

Naslov naloge:

MERJENJE TEMPERATURE

Področje:

ELEKTROTEHNIKA

Vrsta naloge:

RAZISKOVALNA NALOGA

Dijaki:

Luka Zaveršnik, 4. letnik PTI

Maj Verhovnik Marovšek, 4. letnik PTI

Martin Leskovec, 4. letnik PTI

Mentor: Bojan Vuković

Leto izdelave naloge: 2023

Ime šole: SŠTS Šiška, Litostrojska 51, Ljubljana

KAZALO

Povzetek	3
Uvod	4
Teoretični del.....	4
Temperaturna sprememba upora	4
Termistorji in polprevodniški merilniki temperature	5
Termočlen.....	5
Eksperimentalni del.....	6
LM35.....	6
DS18B20	6
Pt100 in MAX31865	7
Termočlen in MAX6675	7
DHT22 in DHT11	8
Meritev	8
Razprava – ugotovitve.....	11
Zaključek	12
Viri	13

PRILOGE: Naloga ne vsebuje prilog.

Povzetek

Naloga raziskuje možnosti merjenja temperature zemlje za potrebe avtomatizacije šolskega rastlinjaka z mikrokrmilnikom. Ukvarja se predvsem s temperaturnimi tipali, ki so prirejena za uporabo v okolju Arduino.

Raziskovalci so preizkusili tipala na treh principih delovanja (upor, termistor in termočlen). Vsako tipalo ima svoje prednosti in slabosti. Nekatera so za bolj, nekatera za manj specifična področja uporabe.

Kot najbolj primerno tipalo za raziskovani primer se je izkazalo tipalo DS18B20, ki je bilo tudi sicer favorit med široko ponudbo tipal na trgu.

Ključne besede: LM35, DS18B20, Pt100, termočlen, MAX31865, MAX6675

Uvod

Za potrebe šolskega projekta »Avtomatizacija rastlinjaka« smo želeli poiskati najbolj primerno temperaturno tipalo. V prvi fazi avtomatizacije rastlinjaka naj bi naredili samo monitoring parametrov (temperatura in vlaga zraka ter zemlje) rastlinjaka. Zaradi cenovne dostopnosti in siceršnje razširjenosti je začetni projekt zamišljen na osnovi Arduina oziroma ESP32. Pri merjenju temperature zraka v rastlinjaku ni bilo večjih pomislekov glede izbire primerne tipala.

Za merjenje temperature zemlje se je kot zelo dobra izbira ponujalo tipalo DS18B20, a smo želeli preveriti, ali je to res najboljša izbira in zakaj. Tipalo DS18B20 je elektronski merilnik, ki kot merilni člen uporablja termistor. Tipalo Pt100 nas je zanimalo, ker ga uporablja večina krmilniških aplikacij v industriji. Zanimal pa nas je tudi termočlen kot edino aktivno tipalo temperature. Meritve na osnovi infrardečih žarkov niso v naših cenovnih okvirjih, omogočajo pa tudi samo meritev temperature na površini, kar tudi ni naš cilj.

Teoretični del

Temperaturo merimo električno po treh osnovnih principih: temperaturna sprememba upora, temperaturna sprememba termistorja in termočlen.

Temperaturna sprememba upora

Temperaturno spremembo električne upornosti kovin določa enačba:

$$R_{\vartheta} = R_0(1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0) + \beta(\vartheta - \vartheta_0)^2),$$

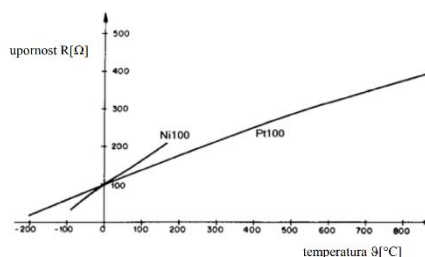
kjer je:

R_0 upornost prevodnika v Ω pri temperaturi ϑ_0 ,

R_{ϑ} upornost prevodnika v Ω pri temperaturi ϑ ,

α temperaturni koeficient upornosti materiala,

α in β ... kalibracijska koeficienta.



Slika 1: Upornost Pt100 in Ni100 v odvisnosti od temperature [1]

Za ožja temperaturna območja lahko uporabimo samo prvi (linearni) del enačbe:

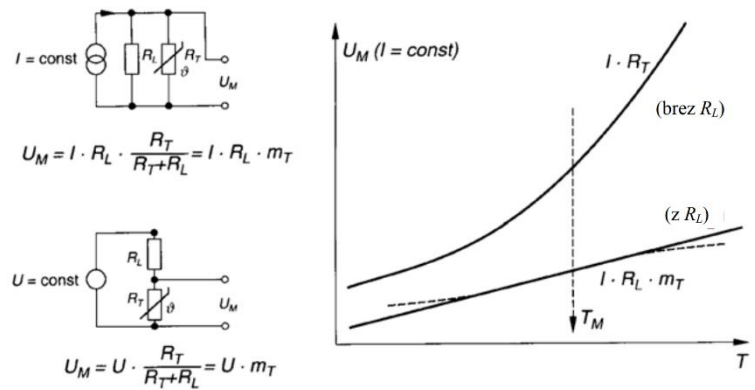
$$R_{\vartheta} = R_0(1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0)).$$

Pri merilnih pretvornikih so ravno linearni fizikalni pojavi najbolj zaželeni. Največkrat se za temperaturna tipala uporablja 100 Ω platinasti upor (Pt100). Uporablja pa se tudi Pt1000, kjer lahko dosežemo večjo občutljivost. Merilniki so največkrat zasnovani v mostičnih vezjih. V industriji se zelo veliko uporabljajo pretvorniki na osnovi Burr-Brownovega pretvornika RTD/4-20 mA. (RTD – resistance temperature device)

Termistorji in polprevodniški merilniki temperature

Polprevodniška uporovna tipala temperature izkoriščajo enak fizikalni učinek kot kovinski upori. Bistvena razlika je, da je temperaturni koeficient upornosti polprevodniškega silicija izrazito nelinearen in odvisen od temperaturnega območja (najpogosteje od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Bistvena prednost polprevodniških tipal je hitra in cenovno ugodna izdelava, podobno kot pri večini polprevodniških elementov. V primerjavi s Pt tipali, imajo polprevodniška večji temperaturni koeficient upornosti. Zaradi nelinearne karakteristike je potrebna linearizacija. To izvedejo tako, da k temperaturno odvisnemu uporju vzporedno ali zaporedno vežejo linearni (temperaturno neodvisni) upor.

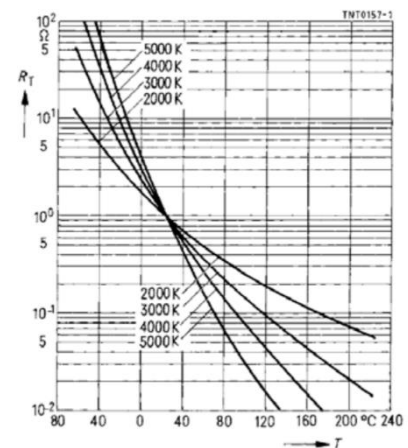


Slika 2: Linearizacija Si tipala [1]

Termistorji so temperaturno odvisni upori z visokim (-1 do $-7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{K}$) NTK (negativni temperaturni koeficient). Izdelani so iz kovinskih oksidov, kot so magnezij, nikelj, krom in kobalt.

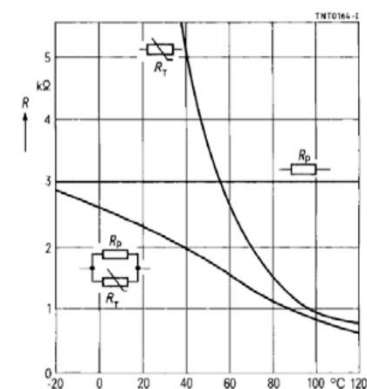
Materiali, ki se uporabljajo za izdelavo NTK uporov, so po svoji sestavi zmesi kovinskih oksidov, torej dobri izolatorji, ki jih z dodatkom ustreznih atomov primesi lahko pretvorimo v polprevodniške keramike. Proizvajalci temperaturno odvisnost upornosti podajajo z dvema konstantama A in B v obliki:

$$R(T) = A e^{\frac{B}{T}}$$



Slika 3: Upornost v odvisnosti od temp.[1]

Termistorje je potrebno prav tako linearizirati, ali pa uporabiti elektronsko vezje za posredno meritev. Zaradi morebitne mehanske poškodbe in večje kemične obstojnosti so uporovni senzorji temperature pogosto zaščiteni z različnimi prevlekami, ki pa imajo to slabost, da občutno povečajo toplotno maso in povečajo odzivni čas tipala.



Slika 4: Linearizacija NTK upora (R_T)[1]

Termočlen

Termočlen je prvi opisal Johann Seebeck (1770–1831) leta 1821. Že od samega začetka poizkusov je s termoelementom poizkušal izmeriti temperaturo.

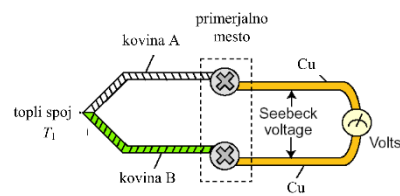
Termoelement ali termospoj je sestavljen iz dveh različnih kovin. Ko segrevamo mesto spoja, se na hladnih koncih kovinskih žic pojavi šibka napetost. Napetost je sorazmerna razliki

Tudi na hladnem spoju pride do dveh neželenih termospojev (spoj z bakrom), ki jih imenujemo parazitski termočleni.

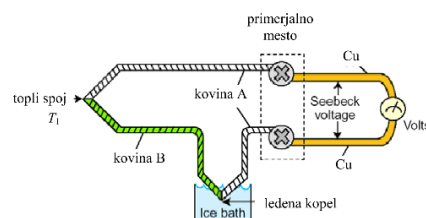
Termočleni so dokaj poceni in vsestransko uporabni. Lahko se uporabljajo v merilnem območju od 73 K (–200 °C) pa vse do 2273 K (2000 °C), kjer pa je natančnost pogojena z i

[1]

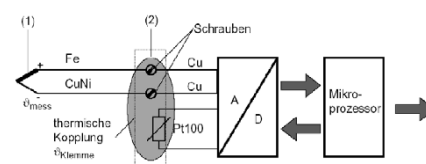
materialov. Imajo dokaj hiter odziv na spremembo temperature, a niso tako natančni kot uporovni termometri. Ena izmed njihovih glavnih prednosti je ta, da se lahko uporabljajo za merjenje temperature zelo majhnih predmetov, kot so na primer polprevodniški elementi. Termočleni so pogosto uporabljeni v skupinah, s čimer povečamo njihovo občutljivost.



Slika 5: Osnovna zgradba termočlena [1]



Slika 6: Meritev z referenčno temperaturo



Slika 7: Meritev z uporabo integ. vezij[1]

Na internetu smo poiskali, katera merilna tipala v ponudbi so primerna za merjenje temperature z mikrokrmilniki. Poleg nam dobro znanega LM35 so vse spletne strani ponujale tudi DS18B20. Za uporabo Pt100 in termočlena, pa smo morali spremeniti iskalno geslo. Seveda tudi to obstaja. Popularnost Arduina se očitno lahko kosa z marsikaterim pop zvezdnikom.

Temperaturno tipalo LM35 je na voljo v več tipih ohišij (TO-92 ...), značilnih za elektronske komponente. Cenovno je zelo ugoden. Zaradi analognega izhoda je enostaven za uporabo, ker ne potrebuje programskih knjižnic.

Podatki:

Napajanje: 4–20 V

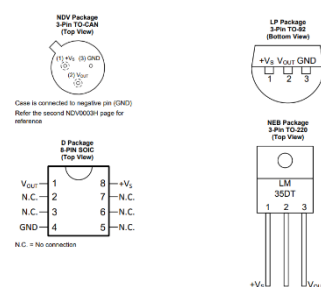
Merilno območje: od -55 do $155\text{ }^{\circ}\text{C}$

Občutljivost: 10 mV/°C

Natančnost: $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ na območju sobne temperature in $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ na celotnem merilnem območju.

Izhod: analogni

Cena: 5 € (TO-92)



Slika 8: Ohišja LM35 [9]

Temperaturno tipalo DS18B20 ima enožično komunikacijo, kar pomeni, da poleg napajanja potrebuje samo eno povezavo za komunikacijo. Ima t. i. parazitsko napajanje, zato potrebuje 4,7 k Ω pull-up upor. Vsak senzor ima enkratno 64-bitno serijsko kodo, tako da je možna

komunikacija več tipal na eni liniji. Dobavljivi so v ohišju TO-92 ali v vodotesni izvedbi s priključnim kablom. Pri uporabi potrebujemo knjižnice, tako za enolinijski prenos kot za pretvorbo oz. branje podatka in napak, ki jih tipalo zna zaznati in javiti.

Podatki:

Napajanje: 3 V do 5,5 V

Merilno območje: od -50 do $125\text{ }^{\circ}\text{C}$

Občutljivost: možnost 9–12 bitnega zajema

Natančnost: $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

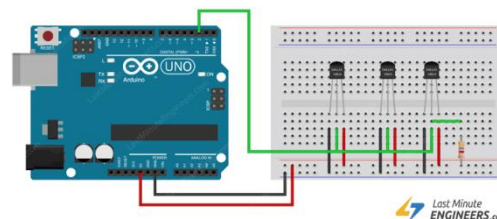
Izhod: digitalni (1 wire); čas pretvorbe $< 750\text{ ms}$

Cena: 3 € (TO-92), 8 € (vodotesni s kablom)



Slika 9: Izvedbi DS18B20 [3]

Tipalo je že ob prvem priklopu delovalo brez težav z izbranimi oz. priporočenimi knjižnicami. Tudi pri vezavi dveh tipal vzporedno nismo imeli težav.



Slika 10: Izvedbi meritve s tremi DS18B20 [4]

Pt100 in MAX31865

Tipalo Pt100 smo uporabili z digitalnim pretvornikom MAX31865, ki pretvarja RTD v digitalne podatke. Možen je priklop tako Pt100 kot tudi Pt1000. Merilni pretvornik omogoča 2-, 3- in 4-žični priklop. Izbiro priklopa je treba določiti programsko, izbrano priključitev pa v določenih primerih tudi s posegi v vezje (prerezati, oz. spajkati je treba del tiskanega vezja). Odločili smo se za "simulirano" štirižično vezavo, ki ne potrebuje posega v vezje. Kompenzacija merilnih vezic pri tako majhnih razdaljah ne bi smela imeti znatnega vpliva na meritve.

Podatki:

Napajanje: 3–5 V

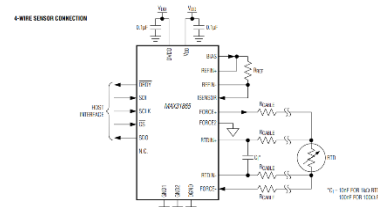
Merilno območje: -200 do $850\text{ }^{\circ}\text{C}$

Občutljivost: 15-bit ADC z resolucijo $0,03125\text{ }^{\circ}\text{C}$

Natančnost: normirana $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0,05\%$ polnega območja) čez celo delovno območje

Izhod: digitalni (4-žični SPI); čas pretvorbe 21 ms

Cena: 12 € + 4 € (tipalo)



Slika 11: MAX31865 [13]

Termočlen in MAX6675

Termočlen tipa K smo uporabili z digitalnim merilnim pretvornikom MAX6675. Že takoj na začetku je bila izmerjena sobna temperatura po občutku previsoka za 2 do $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, kar se je izkazalo tudi pri primerjavi z ostalimi merilniki. To je zmanjšalo tudi navdušenje nad termočleni tipa K. Za to tipalo smo ugotovili, da je priporočena uporaba univerzalnega digitalnega inštrumenta, ki ga kot priporočene uporabljajo že generacije dijakov na naš šoli. Kar nekaj teh pozabljenih tipal leži v skoraj vseh učilnicah praktičnega pouka.

Podatki:

Napajanje: 3–5,5 V

Merilno območje: $0 - 1024\text{ }^{\circ}\text{C}$

Občutljivost: 12-bit ADC z resolucijo $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Natančnost: $\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$



Slika 12: Izvedbe termočlena tipa K [14]

Izhod: digitalni (3-žični SPI)

Cena: 9 € + 6 € (tipalo)

Na spletu smo našli še merilni pretvornik MAX31855, ki prav tako deluje s termočlenom tipa K. Deluje kot 14-bitni pretvornik in ima merilno območje od -250 do $+1600$ °C. Ta se je izkazal kot mnogo trši oreh. Ker smo spregledali, da je maksimalna napajalna napetost 4 V, smo prvega uničili in to tako, da kar nekaj časa nismo vedeli, kaj je narobe. Pretvornik je namreč še vedno lepo kazal referenčno temperaturo in napako "stik z ozemljitvijo". Tudi ko smo se o MAX31855 bolje poučili [7,8] in nabavili novo vezje, se pretvornik ni obnašal dosti bolje, zato smo ga izločili iz nadaljnje raziskave.

DHT22 in DHT11

Tipala oziroma merilni sklop tipal iz družine DHT (11, 12, 22 in 21) so verjetno najboljši izbor za merjenje temperature zraka v tem cenovnem razredu. Merijo temperaturo in vlago. Morda je boljši le BME280, ki pa ga žal nismo mogli nabaviti, da bi ga preizkusili tudi v praksi. BME280 poleg temperature in vlage meri še zračni tlak.

Podatki:

Napajanje: 3–5 V

Merilno območje: 20 % do 80 % RH (0–50 °C temperaturna kompenzacija)

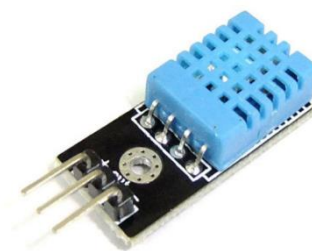
od 0 °C do +50 °C

Natančnost: ± 5 % RH

± 2 °C

Izhod: digitalni (I2 C)

Cena: 4–9 € (odvisno od tipa)

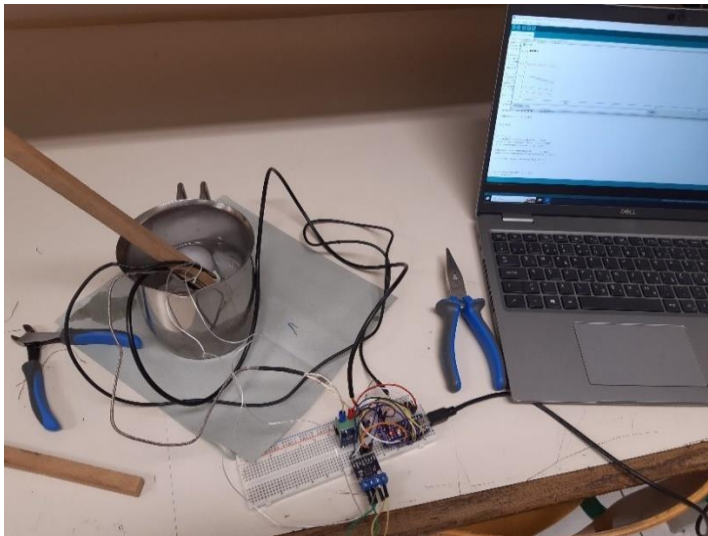


Slika 13: DHT11 [14]

Meritev

Prvo meritev smo naredili pri "domnevni" točki »0 °C«. Za meritev smo pripravili vezavo in programsko kodo na Arduinu Nano, ki istočasno zajema temperaturo štirih tipal (LM35, DS18B20, PT100 in termočlena). Pripravili smo si tudi zajem podatkov z Excel Data Streamerjem, a se je izkazalo, da je zajem podatkov s serijskim ploterjem v Arduino IDE celo bolj nazoren. Seveda gre za povsem drugo obliko podatkov, ki ne omogoča nobene statistične obdelave, ki pa se nam pri tako očitnih razlikah niti ni zdela potrebna. Sočasen zajem podatkov na obe aplikaciji pa žal ni možen, ker druga aplikacija zazna zasedenost serijskega porta.

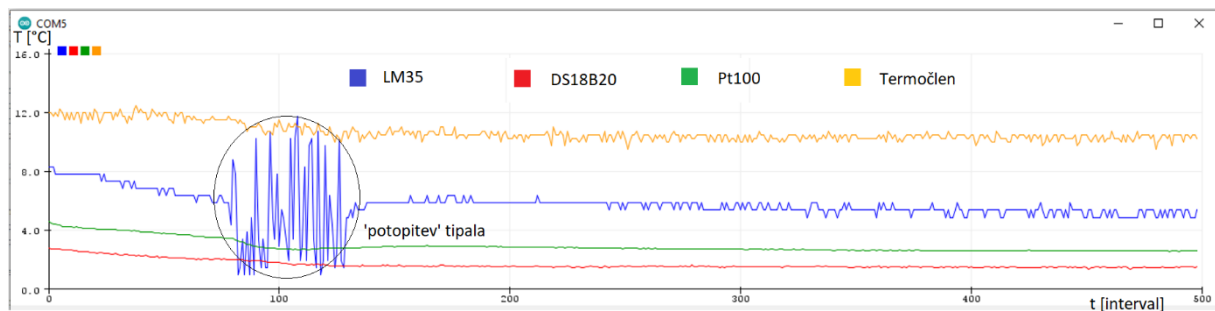
Čeprav smo vodo ohladili s kar nekaj ledu in da smo tudi čakali kar nekaj časa, se noben senzor ni povsem približal 0 °C. Najbližje je bil DS18B20, ki je pokazal malo več kot 2 °C. Najbolj pa je odstopal termočlen, ki je v ledeni vodi kazal kar 10 °C.



Slika 14: Prvo merjenje



Slika 15: Tipala v ledeni vodi



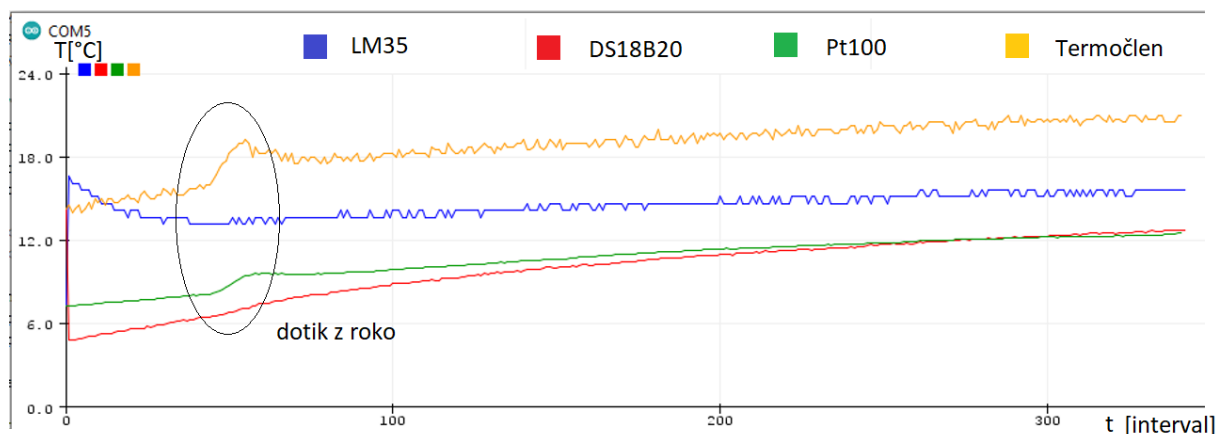
Slika 16: Graf meritve v ledeni vodi

Že prva meritev je pokazala problem s tipalom LM35, ki ni prirejen za meritev v vlažnem okolju. Ker smo želeli potopiti čim večji del tipala, se nam je ob minimalnem "popravljanju" namestitve tipal zgodila merilna nezgoda. Voda je delno zalila nogice tipala in na vходу Arduina smo dobili neke vrste vodni uporovni delilnik. Rezultat se nam je zdel zanimiv, zato meritve namenoma nismo ponovili od začetka. LM35 bi lahko zaprli v kovinsko cevko, a tega namerno nismo storili, ker bi mu s tem povečali temperaturno vztrajnost.

Prva meritev je pokazala tudi, da sta DS18B20 in PT100 veliko bolj stabilna oziroma da ne vlečeta motenj iz okolice. Predvsem je bilo to izrazito pri PT100.

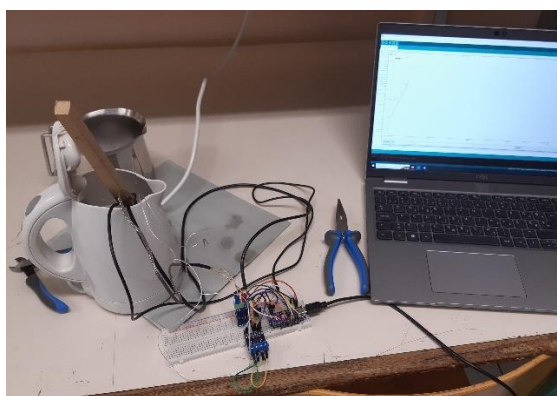


Slika 17: Druga meritev (ohlajeni senzorji na sobni temperaturi)

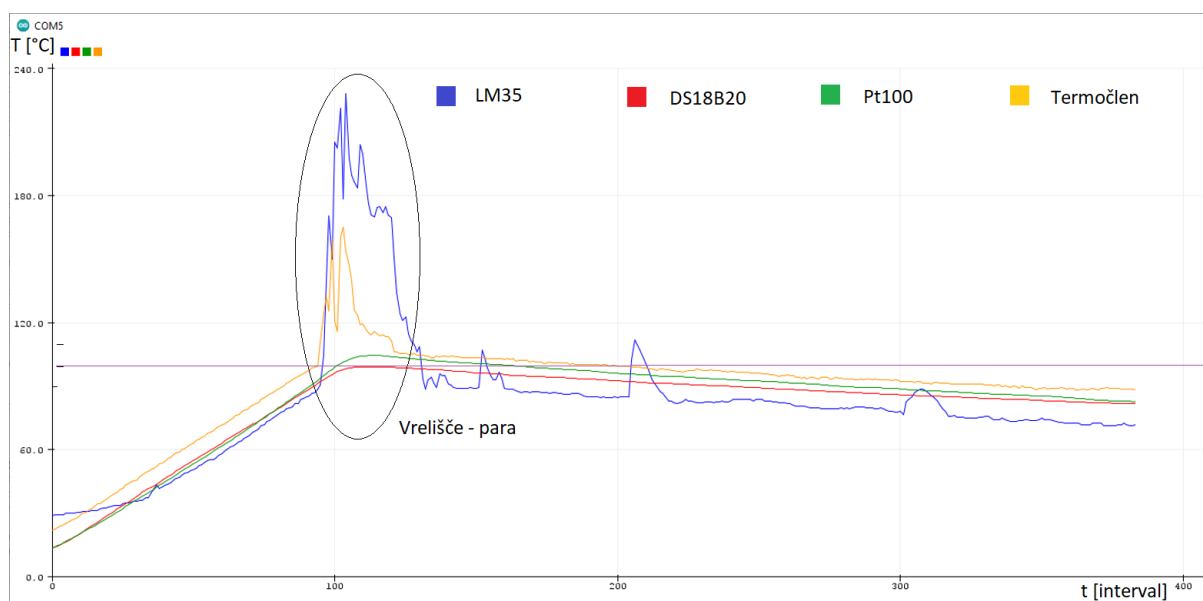


Slika 18: Graf meritve ohlajenih senzorjev na sobni temperaturi

Pri drugi meritvi je eden od raziskovalcev (bolj nehote) za kratek čas prijel termočlen. Zanimivo na grafu je, da je to zaznal tudi Pt100, ne pa tudi DS18B20, ki je bil na palici, kamor smo pritrdili merilna tipala, bližji. LM35 smo pred drugo meritvijo morali osušiti (zamenjati), tako se je na začetku meritve najprej ohladil, nato pa le malo segrel in njegova krivulja ni primerljiva z drugimi.



Slika 19: Tretja meritev (vrelišče)



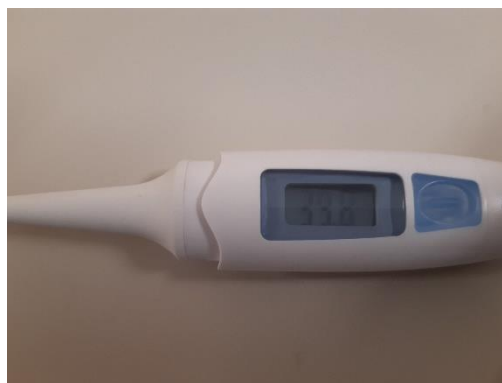
Slika 20: Graf meritve segrevanje vode do vrelišča

Pri večji temperaturni razliki tudi tipala delujejo bolj enakovredna oziroma na nek način pokažejo svoj značaj in kvaliteto. V točki vrelišča smo videli pojav prenehanja temperature dveh tipal. Pri termočlenu smo to pripisali možnosti, da je tipalo zaradi svoje karakteristične hitrosti izmerilo temperaturo pare, ki se je v trenutku, ko je voda zavrela, močno nabrala v zoženem delu hitrega grelnika vode. Pri LM35 pa je možno to pripisati tako istemu vzroku kot pri termočlenu, ali pa vlažnosti priključnih nogic kot pri prvi meritvi. LM 35 je imel še po izklopu grelnika nekaj nepojasnjenih "dogodkov", ki kažejo na večjo verjetnost drugega vzroka.

Ker nismo imeli referenčnega termometra, smo rešitev za primerjavo absolutnih vrednosti našli v Fahrenheitovi ideji (Daniel Gabriel Fahrenheit, 1686–1736), ki je za osnovo svoje lestvice (°F) vzel ledeno soljeno vodo in temperaturo človeškega telesa. Temperatura človeškega telesa ni odvisna od zračnega tlaka tako kot vrelišče vode. Kot umeritveno točko nismo merili lastne telesne temperature, temveč smo pomerili temperaturo vode v merilnem območju medicinskega termometra.

Tabela 1: Zajem temperatur z DataStreamer-jem s povprečnimi vrednostmi

Historical Data										
Time	LM35	DS18B20	Pt100	Termočlen	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	CH10
18:57,3	36,13	40,94	39,97	48,5						
18:59,2	36,13	40,94	39,97	48						
19:01,2	36,13	40,94	39,94	48,75						
19:03,0	36,13	40,94	39,91	48,75						
19:05,0	36,13	40,88	39,87	48,5						
19:06,9	36,13	40,88	39,87	48,75						
19:08,8	36,13	40,88	39,84	48,75						
19:10,7	35,64	40,94	39,84	48,75						
19:12,6	36,13	40,88	39,84	48,75						
19:14,5	36,13	40,88	39,84	48,5						
19:16,4	36,13	40,88	39,8	48,75						
19:18,3	36,13	40,88	39,8	48,75						
19:20,2	36,13	40,88	39,77	48,75						
19:22,1	36,13	40,88	39,8	48,75						
19:24,0	36,13	40,81	39,77	48,5						
povprečje	36,09733333	40,895	39,855	48,6333						



Slika 21: Medicinski termometer kaže 39,8 °C

Pri 39,8 °C je Pt100 kazal pravo vrednost. DS18B20 je odstopal za +1 °C. LM35 je odstopal za več kot –3 °C. Termočlen pa je bil zopet povsem v "svojem svetu" (+9 °C).

Razprava – ugotovitve

	LM35	DS18B20	PT100 (MAX31865)	Termočlen (MAX6675)
Merilno območje	–55 do 155 °C	-50 do 125 °C	-200 do 850 °C	0 - 1024 °C
Natančnost	10 mV/°C	9–12 bit	15-bit (0,03125 °C)	12-bit (0,25 °C)
Točnost	±1 °C (±0,5 °C)	±0,5 °C	±0,5 °C	±1,5 °C
Izhod	analogni	digitalni (1 wire)	SPI (4-žično)	SPI (3-žično)
Cena	5 €	8 €	16 €	15 €

Tabela 2: Pregledna primerjava temperaturnih tipal

LM35 je zaradi svojih zmožnosti in cene zelo uporaben senzor temperature. Analogni izhod je tako prednost kot slabost v primerjavi z ostalimi. Če LM35 ne bi imel konkurence v DS18B20, ki ga lahko nabavimo že v obliki, pripravljeni za uporabo v vlažnem okolju, bi se ga vsekakor

splačalo prirediti (obleči v kovinsko cevko) za meritve v vlažnih prostorih oz. za merjenje temperature tekočin.

DS18B20 se je izkazal za upravičenega favorita. To je edino tipalo, ki tudi za meritev več temperatur zasede samo en vhod mikrokrmilnika. Ker je pri meritvi temperature zemlje težko najti referenčno točko merjenja (globina merjenja, osenčeni in osončeni deli), se bomo morali vsekakor zateči k rešitvi merjenja na več mestih. Pri uporabi ostalih tipal pa bi pri tem zelo hitro prišli do vprašanja prostih vhodov.

Pt100 je po svojih rezultatih (točnost – stabilnost) vsekakor upravičil sloves najbolj uporabljane tipala za merjenje temperature v industriji. Glede na naše zahteve in možnosti pa potrebuje preveč mikrokrmilniških vhodov.

Termočlen je med vsemi preizkušenimi tipali najbolj specifičen oziroma namenjen najbolj specifični uporabi, kot so merjenja izredno visokih temperatur, merjenja v širokih merilnih območjih in merjenja zelo majhnih površin. Nič od tega ne spada v zahteve našega merjenja in je zato in tudi zaradi majhne točnosti v našem primeru najbolj neprimerno tipalo.

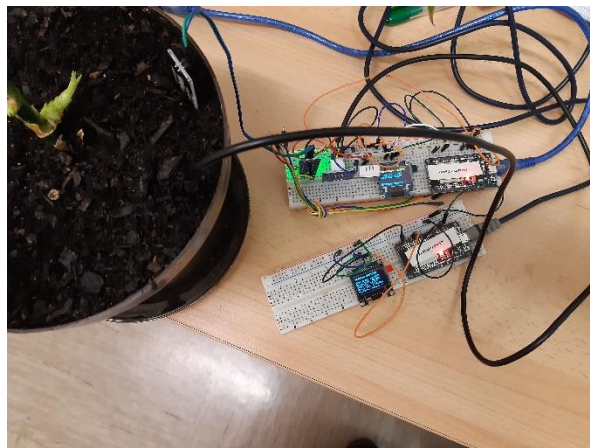
Pri podajanju točnosti meritve z merilnim pretvornikom bi morali pri napaki dobljenega rezultata upoštevati merilno negotovost (pogrešek) pretvornika in tipala. V nekaterih primerih se ta očitno sešteva. Za termočlen podatka točnosti in nelinearnosti nismo našli. To je verjetno treba pripisati dejstvu, da smo uporabili termočlen iz najnižjega cenovnega razreda. K slabemu rezultatu termočlena pri 0 °C so verjetno nekaj prispevali tudi parazitski termočleni.

Zaključek

Izbrano tipalo DS18B20 smo preizkusili tudi v poizkusni meritvi z uporabo mikrokrmilnika ESP32 z WiFi prenosom podatkov. Tudi pri merjenju z uporabo krmilnika ESP32 se je tipalo DS18B20 zelo dobro izkazalo.



Slika 22: Šolski rastlinjak, ki ga želimo avtomatizirati



Slika 23: Prototip merjenja temperature in vlage zemlje z ESP32

- [1] PREDAVANJE_6_Merjenje temperature 1del.pdf
Dostopno na spletu (12. 2. 2023): http://lrmte.fe.uni-lj.si/lrmte/slo/UNIVSS/daja_pret/PREDAVANJE_6_Merjenje%20temperature_1del.pdf
- [2] Interfacing LM35 Temperature Sensor with Arduino
Dostopno na spletu (12. 2. 2023): <https://lastminuteengineers.com/lm35-temperature-sensor-arduino-tutorial/>
- [3] Interfacing DS18B20 1-Wire Digital Temperature Sensor with Arduino
Dostopno na spletu (12. 2. 2023): <https://lastminuteengineers.com/ds18b20-arduino-tutorial/>
- [4] Interfacing Multiple DS18B20 Digital Temperature Sensor with Arduino
Dostopno na spletu (18. 2. 2023): <https://lastminuteengineers.com/multiple-ds18b20-arduino-tutorial/>
- [5] Adafruit MAX31865 RTD PT100 or PT100 Amplifier
Dostopno na spletu (18. 2. 2023): <https://learn.adafruit.com/adafruit-max31865-rtd-pt100-amplifier?view=all>
- [6] MAX6675: How to Measure Extreme Temperatures with Arduino
Dostopno na spletu (18. 2. 2023): <https://www.best-microcontroller-projects.com/max6675.html>
- [7] Arduino, Thermocouples, MAX31855K (vs MAX6675) and SPI – The Fine Points
Dostopno na spletu (18. 2. 2023): <https://www.youtube.com/watch?v=1xHdYEEETiM>
- [8] Faulty Chinese MAX31855K Modules: Fake Chips? No! Just a Capacitor Missing!
Dostopno na spletu (18. 2. 2023): <https://www.youtube.com/watch?v=PywHVgJAMu8&t=407s>
- [9] Texas Instruments; LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors
Dostopno na spletu (12. 2. 2023): http://www.sophphx.caltech.edu/Physics_5/Data_sheets/lm35.pdf
- [10] DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer
Dostopno na spletu (12. 2. 2023): <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf>
- [11] MAX31865 RTD-to-Digital Converter
Dostopno na spletu (12. 2. 2023): <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/max31865.pdf>
- [12] MAX6675 Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0 °C to +1024 °C)
Dostopno na spletu (12. 2. 2023): <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/max31865.pdf>
- [13] MAX31855 Cold-Junction Compensated Thermocouple-to-Digital Converter
Dostopno na spletu (12. 2. 2023): <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/max31855.pdf>
- [14] Cenik Arissi; Sandi Pucelj s. p.
Dostopno na spletu (12. 2. 2023): <https://www.arissi.eu>

Avtorstvo slikovnega materiala: Slike in fotografije, ki so prevzete iz literature, imajo na koncu naslova naveden tudi vir [navedba vira]. Ker v virih avtorji slik niso navedeni, jih tudi v naši nalogi nismo mogli imenovati. Ostali slikovni material (grafi in fotografije), ki nimajo navedenega vira, so avtorsko delo avtorjev raziskovalne naloge.