Žice koje se koriste za merenje brzine vetra su veoma tanke, te lako pucaju i veoma ih je teško reparirati i uopšte montirati na nosače. Proces podrazumeva set kompleksnih operacija izvedenih od strane obučenog izvođača pod mikroskopom. Kako su žice veoma male otpornosti, za njihovo zagrevanje je neophodno koristiti struje koje se mere u amperima. Umesto užarene žice i užarenog filma, moguće je na istom principu realizovati merenje i korišćenjem termistora sa negativnim temperaturskim koeficijentom (u daljem tekstu će često biti korišćena skraćenica *NTC termistor*). Termistor je tada, kao i žicu, neophodno koristiti u režimu samozagrevanja. Samozagrevanje termistora je proces zagrevanja termistora na temperaturu iznad temperature ambijenta usled proticanja električne struje i u slučaju merenja temperature predstavlja neželjen proces koji rezultuje greškom u merenju. Realizacija anemometra korišćenjem NTC termistora rezultuje robustnim senzorom, boljih mehaničkih karakteristika i visoke osetljivosti usled izraženo nelinearne zavisnosti otpornosti termistora od temperature. Iz razloga širokog izbora i niske cene dostupnih NTC termistora na tržištu, cena pravljenja i održavanja ovakvog anemometra je značajno niža u poređenju sa anemometrima sa užarenom žicom.

U slučaju termistora sa negativnim temperaturskim koeficijentom otpornost termistora zavisi od njegove temperature na sledeći način:

$$R_s = R_0 e^{B(T_s^{-1} - T_0^{-1})}. \quad (6)$$

U prethodnoj relaciji B predstavlja konstantu datog termistora, dok R_0 označava njegovu otpornost na temperaturi T_0 . Neophodno je uvesti modifikaciju *King*-ovog zakona kako bi se teorijska razmatranja bolje složila sa eksperimentalnim rezultatima. Naime, umesto korene zavisnosti koeficijenta konvekcije od brzine vetra, poželjno je uvesti parametar n koji se, kao i parametri A i B nalazi fitovanjem rezultata dobijenih pri etaloniranju. Zavisnost koeficijenta konvekcije od brzine vetra tada uzima sledeću formu:

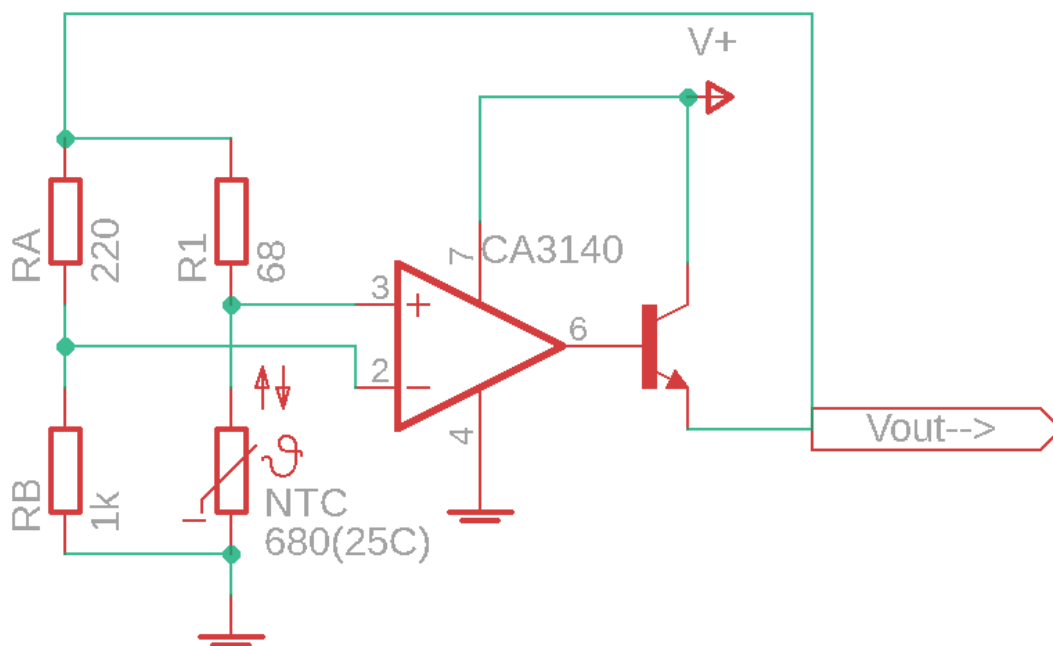
$$h(v) = A + Bv^n. \quad (7)$$

Nezavisno od toga koji tip otpornog elementa se koristi pri merenju brzine vetra, sa aspekta pobuđivanja senzora postoje tri zastupljene metode merenja: metoda konstantnog napona na senzoru, konstantne struje kroz senzor i konstantne temperature senzora. Prve dve metode su zasnovane na merenju promene otpornosti otpornog elementa usled hlađenja pri strujanju vetra, dok je poslednja bazirana na merenju električne snage koja je neophodna kako bi se temperatura otpornog elementa održala konstantnom, nezavisno od brzine vetra. Prednost metode konstantne temperature u poređenju sa ostalim metodama se ogleda u **zaobilaženju sporih termičkih procesa kao što su hlađenje i zagrevanje otpornog elementa**, čime se

popravlja frekvencijski odziv anemometra. Takođe, metoda konstantne temperature smanjuje rizik od spaljivanja otpornog elementa pri naglim i drastičnim promenama vetra.

Uslov konstantne temperature otpornog elementa je moguće zadovoljiti održavanjem njegove otpornosti na fiksnoj vrednosti. Na osnovu jednačine (4) je dalje moguće zaključiti da kako se otpornost senzora u metodi konstantne temperature ne menja, osetljivost ove metode na promene u brzini vetra zavisi isključivo od koeficijenta konvekcije i razlike temperatura ($T_s - T_a$), a ne i od promene otpornosti usled porasta brzine vetra. Prethodna tvrdnja važi i u slučaju merenja struje kroz senzor i u slučaju merenja napona senzora.

Šema električnog kola koje održava termistor sa negativnim temperaturnim koeficijentom na konstantnoj temperaturi je prikazana na slici 1.



Slika 1 Šema električnog kola anemometra sa konstantnom temperaturom.

Termistor se nalazi u mernoj grani *Wheatstone* – ovog mosta, u kojoj se nalazi i otpornik fiksne otpornosti R_1 . Otpornici fiksne otpornosti R_a i R_b se nalaze u referentnoj grani mernog mosta. Izlaz mernog mosta je povezan na ulaz operacionog pojačavača čiji izlaz preko bipolarnog tranzistora napaja merni most čime se zatvara povratna sprega kola. Pri uključivanju napajanja električnog kola, otpornost termistora je visoka jer je termistor hladan, pa je napon sa razdelnika koji se nalazi na neinvertujućem ulazu operacionog pojačavača viši u odnosu na napon sa razdelnika referentne grane koji se nalazi na invertujućem ulazu operacionog pojačavača. Ovaj uslov podrazumeva da će operacioni pojačavač svoj rad otpočeti u režimu pozitivnog zasićenja. Pozitivno zasićenje operacionog pojačavača će rezultovati visokim naponom napajanja *Wheatstone* – ovog mosta, te će struja većeg intenziteta prolaziti kroz termistor. Kako u tom slučaju disipacija termistora raste, termistor će se postepeno zagrevati što će rezultovati padom

napona razdelnika merne grane mosta. Proces će se odvijati sve dok otpornost termistora usled zagrevanja ne opadne dovoljno kako bi bio zadovoljen uslov ravnoteže mosta, čime se operacioni pojačavač uvodi u željeni linearni režim rada. Tada važi sledeća relacija.

$$\frac{R_a}{R_b} = \frac{R_1}{R_s} \quad (8)$$

Zaključuje se da je izbor radne otpornosti termistora, odnosno njegove radne temperature određen adekvatnim izborom fiksnih otpornika u *Wheatstone* – ovom mostu. Kada preko NTC termistora počne duvati vetar, usled odvođenja toplote konvekcijom (hlađenja termistora) će otpornost termistora imati tendenciju da poraste. Tada će ponovo doći do porasta napona napajanja mosta usled reakcije operacionog pojačavača čime će se disipacija termistora povećati. Na ovaj način termistor održava konstantnu otpornost, odnosno temperaturu, a operacioni pojačavač ostaje u linearnom režimu rada. Tada napon na termistoru zavisi od brzine vetra po sledećoj relaciji:

$$V_s = \sqrt{R_s S (T_s - T_a) h(v)} = \sqrt{K \cdot (A + Bv^n)(T_s - T_a)} \quad (9)$$

$$K = R_s S = \text{const.}$$

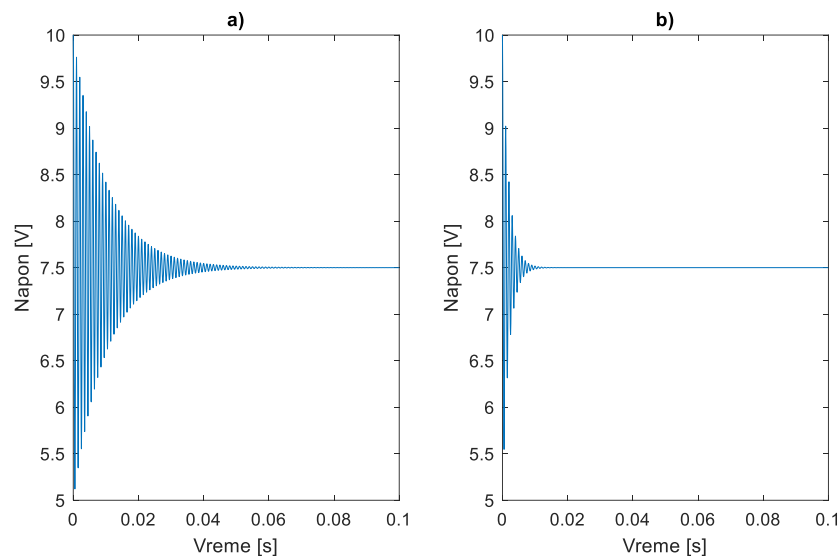
Iz prethodne relacije se jasno uočava da **ambijentalna temperatura ima značajan uticaj na merenje brzine vetra**. Naime, posmatranjem napona senzora nije moguće razlikovati promene u naponu koje su posledica promene vetra od promena koje su posledica promene ambijentalne temperature. Ukoliko je anemometar etaloniran pri ambijentalnoj temperaturi $T_{a,r}$, a merenje se vrši pri izmerenoj temperaturi ambijenta $T_{a,i}$ iz relacije (9) sledi da je neophodno izvršiti skaliranje izmerenog napona na senzoru $V_{s,i}$ po sledećoj relaciji:

$$V_s = V_{s,i} \sqrt{\frac{(T_s - T_{a,r})}{(T_s - T_{a,i})}} \quad (10)$$

gde V_s predstavlja vrednost napona senzora koja bi bila izmerena pri temperaturi ambijenta, očitanoj tokom etaloniranja. Ovaj vid kompenzacije promene ambijentalne temperature je poznat kao matematička kompenzacija i zahteva upotrebu **računara ili mikrokontrolera, kao i dodatnog senzora temperature**.

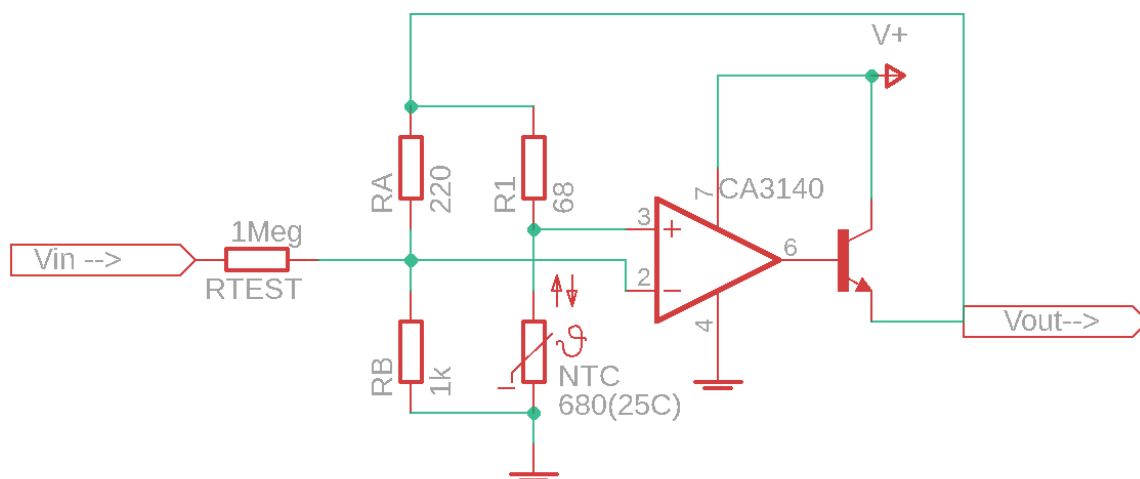
Analizom kola sa slike 1 je moguće uočiti prisustvo i pozitivne i negativne povratne sprege. Ovaj fenomen je razlog inherentno nestabilne prirode ovakvih anemometarskih sistema. Na stabilnost ovako realizovanog električnog kola i njegov propusni opseg dominantno utiču karakteristike izabranog operacionog pojačavača, kao što su pojačanje otvorene petlje (*open loop gain*), proizvod pojačanja i propusnog opsega pojačavača (*gain bandwidth product*), ali i ulazni naponski ofset pojačavača (*input offset voltage*). Sa povećanjem ulaznog naponskog ofseta kolo postaje stabilnije, dok se njegovim finim podešavanjem može optimizovati propusni opseg anemometra za male fluktuacije brzine vetra oko neke konstantne vrednosti. Na slici 2 je

prikazana simulacija odziva kola sa slike 1 na odskočnu promenu brzine vetra u slučaju ulaznog naponskog ofseta 1 mV i 10 mV.



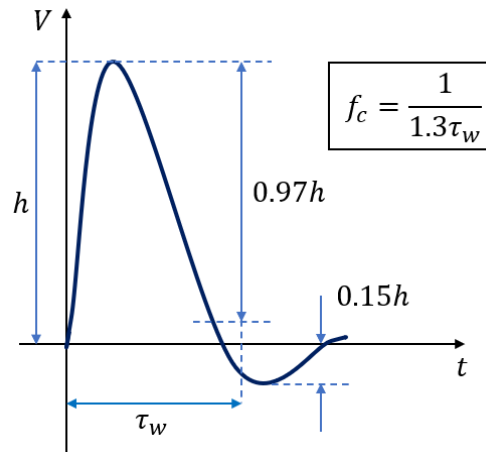
Slika 2 Grafici vremenskog odziva izlaznog napona na odskočnu promenu brzine vetra za ulazni naponski ofset od a) 1 mV i b) 10 mV.

Kako stabilnost sistema sa porastom brzine vetra opada i sistem može prooscilovati, propusni opseg je uvek poželjno meriti pri najvećoj brzini vetra. Propusni opseg je moguće izmeriti primenom napona u vidu povorke četvrtki na tačku u referentnoj grani mosta kao na slici 3. Povorku je moguće generisati generatorom signala vezanim na referentnu granu mosta preko otpornika čija je otpornost značajno veća od otpornosti otpornika u grani.



Slika 3 Šema za test propusnog opsega anemometarskog kola.

Optimalni odziv na odskočnu pobudu, prikazan na slici 4, u slučaju anemometra sa užarenom žicom je odredio još *Freymuth* 1977. godine.



Slika 4 Optimalni odziv anemometra sa konstantnom temperaturom na odskočnu pobudu, Freymuth (1977).

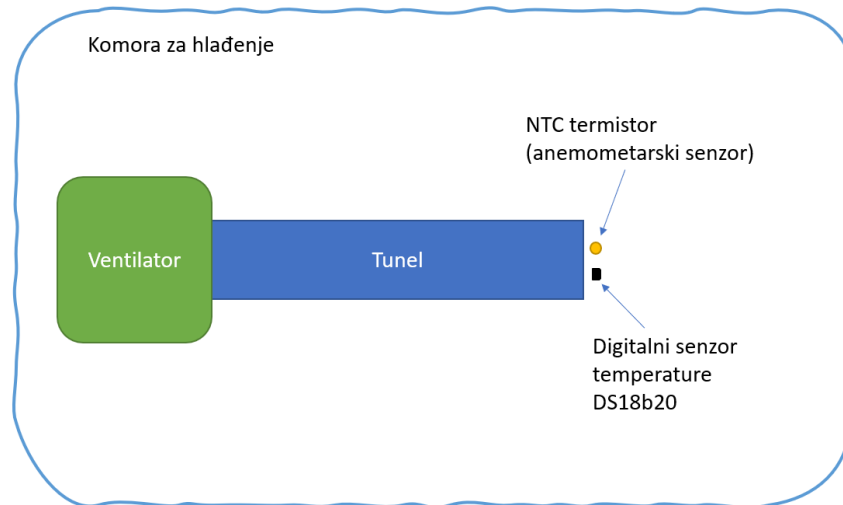
Njegov proračun je moguće po analogiji iskoristiti i u slučaju termistora sa negativnim temperaturnim koeficijentom, čime se usvaja izraz za graničnu frekvenciju kritično prigušenog sistema f_c :

$$f_c = \frac{1}{1.3 \cdot \tau_w} \quad (11)$$

gde τ_w označava vreme koje je potrebno kako bi odskočni odziv nakon preskoka opao na 3 % vrednosti pika.

3.2 Zadatak vežbe

1. Na osnovu korišćenih komponentata prikazanih na slici 1, teorijski proračunati radnu otpornost termistora, a zatim izmeriti radnu otpornost termistora merenjem napona na termistoru i struje u mernoj grani mosta. Korišćenjem specifikacije termistora [1] dati procenu njegove radne temperature.
2. Anemometar sa dodatnim senzorom temperature **DS18B20** postaviti u sistem sa ventilatorom unutar komore za hlađenje, a zatim bez promene brzine vetra snimiti napon anemometra, kao i temperaturu koju meri digitalni senzor temperature tokom jednog ciklusa hlađenja i zagrevanja komore. Ilustracija sistema je prikazana na slici 5.



Slika 5 Ilustracija sistema za merenje.

Skicirati na istom dijagramu snimljene signale, kao i treći signal koji predstavlja temperaturski kompenzovan napon anemometra prema relaciji (10). Smatrati da je anemometar etaloniran pri ambijentalnoj temperaturi od $T_{a,r} = 28.25$ °C. Ukratko prokomentarisati dobijene rezultate.

3. Dodatak: Izvršiti kalibraciju anemometra, i kroz dobijene parove mernih tačaka fitovati zavisnost $V_{out}=(A+Bv^n)^{0.5}$. Fitovanu zavisnost skicirati punom linijom, zajedno sa mernim tačkama. Priložiti dobijene vrednosti parametara A , B i n .

Odgovore na zadatke vežbe napisati u formi sažetog izveštaja prema navedenom redosledu. Izveštaj sa odgovorima na zadatke vežbe, kao i eventualne sugestije u vezi sa uputstvom za izradu laboratorijske vežbe poslati na adresu: petarat@etf.rs.

Reference

Sadržaj ovog uputstva zasnovan je na informacijama iz sledećih izvora:

[1] <https://www.vishay.com/docs/29049/ntcle100.pdf>

(tehnička specifikacija korišćenog NTC termistora nominalne otpornosti 680Ω pri 25°C) preuzeto 20. maja 2020.

[2] Fraden, J., 2010. *Handbook of modern sensors* (Vol. 3). New York: Springer.

[3] Tropea, C. and Yarin, A.L., 2007. *Springer handbook of experimental fluid mechanics*. Springer Science & Business Media.