

UNIVERZITET CRNE GORE  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Telemetrijska IoT stanica za potrebe precizne  
poljoprivrede

Specijalistički rad

Kandidat:

Đurković Jovan

Mentor:

Prof. dr Stojanović Radovan

Podgorica, mart 2021

UNIVERZITET CRNE GORE

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

AKADEMSKE SPECIJALISTIČKE STUDIJE – SMJER ELEKTRONIKA

Broj \_\_\_\_\_

Podgorica, \_\_\_\_\_ 2021. godine

# Telemetrijska IoT stanica za potrebe precizne poljoprivrede

Specijalistički rad

Datum izdavanja rada:

Podgorica, \_\_\_\_\_ 2021. godine

Mentor:

---

Prof. dr Stojanović Radovan

Datum predaje rada:

Podgorica, \_\_\_\_\_ 2021.godine

Student:

---

Đurković Jovan

## IZJAVA O SAMOSTALNOM RADU

Ovim izjavljujem da sam specijastički rad uradio samostalno, uz pomoć mentora i navedene literature.

Kandidat

---

Diplomski rad je odbranjen dana \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 2021. godine pred komisijom u sastavu:

1. \_\_\_\_\_ (predsjednik)
2. \_\_\_\_\_ (mentor)
3. \_\_\_\_\_ (član)

sa ocjenom \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_).

## Zahvalnica:

Autor se, prije svega, zahvaljuje mentoru Prof. dr Radovanu Stojanoviću za podršku u izradi ovog rada. Takođe, i kolegama iz privrede, koji su dali korisne sugestije i rade na tome da ovaj rad bude upotrebljiv, kao što je podrška od Sektora razvoja Plantaža.

Rad je dijelom podržan projektom SMART4ALL – „Self-sustained customized cyberphysical system experiments for capacity building among European stakeholders (SMART4ALL)“.

*This paper is partly supported by the project SMART4ALL – „Self-sustained customized cyberphysical system experiments for capacity building among European stakeholders (SMART4ALL)“.*



## Sadržaj

Zahvalnica:	4
Uvod .....	6
I    Osnovne cjeline sistema .....	7
II    Tehničke karakteristike.....	10
2.1 Heltec WiFi LoRa 32(V2).....	10
2.2 Izvori napajanja .....	11
2.2.1 Električna šema sistema napajanja.....	11
2.3 Korišćeni senzori .....	12
2.4 Arduino IDE .....	13
III    Protokol LoRaWAN .....	16
3.1 Osnovni podaci.....	16
3.2 Sigurnost komunikacije.....	17
3.3 Realizacija u projektu .....	17
IV    ThingSpeak .....	18
4.1 Sistem sa povratnom spregom .....	18
4.2 Filtriranje podataka.....	20
V    Senzor vlažnosti zemljišta.....	20
5.1 Provodni sistem .....	21
5.2 Kapacitivni sistem .....	22
5.3 Princip rada razvijenog kapacitivnog senzora.....	23
VI    Kalibrisanje senzora .....	25
6.1 Rezultati kalibriranja i aproksimativna kriva.....	26
6.2 Postupak mjerena .....	28
6.2.1 Vlažnost drugih rastresitih materijala.....	29
VII    Štampanje pločica UV metodom .....	29
VIII    Rezultati testiranja .....	35
Zaključak.....	43
Literatura.....	44

## Uvod

U ovom radu je opisan eksperiment telemetrijske stanice u poljoprivredi, koja mjeri temperaturu, vlažnost vazduha i vlažnost zemljišta, te podatke šalje serveru *IoT* tima, kakav je *ThingsSpeak*, kako bi se mogli pogledati na bilo kom mjestu putem interneta i povratno reagovati. Primopredajnik čine dva mikrokontrolera *WiFi LoRa 32(V2)*, proizvođača *Heltec*, koji su opremljeni protokolom za komunikaciju *LoRa*. Radi se o radijskom frekvencijsko modulisanom signalu male potrošnje, posebno namijenjenom *IoT* uređajima.

Prvi uređaj radi kao prijamnik-posrednik, u dometu je *WiFi* mreže i povezan je sa *ThingSpeak* serverom. On je posrednik u komunikaciji servera sa drugim uređajem putem *LoRa* mreže, koji se nalazi dalje izvan dometa *WiFi* signala. Na svom ekranu prikazuje informacije od značaja.

Drugi uređaj (stanica) se sastoji od: mikrokontrolera *WiFi Lora 32(V2)* sa senzorom vlažnosti i temperature *DHT11*, senzorom vlažnosti zemljišta domaće proizvodnje, solarne ploče, akumulatora i elektronskog kola za regulaciju napajanja.

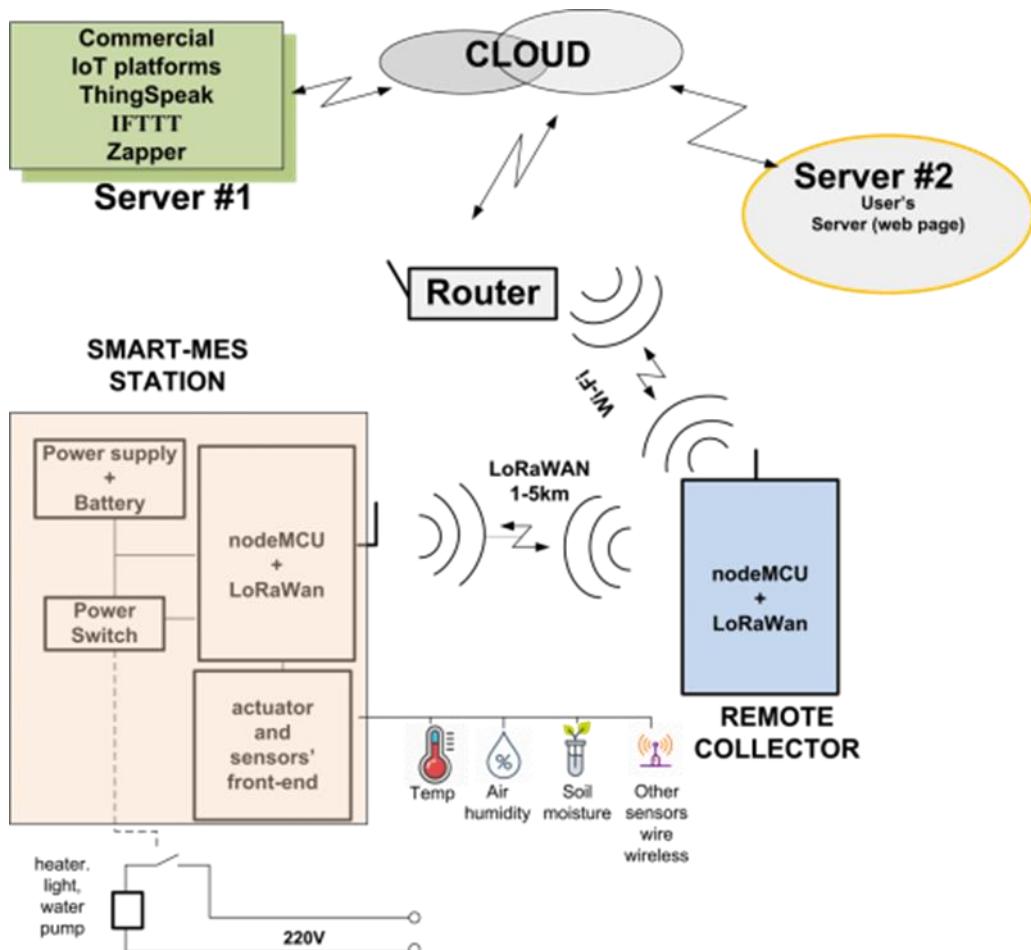
Mikrokontroleri su programirani u razvojnog okruženju *Arduino IDE*, za koje postoji zvanično podržane biblioteke od strane proizvođača.

Stanica šalje podatke prikupljene od senzora prvom uređaju putem protokola *LoRa*; dok on podatke prosljeđuje serveru putem *WiFi* mreže. Omogućena je i povratna komunikacija na zahtjev servera, tako što stanica prima kontrolne vrijednosti koje se zadaju na serveru, i u skladu sa tim pokreće ili obustavlja odgovarajuće radnje (npr. upravljanje sistemom za navodnjavanje ili održavanje vlažnosti i temperature). Kao rezultat su dati grafički prikazi promjene temperature i vlažnosti, što korisnicima može dati bolji uvid u stanje na poljoprivrednom imanju i, u skladu s tim, biljke mogu dobiti odgovarajući tretman.

Prvo poglavje opisuje fizičko-funkcionalne cjeline sistema. U drugom poglavlju su opisane tehničke karakteristike korišćenih uređaja i opreme, s posebnim osvrtom na sistem za napajanje i softversku pripremu rada sa mikrokontrolerom. U trećem poglavlju su dati osnovni podaci o protokolu *LoRa*, čije su osobine značajne za ovaj projekat. U četvrtom poglavlju je opisana internetska platforma *ThingSpeak* koja je zaslužna za daljinsko pregledanje i upravljanje. Peto poglavje sadrži podatke o načinu rada kapacitivnih senzora, dok je u šestom opisan korišćeni postupak kalibracije. Sedmo poglavje sadrži opis i uputstvo izrade štampanih ploča UV metodom, kojim je proizvedena ploča za kapacitivni senzor. U posljednjem, osmom poglavlju, prikazani su rezultati mjerenja u vidu grafika i tabele.

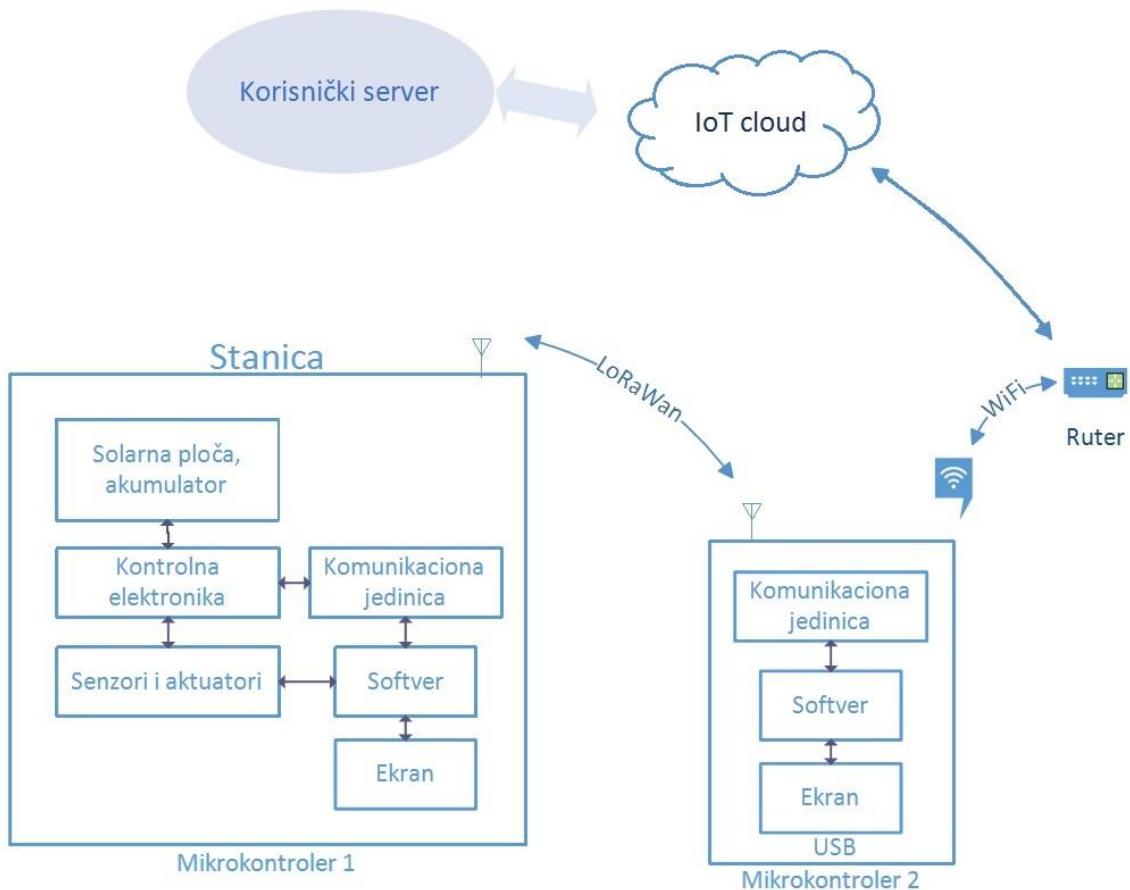
## I Osnovne cjeline sistema

Sistem se može podijeliti na više funkcionalnih cjelina koje su međusobno povezane u jedan složeni sistem, kao što je prikazano na slici 1.1. Senzori prikupljaju podatke od značaja kao što su: temperatura, vlažnost vazduha, vlažnost tla, intenzitet svetlosti itd. i šalju ih na STANICU koja se sastoji od: *nodeMCU* (moderni umreženi mikroprocesor), *LoRaWAN* komunikacionog modula, aktuatora i prednjeg kraja senzora, napajanja zasnovanog na autonomnom sistemu solarnih baterija i izlaznom (prekidaču) modulu. Prethodno obrađeni podaci su poslati putem *LoRaWAN*-a DALJINSKOM KOLEKTORU, koji dalje putem *WiFi*-ja i rutera (*hot spot*) komunicira sa *CLOUD*-om, na kojem su integrisane komercijalne IoT platforme poput *ThingSpeak*, *IFTTT*. Kao rezultat, izmjerene veličine se mogu pratiti putem interneta bilo gdje i bilo kada, analizirati i povratno reagovati.



Slika 1.1: Funkcionalne cjeline sistema

Principijelna šema stanice je data na slici 1.2.



Slika 1.2: Principijelna šema

Ono što se na prvi pogled vidi jesu dva uređaja između kojih se održava bežična komunikacija putem mreže *LoRaWAN*. Desno je prikazan manji, priručni, uređaj čiji su glavni zadaci veza sa serverom i prikazivanje trenutnih rezultata mjerjenja. Njegov softver vodi računa o protokolu za komunikaciju i o sinhronizaciji.

Uređaj prikazan lijevo predstavlja stanicu koja se nalazi napolju. Ima isti softverski dio, i razlikuje se po hardverskoj implementaciji. Neophodno je bilo obezbijediti napajanje, što je urađeno pomoću punjivog akumulatora i solarnog izvora energije; tako da može da radi samostalno tokom dužeg vremena. Kontrolna elektronika je zadužena da taj dio radi ispravno, što je detaljnije opisano u poglavljju 2.2.1.

Senzori ostvaruju vezu sa spoljašnjim svjetom, i ovdje su upotrijebljena dva senzora koja mjere tri fizičke veličine. Pošto mikrokontroler ima osamnaest analogno-digitalnih konvertora, moguće je priključiti najviše isto toliko senzora. Na slici 1.2 je prikazan fizički izgled pojedinačnih djelova sistema.



Slika 1.2: Stanica u vinogradu (lijevo), priručni uređaj (desno) i unutrašnjost kutije na stanicu (ispod)

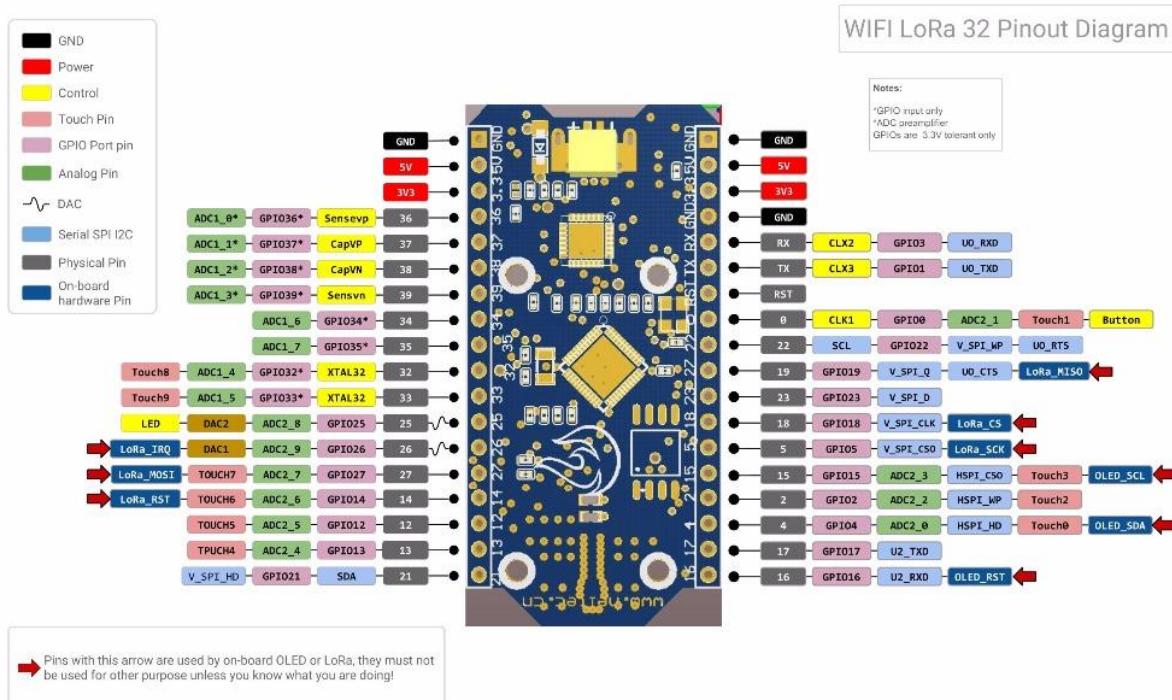
## II Tehničke karakteristike

### 2.1 Heltec WiFi LoRa 32(V2)

Pokreće ga dvojezgarni procesor *ESP32* sa taktom od 240 MHz (*Tensilica LX6 dual-core*). Opremljen je: *WiFi*, *Bluetooth* i *LoRa* standardima za bežičnu komunikaciju, sa gornjom granicom izlazne snage od 19dB za komunikaciju putem protokola *LoRa*, sa naznačenim dometom od 5km. Mikrokontroler posjeduje tri *UART* kola (*universal asynchronous receiver-transmitter*) za serijsku komunikaciju, po dva *SPI* (*serial peripheral interface*) i *I2C* (*inter-integrated circuit*), *I2S* (*inter-ic sound*); osamnaest dvanaestobitnih *ADC* ulaza i dva osmobilna *DAC* izlaza, 22 *GPIO* (general-purpose input/output) i šest *GPI* pinova. Raspored pinova je prikazan na slici 2.1.

Ima 8MB *SPI Flash* memorije i 520KB interne *SRAM* memorije; jedan mikro *USB* priključak, *IPEX* priključak za antenu i ukupno 36 pinova za povezivanje sa spoljašnjim uređajima. Ima i ugrađeni *OLED* displej veličine 0,96 inča.

Potrošnja struje u režimu *deep sleep* iznosi 800 $\mu$ A, dok se radna temperatura kreće u opsegu od -40 do 80 °C.



Slika 2.1: Dijagram pinova

Po karakteristikama značajno nadmašuje popularne mikrokontrolere Arduino, što ga čini pogodnim za zahtjevnije primjene gdje je potrebno voditi računa o većem broju zadataka.

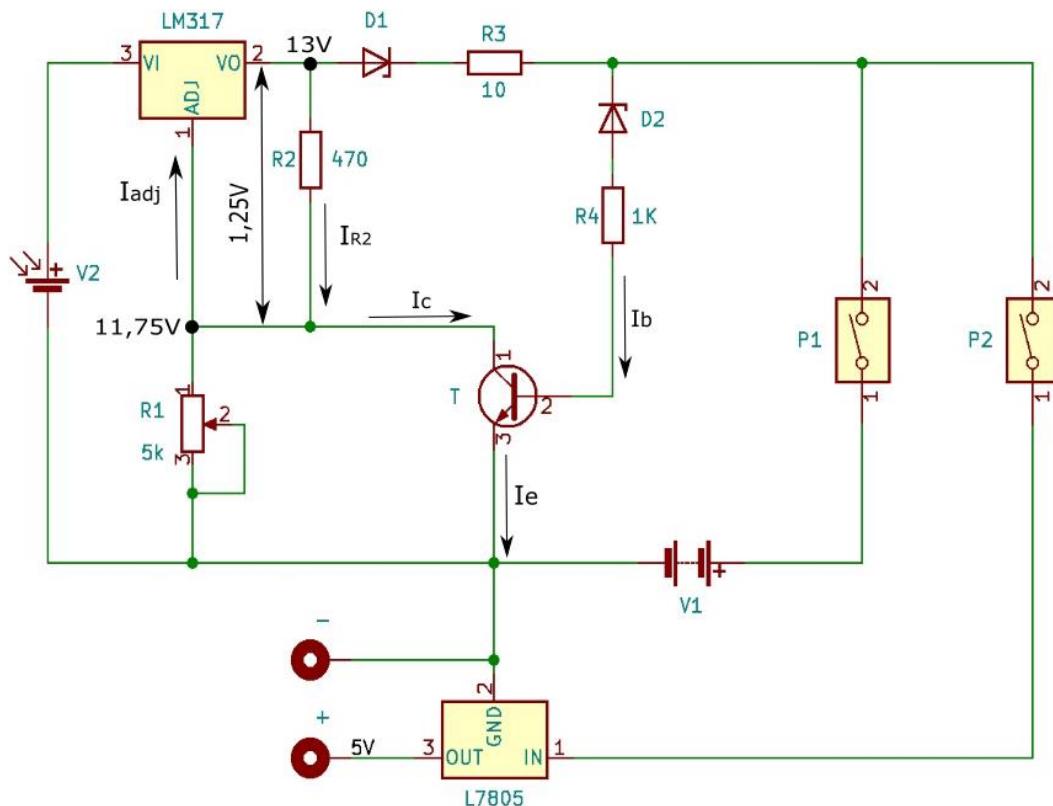
## 2.2 Izvori napajanja

U projektu je korišćen olovni akumulator proizvođača *Ultracell* – UL 4-12 (12V 4AH/20HR) i solarna ploča snage 5W koja na sunčevoj svjetlosti daje napon od oko 20V.

### 2.2.1 Električna šema sistema napajanja

Sistem se kontroliše pomoću dva prekidača – P1 i P2 (slika 2.2). Prekidač P1 uključuje akumulator u kolo, čime je omogućeno i njegovo punjenje. Prekidač P2 upravlja radom regulatora napona L7805, što određuje da li će na njegovom izlazu biti napona. Regulator LM7805 na izlazu daje konstantni napon od 5V i struju 1,5A za vrijednost ulaznog napona od 7-25V, pa je zato savršen za rad za mikrokontrolerima.

Drugi regulator napona koji je korišćen je LM317, i on služi za spuštanje napona solarne ploče na prihvatljivi nivo za punjenje akumulatora. U stanju je da na izlazu da napon od 1,25-37V i struju veću od 1,5A, a podešava se pomoću samo dva otpornika – u ovom slučaju otpornikom R2 i potenciometrom R1. Podešen je tako da daje napon od 13V, koji bi nakon slabljenja na Cenerovoj diodi D1 od oko 0,4V nadjačao napon na akumulatoru i tako započeo njegovo punjenje, ujedno napajajući regulator L7805.



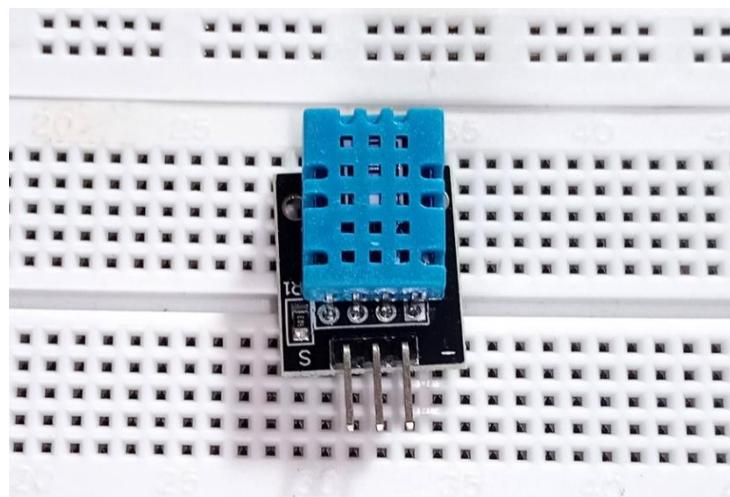
Slika 2.2: Električna šema sistema za napajanje

Dioda D2 spušta napon ka bazi za 8V. Da bi tranzistor T proveo, pad napona na otporniku R4 ne smije da bude veći od 4V, što odgovara struji baze od 4mA. Struja ladj može da se kreće u opsegu od 50-100 $\mu$ A, dok je napon na otporniku R2 (između priključaka ADJ i VO) konstantan i iznosi 1,25V (dato je u specifikacijama regulatora), što osigurava da napon na kolektoru bude uvijek veći od napona na bazi (i u ovom slučaju jednak 11,75V). To znači da tranzistor radi u direktnom aktivnom režimu ( $V_c > V_b > V_e$ ). U tom slučaju možemo zanemariti struju kroz granu u kojoj se nalazi baza tranzistora, zbog čega se jasnije vidi da je njegova uloga odvođenje viška izlazne struje na masu, kako bi se akumulator punio sporije i tako duže trajao.

## 2.3 Korišćeni senzori

Posljednje vrijeme karakteriše sve veća popularnost i pristupačnost mikrokontrolerske elektronike, koja lako nalazi put do: amatera, studenata, pa i profesionalaca. Velikim izborom mikrokontrolera (*Arduino*, *ESP32*, *Raspberry Pi...*) je obuhvaćen široki spektar različitih primjena. Tako se mogu naći najrazličitiji senzori i periferije po niskim cijenama. Od komercijalnih rješenja je u ovom radu korišćen **senzor DHT11** koji mjeri temperaturu i vlažnost vazduha. **Senzor vlažnosti zemljišta** će biti detaljnije opisan u poglavljju 5 jer predstavlja originalno rješenje, nastalo tokom razvoja ovog rada.

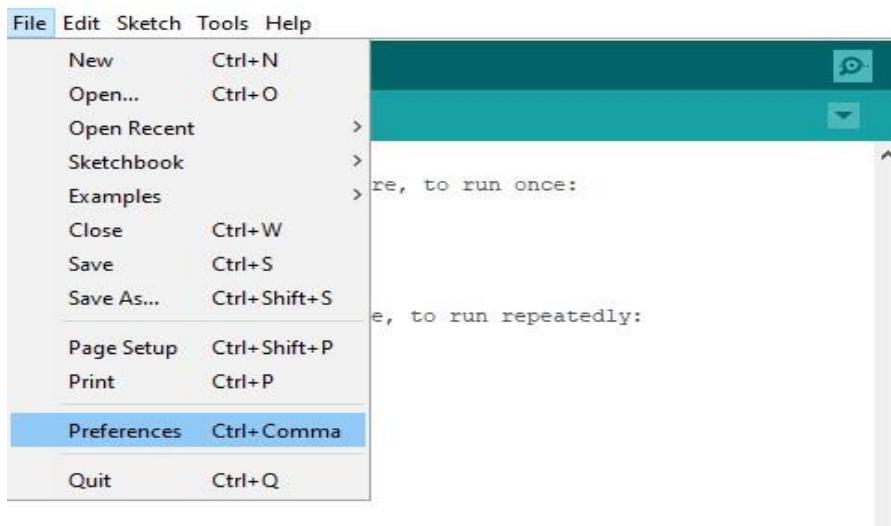
Senzor *DHT11* spada u digitalnu vrstu senzora. Sadrži kapacitivni senzor vlažnosti i termistor za mjerjenje okolnog vazduha, i prenosi digitalne podatke putem za to namijenjene nožice (pina). On može da se napaja naponom u opsegu od 3-5V, što podržavaju svi poznatiji mikrokontroleri. Opseg mjerjenja temperature iznosi od 0-50 °C uz tačnost od  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , a opseg vlažnosti iznosi 20-80% pri tačnosti od 5%. Podaci se na njemu mogu očitati u razmaku od najmanje dvije sekunde, a njegova veličina iznosi 15,5 x 12 x 5,5 mm. Dolazi u kućištu sa tri ili četiri kontakta – od kojih se tri koriste, i to dva za napajanje i jedan za prenos podataka. Nešto bolji po pitanju performansi je njegov nasljednik – *DHT22*, koji je i skuplji. Na slici 2.3 je prikazan senzor *DHT11* na eksperimentalnoj ploči.



Slika 2.3: Senzor DHT11

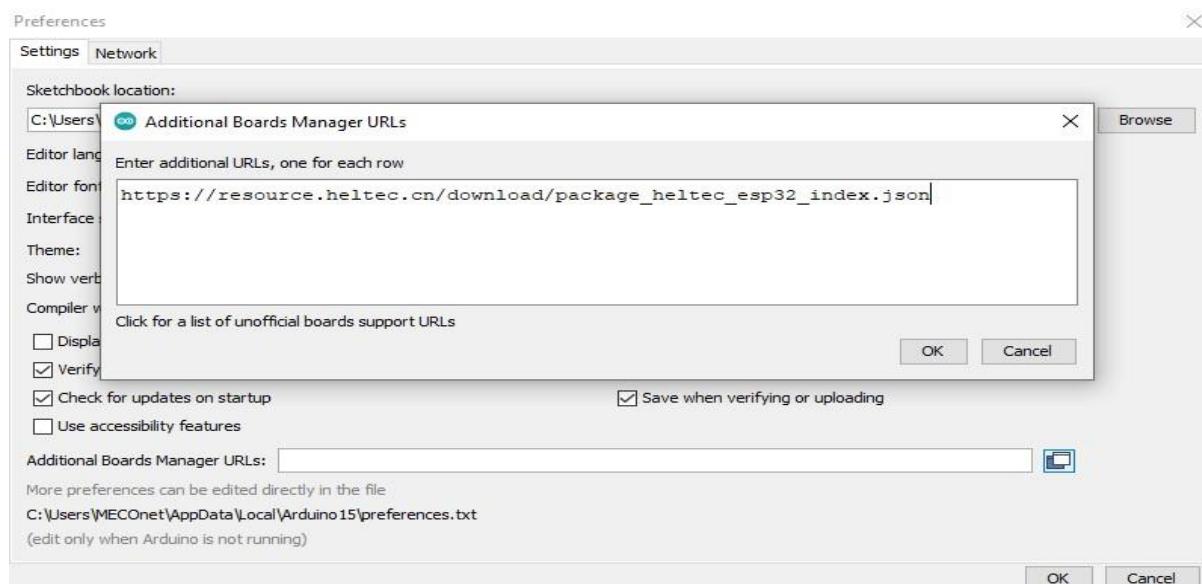
## 2.4 Arduino IDE

Najprije je potrebno instalirati razvojno okruženje *Arduino IDE* (*engl. Integrated Development Environment – integrisano razvojno okruženje*) za odgovarajući operativni sistem, prateći uputstvo sa zvaničnog sajta: <https://www.arduino.cc/en/software>. Softver je besplatan, uz mogućnost doniranja proizvođaču. Instalacija je jednostavna i čista, i ne sadrži reklamiranje dodatnog softvera.



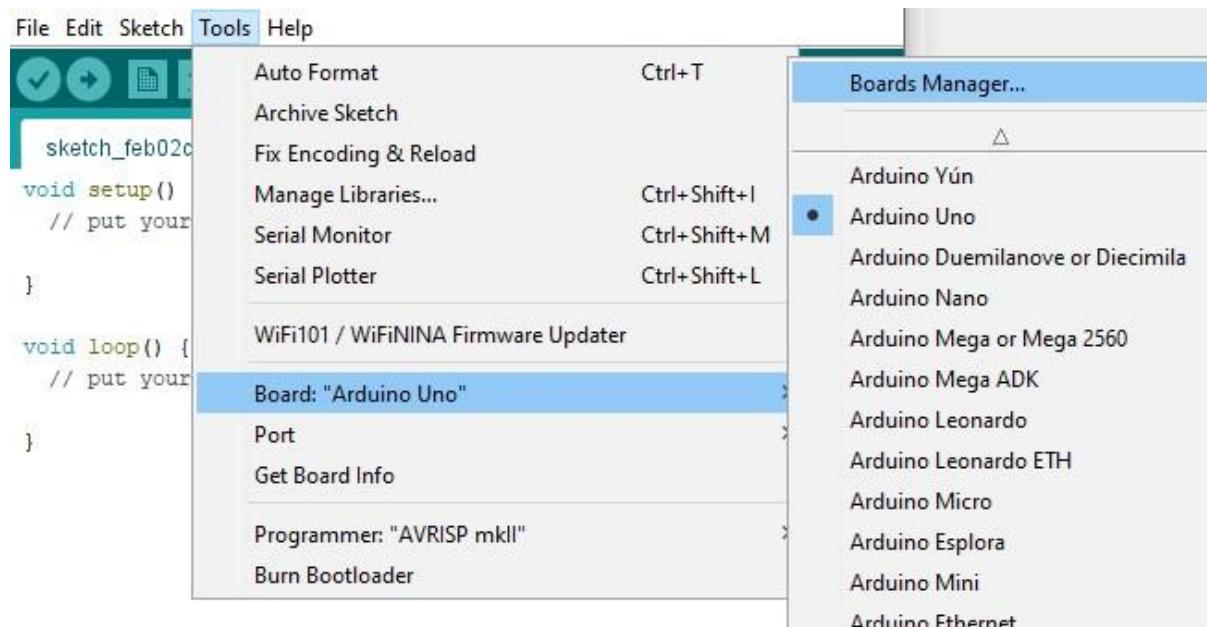
Slika 2.4: Pristupanje podešavanjima

Da bi mikrokontroler *LoRa 32(V2)* mogao da se programira u razvojnem okruženju *Arduino*, potrebno je instalirati ploču unutar upravljača pločama (*Arduino Boards Manager*). On se nalazi u meniju *File > Preferences* (slika 2.4). Zatim u polju *Additional Boards Manager URLs* (Slika 2.5) treba unijeti sledeću adresu: [https://resource.heltec.cn/download/package\\_heltec\\_esp32\\_index.json](https://resource.heltec.cn/download/package_heltec_esp32_index.json).



Slika 2.5: Unošenje adrese za odgovarajuću ploču

Nakon toga se može instalirati ploča *Heltec ESP32*, pritiskom na *Tools > Board > Boards Manager* (Slike 2.5 i 2.7). U polju za pretragu unijeti *Heltec ESP32*, i pritiskom na dugme *Install* započinje instalacija koja može potrajati nekoliko minuta.

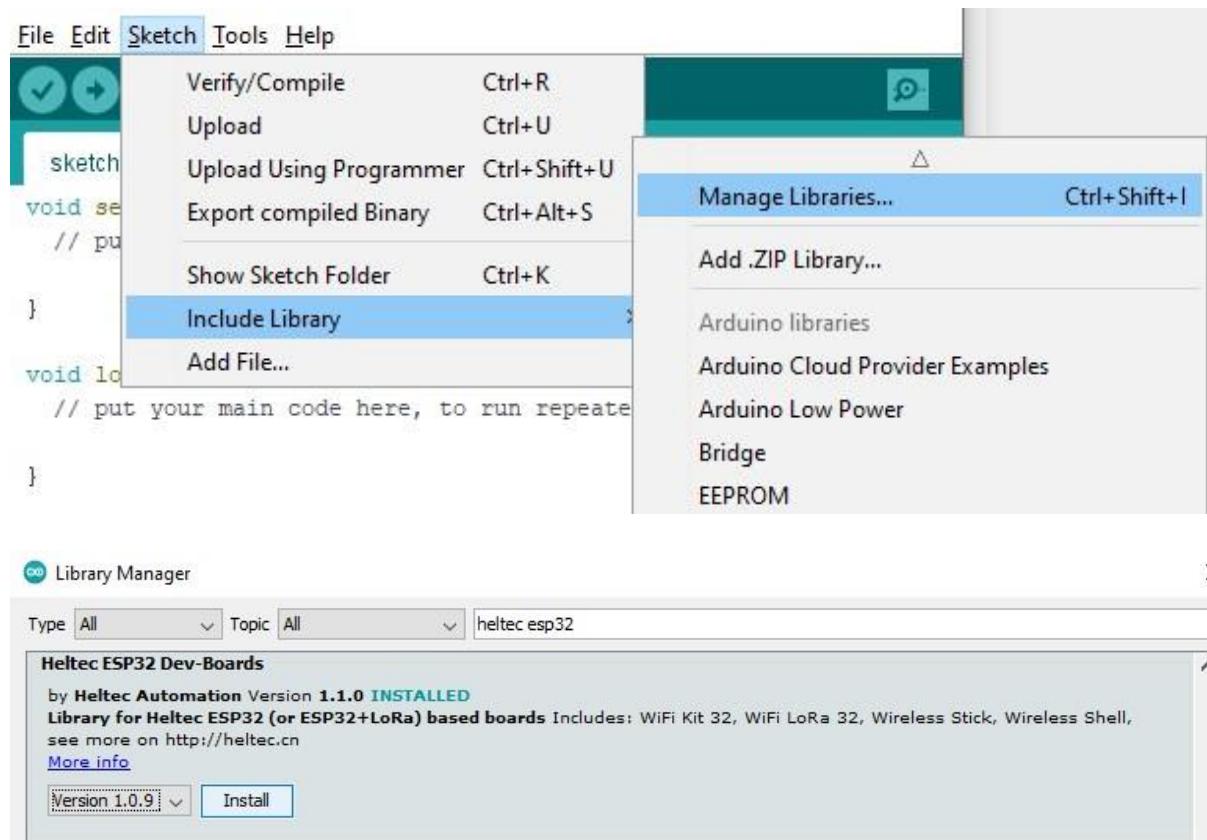


Slika 2.6: Pristupanje upravljaču pločama



Slika 2.7: Upravljač pločama

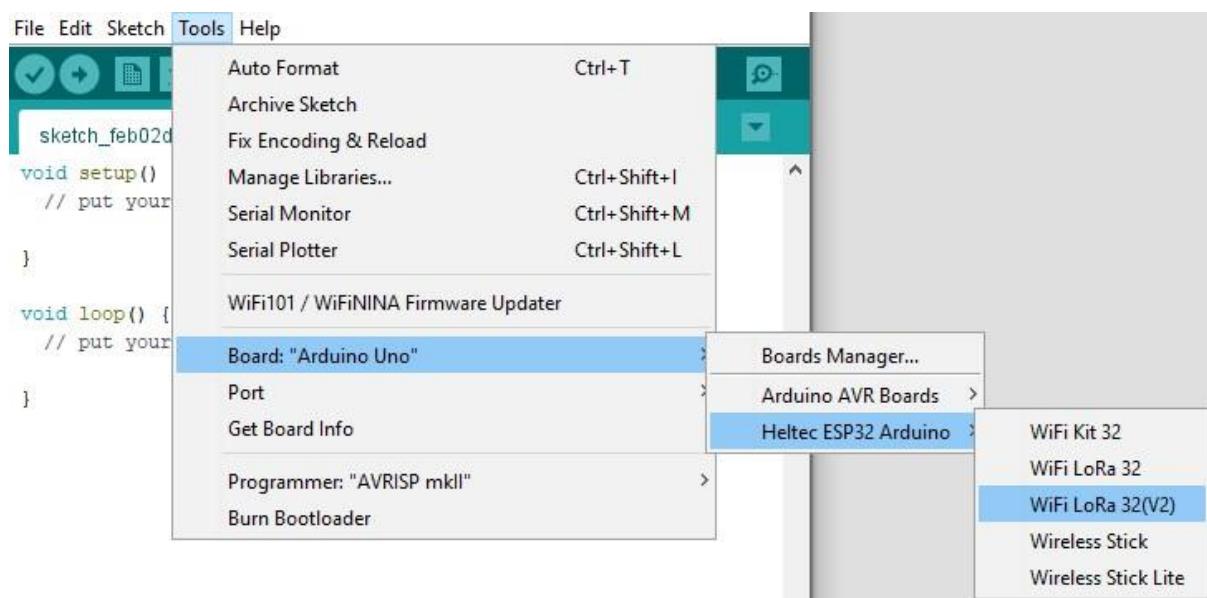
Naredni korak je instaliranje biblioteke *Heltec ESP32*. Odabirom *Sketch > Include Library > Manage Libraries*, dolazi se do upravljača bibliotekama (*Library Manager*) – Slika 2.8, koji je sličan upravljaču pločama (*Boards Manager*). Unosom *Heltec ESP32* u polju za pretragu, filtriraće se biblioteka *Heltec ESP32 Dev-Boards by Heltec Automation*. Pritiskom na dugme *Install*, biće instalirana vrlo brzo.



Slika 2.8: Upravljač bibliotekama

Kada je i to uspješno završeno, ploča *LoRa 32(V2)* se može programirati kao i bilo koja *Arduino* ploča, odabirom na *Tools > Board > WiFi LoRa 32(V2)* i odgovarajućeg porta, što je dato na slici 2.9.

Razlika je jedino u rasporedu i namjeni pinova i funkcionalnosti koje karakterišu svaku ploču, pa programske kod treba prilagoditi datim uslovima i mogućnostima samog mikrokontrolera.



Slika 2.9: Odabir ploče WiFi LoRa 32(V2)

Uputstvo je pisano za verziju razvojnog okruženja *Arduino 1.8.13*, dok kod drugih verzija može doći do neznatnih odstupanja u rasporedu komandi u grafičko-korisničkom interfejsu.

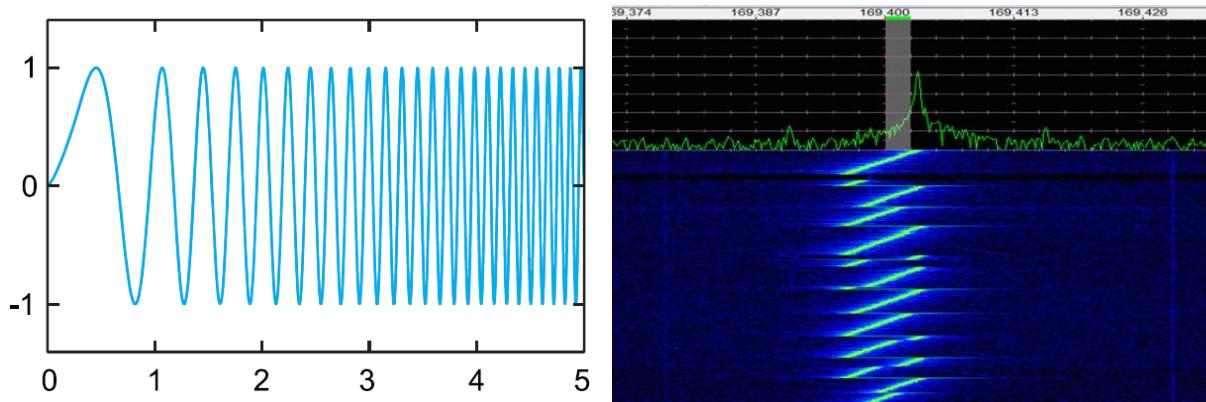
### III Protokol LoRaWAN

#### 3.1 Osnovni podaci

*LoRaWAN* je *WAN* protokol male snage (*Low Power Wide Area Networking*), osmišljen sa ciljem bežičnog povezivanja na internet uređaja sa baterijskim izvorom napajanja, i cilja glavne zahteve *Internet of Things (IoT)*, kao što su: dvosmjerna komunikacija, bezbjednost prenosa podataka, mobilnost i usluge lokalizacije.

Iza njega stoji neprofitno udruženje otvorenog tipa *LoRa Alliance*, koje je počelo sa radom u martu 2015. godine.

*LoRa* je fizički sloj bežične modulacije koji se koristi za stvaranje posrednika za komunikaciju velikog opsega. Mnogi prevaziđeni bežični sistemi koji su u širokoj upotrebi koriste frekvencijsku modulaciju (*frequency shift keying – FSK*) kao fizički nivo, jer je ona veoma pogodna za malu potrošnju. *LoRa* je zasnovan na "cvrkutnoj" sprektralnoj modulaciji (*chirp spread spectrum modulation – CSS*), koja ima iste karakteristike male snage kao i FSK modulacija, dok značajno povećava domet komunikacije. CSS se već decenijama koristi u vojnoj i svemirskoj komunikaciji zbog velike daljine koja se postiže i otpornosti na smetnje, a *LoRa* je prva jeftina implementacija namijenjena komercijalnoj upotrebi.



Slika 3.1: Prikaz chirp-a u vremenskom (lijevo) i frekventnom (desno) domenu; primjer kodirane poruke.

Preuzeto iz literature [11]

Kao što se vidi u frekvencijskoj analizi dатој на слици 3.1, ključni parametri ovog signala су: почетна i krajnja učestanost i brzina njene promjene.

Ključne odlike tehnologije *LPWAN* (*low-power wide-area network*) su:

- Arhitektura mreže
- Komunikacioni opseg
- Trajanje baterije ili mala potrošnja
- Otpornost na smetnje
- Kapacitet mreže (najveći broj čvorova unutar mreže)
- Bezbjednost mreže
- Jednosmjerna i dvosmjerna komunikacija
- Raznovrsnost primjena u kojima se upotrebljuje

### 3.2 Sigurnost komunikacije

*LoRaWan* posjeduje dva sloja bezbjednosti: na nivou mreže i na nivou aplikacije. Mrežna bezbjednost garantuje autentičnost čvora u mreži, dok aplikativni sloj bezbjednosti osigurava da operator mreže nema pristup aplikativnim podacima krajnjeg korisnika. Koristi se metod kriptovanja *AES* uz razmjenu ključa pomoću identifikatora *IEEE EUI64*.

### 3.3 Realizacija u projektu

Kako je sistem zamišljen tako da se jedan uređaj nalazi u polju nepokriven *WiFi* signalom, dok drugi posreduje u komunikaciji sa serverom – zbog zadavanja komandi putem servera koje se

izvršavaju na uređaju u polju, potrebno je bilo realizovati dupleks sistem komunikacije. Dakle, između uređaja postoji dvosmjerna komunikacija protokolom *LoRa*.

Što se tiče programskog rješenja, postoje dvije mogućnosti: bez blokiranja i sa blokiranjem (*callback*). U prvom slučaju se neprekidno osluškuje moguća dolazeća poruka, čak i tokom slanja, pa je ostvariva istovremena dvosmjerna komunikacija. U drugom slučaju se ne osluškuje dolazna poruka dok se odašilje, pa je u ovom projektu korišćen metod bez blokiranja. Za oba postupka se mogu naći gotovi primjeri: *File > Examples > LoRa*, zatim: *LoRaDuplex* ili *LoRaDuplexCallback*.

Iako je u istovremena dvosmjerna komunikacija moguća, zbog zauzetosti procesora drugim zadacima (mjerjenja, kombinovanje poruke, kontrola, veza sa serverom, itd...), bilo je potrebno povesti računa o sinhronizaciji slanja i primanja poruka, kako bi uspješnost prijema bila što veća.

## IV ThingSpeak

*ThingSpeak* je *IoT* analitička platforma koja omogućava: sakupljanje, vizualizaciju i analiziranje strimova podataka na *cloud*-u. Podržan je *MATLAB* kod za obradu podataka na serveru. *ThingSpeak* može koristiti inženjerima i naučnicima za prototipovanje i izgradnju *IoT* sistema bez postavljanja servera i razvijanja *web* softvera.

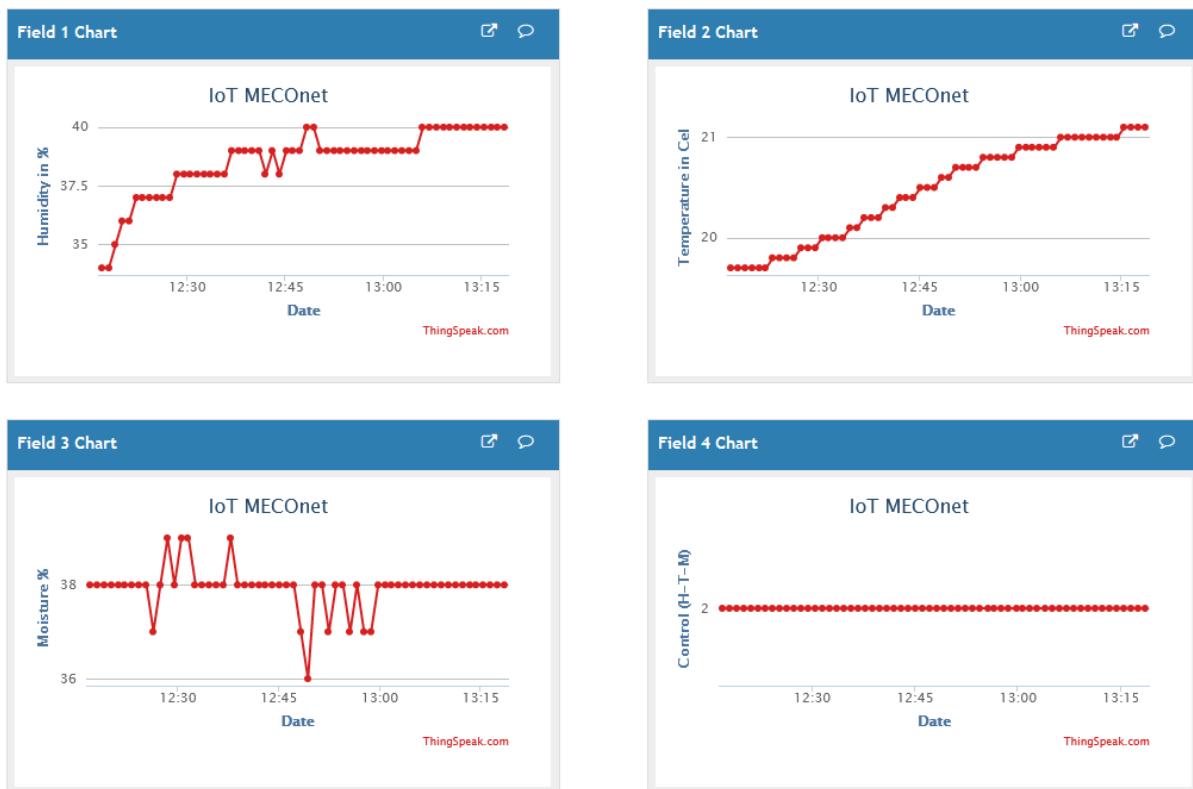
Podaci koje prikuplja senzor se mogu slati *ThingSpeak* serveru direktno sa mikrokontrolera koji podržava: *TCP/IP*, *HTTP* ili *MQTT* protokol.

### 4.1 Sistem sa povratnom spregom

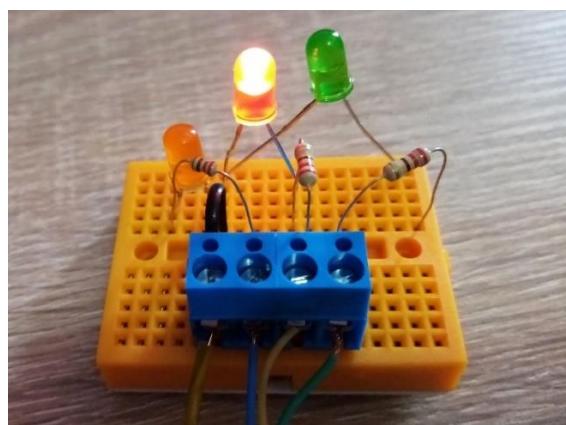
Na kanalu *ThingSpeak* se nalaze tri grafika koja prikazuju mjerene veličine u realnom vremenu, tako da se mogu pratiti i analizirati nastale promjene. Četvrti grafik je takođe pokaznog karaktera, i on služi za prikazivanje kontrolnih stanja, tj. uređaja koji bi se uključivali i isključivali na osnovu razlike između zadatih i izmjerjenih vrijednosti. Grafici su dati na slici 4.1.

Za zadavanje vrijednosti se koristi polje *Send Command*, gdje se zadaje string u obliku A:BC, gdje A predstavlja broj kanala kome je namijenjena komanda, dok je BC brojna vrijednost kojom se poredi. Na primjer, ako trenutna temperatura (drugi kanal) iznosi 23°C, a zadata je komanda 2:30 – tada bi se uključio potencijalni sistem za grijanje dok temperatura ne bi dostigla 30°C, a u kontroli bismo vidjeli broj 2 (010).

Mikrokontroler koji održava vezu sa WiFi mrežom redovno provjerava server na nove zadate poruke, koje prosljeđuje putem LoRa mreže drugom mikrokontroleru. Na njemu se vrši upoređivanje vrijednosti i, sljedstveno tome, paljenje ili gašenje odgovarajućih uređaja – u ovom slučaju prostih LED dioda radi pokazivanja (slika 4.2). Zatim se promijeni i odgovarajući kontrolni bit i pošalje nazad prvom mikrokontroleru, koji ažurira *ThingSpeak* server. Na ovaj način je postignuta napredna funkcionalnost i fleksibilnost sistema, što je kod savremenih kućnih i industrijskih IoT uređaja obavezna stavka.



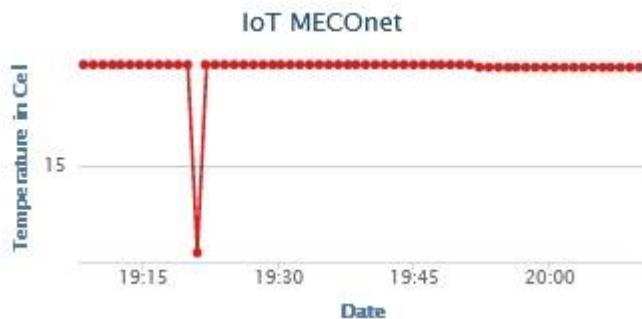
Slika 4.1: Dijagrami na kanalu ThingSpeak koji predstavljaju: vlažnost vazduha, temperaturu vazduha, vlažnost zemljišta i kontrolni broj



Slika 4.2: Vizualizacija upravljačkih signala na stanicu – jedan od potencijalnih uređaja bi bio pušten u pogon

## 4.2 Filtriranje podataka

S obzirom na to da su sve poruke dvostruko šifrovane AES kriptografskim algoritmima, ukoliko dođe do greške u komunikaciji – pristigla poruka će biti neprepoznatljivo različita od one namijenjene (npr. umjesto čitljivog teksta se pojavljuju nasumični znaci). Što je veća udaljenost između uređaja – veća je i vjerovatnoća pogrešnog prijema, do čega uvijek i dođe nakon izvjesnog vremena. Kako je paket koji se šalje u ovom projektu binarni, kombinujući više brojnih vrijednosti u jedan binarni niz, to bi ThingSpeak server na pogrešnu (haotičnu) poruku reagovao upisivanjem nule ili neke nasumične vrijednosti, što je prikazano na slici 4.3.



*Slika 4.3: Odstupanje od stvarnih vrijednosti uslijed greške u komunikaciji*

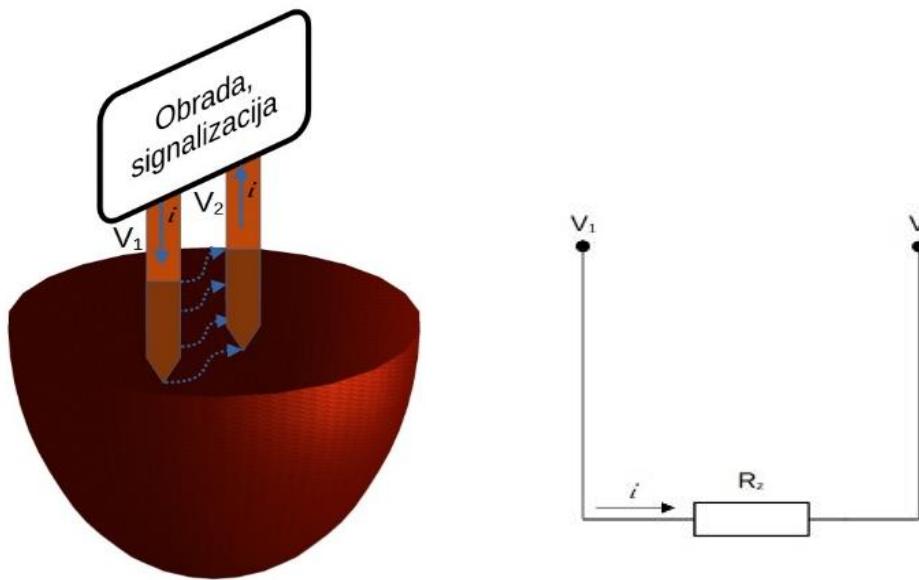
Pošto je ovakva promjena očitavanja fizički malo vjerovatna, i, u suštini, netačna, potrebno je filtrirati brojne vrijednosti u skladu sa očekivanim. Na primjer, ne očekuju se nagli pojedinačni skokovi ili izlazak iz opsega vrijednosti koje bilježi senzor. Filtar je moguće podesiti na serveru, koristeći Matlab, ili na samom mikrokontroleru koji komunicira sa serverom. U ovom projektu je izvršena provjera ispravnog prijema poruke kod mikrokontrolera. Ako se sve brojne vrijednosti nalaze u očekivanom opsegu, poruka je označena kao ispravna i može se poslati na server i pamti se u lokalnoj promjenjivoj. Ukoliko nije, umjesto nje će se poslati posljednja ispravno primljena poruka, koja je prethodno zapamćena. Ako se, umjesto toga, slanje poruke na server preskoči, dvije susjedne tačke na grafiku bi se povezale linijom, sa odgovarajućom vremenskom razlikom.

## V Senzor vlažnosti zemljišta

Za potrebe ovog rada, razmatrano je više pristupa i komercijalnih rješenja za mjerjenje procenta vlažnosti zemljišta. U elektro struci se ono zasniva na jednom od dva principa: provodnom i kapacitivnom. Zbog brojnih prednosti je izabran kapacitivni senzor, a njegova pločica je štampana *UV* metodom.

## 5.1 Provodni sistem

Kod ovog sistema između elektroda protiče električna struja, čiji je intenzitet direktno srazmjeran količini vode koja se nalazi u zemlji. Problem se svodi na mjerjenje otpornosti između elektroda, što je u principu najjednostavnije rješenje. Međutim, velika mana ovakvog sistema jeste osjetljivost na koroziju – upravo zbog izlaganja metalnih djelova vlazi i hemijskim dodacima u zemljištu. Vremenom su očitavanja sve nepouzdanija, dok, posle izvjesnog vremena i istrošenosti elektroda, senzor postaje neupotrebljiv. Ilustracija i princip rada su dati na slici 5.1.



Slika 5.1: Postupak mjerjenja vlažnosti zemljišta provodnim sistemom

Rezultat mjerjenja se dobija mjeranjem pada napona na ekvivalentnom otporniku  $R_z$ . Ako je poznat napon  $V_1$ , tada se na osnovu mjerjenja napona  $V_2$  rezultat računa po jednačini 5.1.

$$Vl = \frac{V_2}{V_1} \cdot 100 [\%]$$

Jednačina 5.1: Računanje procenta vlažnosti na osnovu početnog i izmjereno napona

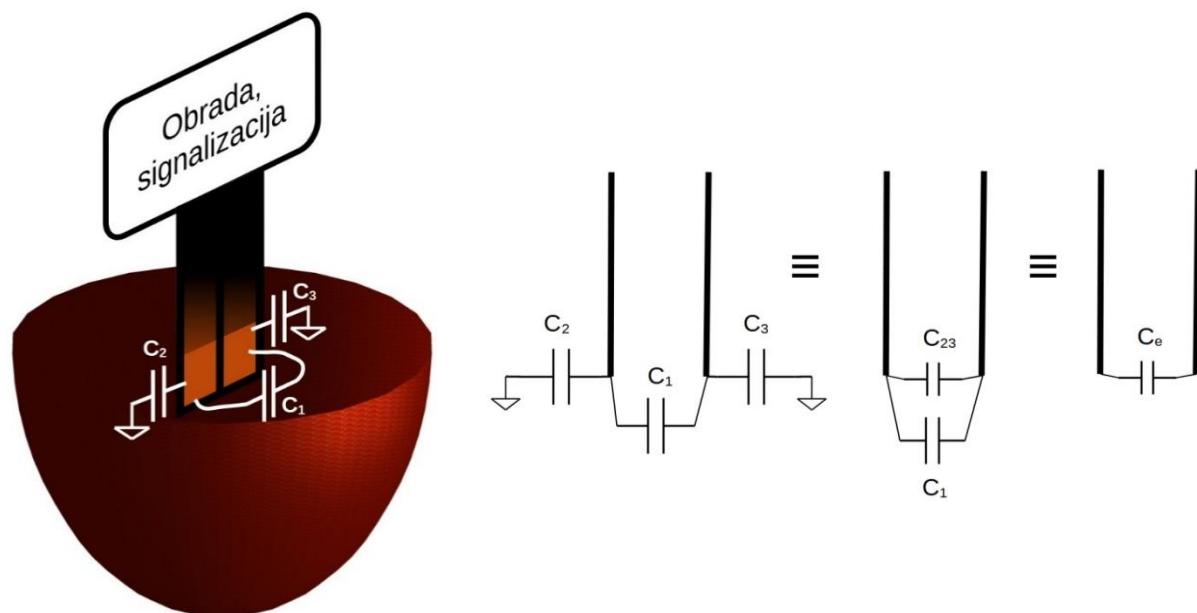
Na primjer, ako nema prisustva vode u zemlji – tada neće proticati struja  $i$ , što predstavlja prekid na otporniku  $R_z$ , pa će napon  $V_2$  biti jednak nuli. Tada je i rezultat jednačine 0%, što je u skladu sa polaznom pretpostavkom.

## 5.2 Kapacitivni sistem

Kapacitivni sistem se zasniva na razlici između dielektričnih konstanti vode i zemlje. Relativna dielektrična permitivnost suvih zemljišta iznosi između 2 i 6, dok je njena vrijednost kod vode ugrubo oko 80 (mjenja se u zavisnosti od temperature). Između kapacitivnosti i dielektrične konstante važi linearna zavisnost.

Elektrode kod kapacitivnog sistema su električno izolovane tako da obrazuju jedan kondenzator. Drugi, njemu paralelno vezani kondenzator, obrazuje se sa zemljom. Prisustvo vode u zemlji utiče na njegovu kapacitivnost, što uzrokuje da ekvivalentna kapacitivnost zavisi od količine vode. Problem vlažnosti zemljišta se sada svodi na mjerjenje kapacitivnosti, što je dosta izazovno s obzirom na njenu malu veličinu (reda pF). Ovakvim sistemom se dobijaju pouzdana i precizna mjerjenja, bez pojave korozije čak i nakon dužeg vremena korišćenja. Može se lako prilagoditi i korišćenju u druge svrhe, na primjer kao detektor metala.

U ovom primjeru je kapacitivnost iskorišćena za diktiranje trajanja impulsa kod impulsno-širinske modulacije (PWM). Njih generiše Šmitovo okidno kolo pri učestanosti od preko 150 kHz, a zatim se dovode na filter i pojačavač. Kao rezultat svih ovih operacija, mjerena veličina je predstavljena naponom koji se jednostavno može izmjeriti.



Slika 5.2: Postupak mjerjenja vlažnosti zemljišta kapacitivnim sistemom

Sonda senzora se sastoji od dvije izolovane elektrode, koje obrazuju kondenzator kapacitivnosti  $C_1$ . Svaka od ovih elektroda ima i parazitivnu kapacitivnost prema provodnim predmetima u svojoj okolini. Upravo ta parazitivna kapacitivnost nam je od koristi u ovom postupku. Kada su elektrode uronjene u zemlju, obrazovaće se kondenzatori kapacitivnosti  $C_2$  i  $C_3$  između elektroda i zemlje. Oni su vezani redno, pa se mogu predstaviti ekvivalentnom kapacitivnošću  $C_{23}$ , što je dato u jednačini 5.2.

$$C_{23} = \frac{C_2 * C_3}{C_2 + C_3}$$

*Jednačina 5.2: Redna veza kapacitivnosti*

Sada je sa slike jasno da su kondenzatori C1 i C23 vezani paralelno, pa će biti:

$$C_e = C_1 + C_{23} = C_1 + \frac{C_2 * C_3}{C_2 + C_3}$$

*Jednačina 5.3: Ekvivalentna kapacitivnost*

Posmatrano u teoriji, dodatne parazitne kapacitivnosti se javljaju između elektroda i svih provodnih tijela u bližoj i daljoj okolini; ali njihov značaj se može zanemariti s obzirom da njihova vrijednost opada srazmjerno rastojanju, pa se mogu uzeti samo najbliže činioci – u ovom slučaju voda u zemlji. U praksi se ovo pokazuje opravdano, s obzirom na stalnost dobijenih rezultata (kretanje provodnih tijela u nešto daljoj okolini bi dodatno uticalo na ekvivalentnu kapacitivnost, što bi dovelo do promjene rezultata). Značajna razdaljina za mjerjenje iznosi par centimetara, što je otprilike i najmanji razmak između sonde senzora i zidova posude sa zemljom potreban za tačno mjerjenje.

### 5.3 Princip rada razvijenog kapacitivnog senzora

Princip rada senzora je dat na slici 5.3. U suštini predstavlja pretvarač razlike kapacitivnosti  $C_x$  i  $C_{ref}$  u PWM signal. Oscilator frekvencije  $f$  pogoni dvije paralelne grane  $RC_{ref}$  i  $RC_x$  gdje je  $C_x$  kapacitivnost izmedju elektroda senzora, dok je  $C_{ref}$  referentna kapacitivnost koja je u slučaju stacionarnog stanja, odsustva zemljišta, približno jednaka  $C_{ref}$ . RC kola izazivaju određeno kašnjenje. Razlika kašnjenja  $DELAY(RC_x)$ - $DELAY(RC_{ref})$  je faktički jednaka 0, ako je  $C_x=C_{ref}$ . Što je  $C_x$  veće, veće je i kašnjenje,  $T_2 > T_1$ . Tj. mijenja se faktor popunjenoosti:

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}}$$

*Jednačina 5.4: Računanje faktora popunjenoosti*

da bi se u krajnjem slučaju dobila formula:

$$\begin{aligned} \bar{y} &= \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \\ \bar{y} &= \frac{1}{T} \left( \int_0^{DT} y_{max} dt + \int_{DT}^T y_{min} dt \right) \\ &= \frac{1}{T} (D \cdot T \cdot y_{max} + T(1-D)y_{min}) \\ &= D \cdot y_{max} + (1-D)y_{min} \end{aligned}$$

tj.

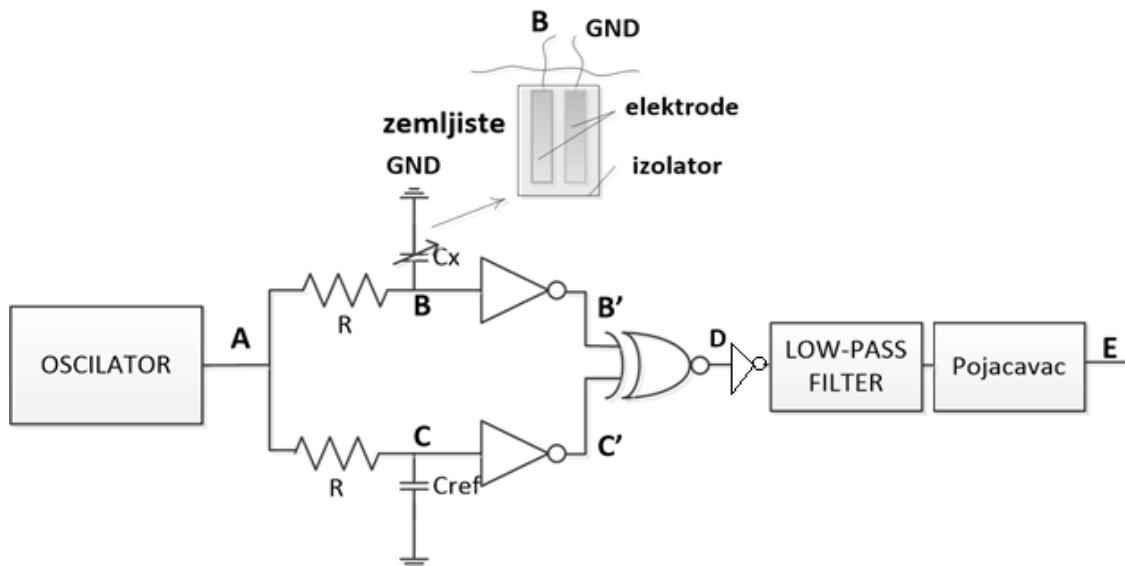
$$V_{ave} = D * 5V + (1 - D) * 0V = D * 5V$$

$$V1 = T1 * f * 5V$$

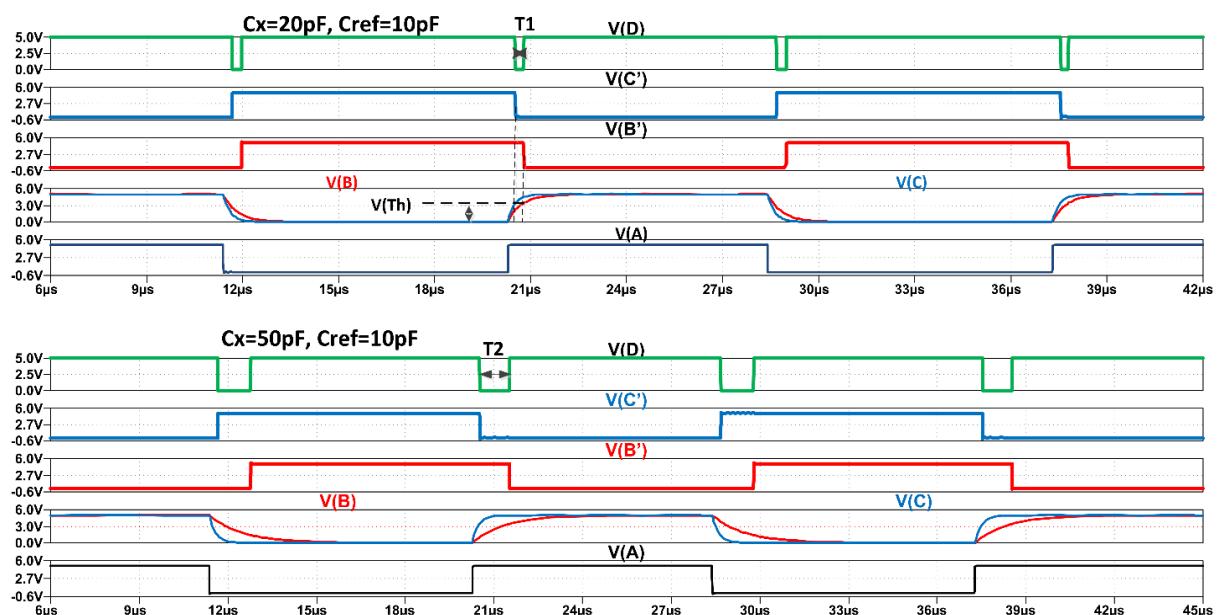
$$V2 = T2 * f * 5V$$

Jednačina 5.5: Računanje srednje vrijednosti napona

Pošto je  $T_1 > T_2$ , jasno je da je  $V_2 > V_1$ , tj. napon na izlazu kola je proporcionalan kapacitivnosti  $C_x$  po određenoj zakonitosti. Treba napomenuti da filter propusnik niskih učestanosti (LOW-PASS FILTER) pegla invertovani napon  $V_D$  i tako čini PWM filter. Slika 5.4 predstavlja simulaciju sistema u *LT Spice*-u koja se odlično poklapa sa fizički mjerenim vrijednostima pomoću osciloskopa.



Slika 5.3: Principijelna šema senzora



Slika 5.4: Vremenski dijagrami u karakterističnim tačkama dobijeni simulacijom

## VI Kalibriranje senzora

Vrijednost napona, koja je dobijena gore opisanim postupkom, potrebno je pretvoriti u jedinicu mjere – procenat sadržaja vode u supstanci. Najjednostavniji način za to je pomoću već kalibrisanog senzora (etalona), mapiranjem brojnih vrijednosti ili pronalaženjem aproksimativne krive vlažnosti.

Drugi način je eksperimentalno utvrđivanje vodene mase u uzorku zemljišta. Mjeranjem ukupne mase vode se računa njen udio u ukupnoj masi uzorka. Najprije se izvaga svježe uzeti uzorak i izvrši mjerjenje senzorom, i potom se zemlja periodično suši i vaga, bilježeći izlazne vrijednosti senzora, sve dok ne prestane da gubi na težini. Tada je procenat sadržaja vode jednak nuli, pa se može izračunati prvočitna vlažnost zemljišta.

Neka je u početku masa iznosila  $m_1$  – u kojoj je sadržana ukupna masa vode i suve zemlje, a na senzoru očitavamo napon  $V_1$ . Za poslednje mjerjenje znamo da će vaga pokazati isključivo masu zemlje, i neka ona iznosi  $m_2$ , dok senzor pokazuje napon  $V_2$ . Tada je ukupna masa vode u početku iznosila  $m_v = m_2 - m_1$ , pa se njen udio u procentima računa iz proporcije dатој u jednačini 6.1.

$$m_1: 100 = m_v: x$$

$$\Rightarrow x = \frac{m_v}{m_1} * 100 = \frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100$$

$$x = \left(1 - \frac{m_2}{m_1}\right) * 100 [\%], m_1 \geq m_2$$

*Jednačina 6.1: Računanje vlažnosti u toku postupka sušenja*

Dobijena je savršeno prosta jednačina za precizno računanje vlažnosti zemljišta, u kojoj figurišu početna i krajnja masa uzorka. Sada je još potrebno pronaći vezu između jednačine i dobijenih naponskih vrijednosti. Pošto sada znamo masu suve zemlje i napon  $V_2$  kojima odgovara 0% vlažnosti, potrebno je pronaći i drugu krajnju tačku za 100% vlažnosti. Po definiciji treba dodati u posudu količinu vode mase  $m_2$ , i neka njoj odgovara napon  $V_3$ . Sada možemo naći linearnu zavisnost:

$$V_l = \frac{V_3 - V_2}{100} * V_x [\%],$$

*Jednačina 6.2: Linearna prava koja povezuje dvije krajnje tačke*

Gdje  $V_x$  predstavlja izmjerenu vrijednost napona pri bilo kom mjerenu. Sada možemo iskoristiti mjerjenja koja su izvršena tokom sušenja zemlje da bi uporedili odstupanje linearne aproksimacije od

tačnih vrijednosti, i, ukoliko su ona značajno velika, zavisnost napona od vlažnosti se može mapirati ili aproksimirati krivom većeg reda.

Ovim je problem mjerena vlažnosti zemljišta sveden na čitanje izlaza ADC-a, pa se izlaz senzora može čitati voltmetrom ili, u ovom slučaju – analogno-digitalnim pretvaračem mikrokontrolera. Podaci se dalje mogu čuvati radi obrade i analiziranja, što omogućava sve prednosti digitalizacije. Rezultati su postojani pri bilo kojoj zapremini zemlje, pa se senzor može koristiti na otvorenom – što je u skladu sa industrijskim potrebama.

Vlažnost dobijena ovim putem je predstavljena u masenoj jedinici. Osim po odnosu masa, vlažnost zemljišta se može računati i po odnosu zapremina suve zemlje i vode – zapreminska jedinica. Ove dvije veličine su sljedstveno i brojno različite, i između njih možemo naći vezu koristeći zavisnost mase i zapremine, koja je data u jednačini 6.3.

$$V = \frac{m}{\rho}$$

*Jednačina 6.3: Zavisnost mase, gustine i zapremine*

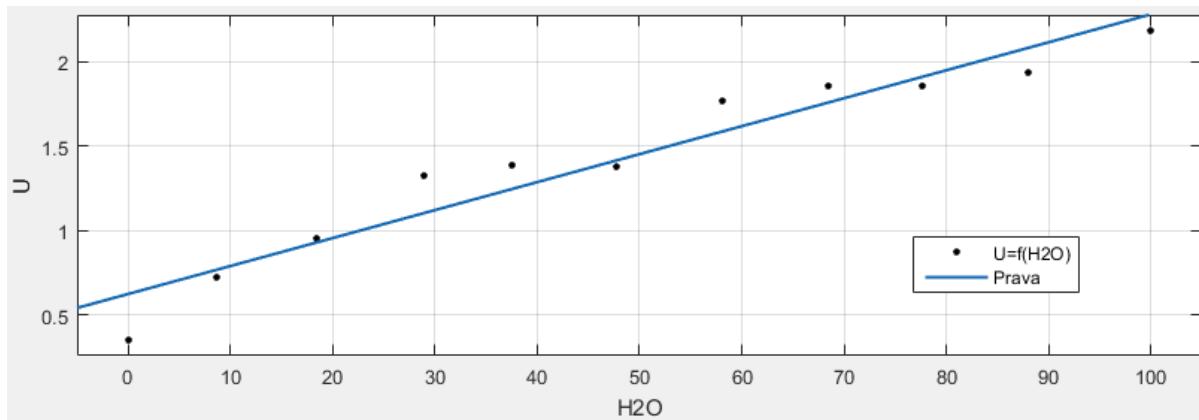
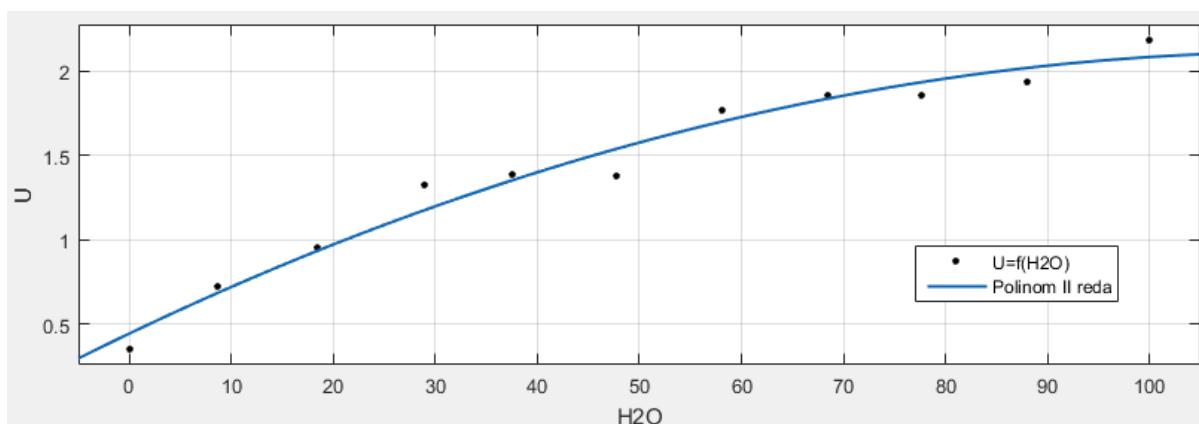
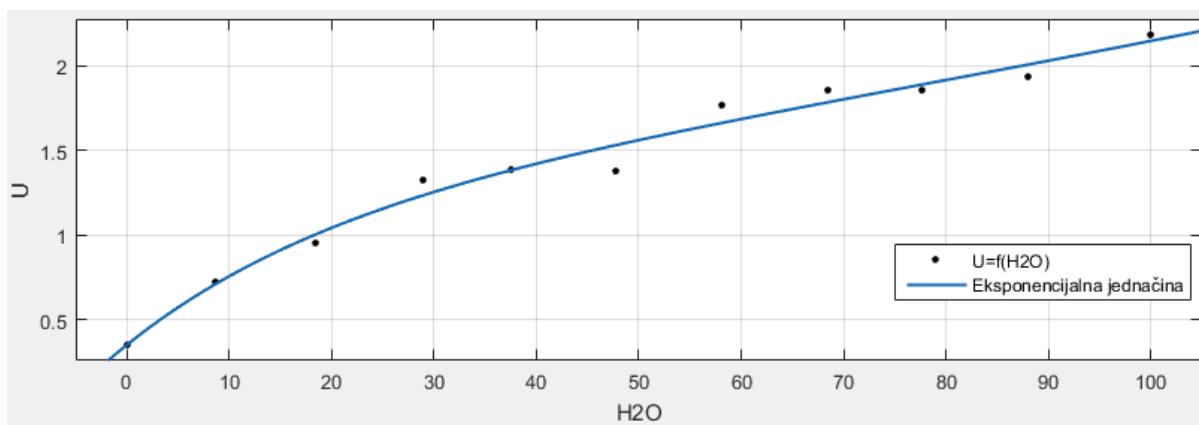
Gustina vode nam je poznata i iznosi  $997 \text{ kg/m}^3$ , ali je potrebno izmjeriti i gustinu datog tipa zemljišta. Međutim, glavni nedostatak ovog metoda u odnosu na maseni odnos je to što se ne može jednosmisленo odrediti zapremina zemljišta. Ona zavisi od faktora sabijenosti, što dodatno komplikuje mjerjenje. Zato se u ovom projektu koristi maseni odnos, jer možemo tačno da izmjerimo masu pri kalibraciji.

## 6.1 Rezultati kalibrisanja i aproksimativna kriva

Za ovaj ogled je korišćen uzorak biljnog humusa koji je prethodno dobro osušen. Donja granica napona koja je izmjerena u vazduhu iznosi  $0,2\text{V}$ . Gornja granica iznosi oko  $2,2\text{V}$  i njoj odgovara  $100\%$  vlažnosti. Zanimljivo je da u čistoj vodi bez prisustva zemlje napon iznosi  $1,87\text{V}$ ; što znači da njegova vrijednost opada nakon većinskog sadržaja vode u zemljištu, što je potvrđeno eksperimentom.

Mjerena su vršena nakon dodavanja vode u iznosu od oko  $10\%$  početne težine uzorka, što daje dovoljno tačaka za aproksimaciju. Uzeta je prosječna naponska vrijednost od nekoliko uzastopnih mjerena.

Matlab posjeduje alate za osnovno izračunavanje aproksimativnih krivih, u meniju *APPS > Curve Fitting*. Potrebno je izabrati promjenjive i vrstu jednačine, a kao rezultat se dobija najpričližnija kriva sa zadatim parametrima, kao i neki statistički podaci. Na slikama 6.1-6.3 su dati redom grafici za: linearnu, kvadratnu i eksponencijalnu jednačinu sa srednjom kvadratnom greškom (SKG). Data je zavisnost napona od procentnog sadržaja vode.

Slika 6.1: Prava  $f(x) = 0,5465 * x + 1,426$ ; SKG = 0,1572Slika 6.2: Kvadratna jednačina  $f(x) = -0,1364 * x^2 + 0,5535 * x + 1,55$ ; SKG = 0,1052Slika 6.3: Eksponencijalna jednačina  $f(x) = 1,64e^{0,175} - e^{-1,5}$ ; SKG = 0,09177

Kao što je i očekivano, rezultatima mjerena je najbliža eksponencijalna kriva sa najmanjom srednjom kvadratnom greškom. Ukoliko bi ona bila suviše zahtjevna za mikrokontroler, može se koristiti i kvadratna jednačina.

## 6.2 Postupak mjerena

Iako je postignuta vrlo velika osjetljivost senzora u laboratorijskim uslovima, nepravilno izvršeno mjerjenje može značajno da utiče na rezultat. Ovo su neki uslovi o kojima treba voditi računa:

### 1. Dubina i položaj senzora

Senzor se svaki put mora postaviti na istoj dubini, zato što ekvivalentna kapacitivnost zavisi od površine elektroda koje se nalaze u zemlji. Ako bi se senzor samo djelimično ubacio u zemlju, kapacitivnost  $C_1$  bi se sastojala od paralelne veze dvije kapacitivnosti – jedne iznad, a druge ispod zemlje. U tom slučaju bi bilo:  $C_1 = C_{1\text{iznad}} + C_{1\text{ispod}}$  (slika 5.2); što bi dovelo do linearne zavisnosti greške mjerena od dubine na kojoj se vrši. Kućište treba da obezbijedi gornju granicu do koje senzor može da se ukopa.

Takođe treba voditi računa o položaju, tj. o uglu, u kom se postavlja senzor. Iako to manje utiče na rezultat, ipak nagib ne treba da bude značajno veliki zato što treba obezbijediti dovoljnu količinu zemlje cijelom dužinom i sa obije strane elektroda.

### 2. Čišćenje senzora prije ponavljanja mjerena

Pošto najviše uticaja na ekvivalentnu kapacitivnost vrše slojevi zemlje koji su najbliži senzoru, potrebno je nakon svakog mjerenača očistiti ostatke zemlje. Ako bi, na primjer, nakon mjerenača vlažnosti mokre zemlje odmah ubacili senzor u suvlu zemlju bez čišćenja, to bi ostaci mokre zemlje ili same vode, u zavisnosti od količine, manje ili više poremetili rezultat. Čišćenje izolacionog sloja je lako, a najbolje je koristiti ubrus kako bi upio ostatke vlage.

### 3. Sabijenost zemlje

Pri ubacivanju senzora u zemlju, može se desiti da ona ne prijene dobro za izolacioni sloj, tj. da se pojavi praznina između zemlje i senzora. U tom slučaju treba blago pritisnuti zemlju okolo, tako da bude prirodno sabijena. Sa pritiskanjem ne treba pretjerivati, jer može da dođe do preraspodjele vlage, odnosno do njenog kretanja od tačaka sa većim pritiskom do onih sa manjim pritiskom (cijeđenje).

### 4. Homogenost

Da bi rezultati što tačnije pokazivali stvarno stanje, treba se pobrinuti da vлага u zemlji bude ravnomjerno raspoređena. U suprotnom bi na različitim mjestima dobijali različite rezultate. Ovo je naročito važno kod postupka kalibracije sušenjem, jer se gornji slojevi zemlje suše brže od donjih, a rješava se jednostavnim miješanjem uzorka.

### 5. Prosječna vrijednost

Kako bi se što više umanjio uticaj promjenjivih parametara, treba izvršiti više mjerenača i naći prosječnu vrijednost – kao i kod mjerenača bilo koje druge veličine.

## 6. Tip zemljišta i odgovarajuća kalibracija

Kako je već pomenuto, svaki tip zemljišta ima svoje prepoznatljive osobine pa se i kalibracija mora vršiti posebno. Pogrešno bi bilo za mjerjenje koristiti jednu vrstu zemljišta, ako je kalibracija izvršena za drugu vrstu.

## 7. Dubina na kojoj se mjeri

Ovaj senzor je dizajniran za mjerjenje vlažnosti površinskog sloja zemljišta do određene dubine, i ne može se koristiti za dublje slojeve jednostavnim ukopavanjem. Za to je potrebno uzeti uzorak sa željene dubine, ili iskopati širu rupu tako da se oko gornjeg dijela senzora ne nalazi zemlja u dovoljno velikom prečniku koji ne utiče na rezultat.

Pošto se u industriji traži i mjerjenje na različitim dubinama, sa inženjerske tačke gledišta potrebne izmjene nijesu zahtjevne. Kapacitivne elektrode treba smjestiti u dovoljno čvrstom izolatoru, i izvesti ih do odgovarajuće dužine, dok je elektronski dio gotovo isti.

### 6.2.1 Vlažnost drugih rastresitih materijala

Iako je ovaj senzor namjenski napravljen za vlažnost zemljišta, nema nikakve prepreke da se koristi i za druge materijale slične strukture (u koje je moguće ubaciti sondu). I u tom slučaju treba voditi računa o svemu gore navedenom. S obzirom da neki materijali sporije upijaju tečnost, treba ih dobro promiješati kako bi ona bila ravnomjerno raspoređena.

# VII Štampanje pločica UV metodom

Mogućnost izrade sopstvenih pločica je veoma korisna i poželjna, što je naročito došlo do izražaja u vrijeme masovnih zatvaranja i obustavljanja dostava iz inostranstva. Postupak štampanja je pokrenut od nule i završen uspješno, čime je napravljena ploča za senzor sa integrisanim kondenzatorom.

Od više razmatranih postupaka, odabran je UV pozitiv metod zbog preciznosti i mogućnosti masovne proizvodnje. Postižu se odlični rezultati, a hardverski dio procesa je gotov za desetak minuta. Postupak izrade je opisan u šest koraka.

## 1. Crtanje električne šeme i putanja u softveru

Za ovaj dio posla je korišćen besplatni softver *KiCAD*, a postoje i brojna druga rješenja: *Altium Designer*, *EasyEda* (onlajn), *Fritzing*, *Eagle*... Crtanje električne šeme (*Schematic Layout Editor*) je

gotovo isto kao i kod drugih alata, a zatim se svakoj komponenti dodjeljuju štampani otisci. *KiCAD* posjeduje ogromnu bazu otiska, a moguće je i dizajnirati svoje za bilo koju komponentu ili uređaj. Nakon toga slijedi crtanje putanja (*PCB Layout Editor*) koje fizički predstavljaju kontakte na ploči. Pritiskom na dugme *Update PCB from schematic*, učitaju se otisci svih komponenata sa električne šeme. Potrebno ih je ručno rasporediti i iscrtati putanje u skladu sa šemom. Za sledeći korak je potrebno sačuvati *SVG* zapis dizajna pritiskom na *File > Export > SVG*. Pošto se radi o vektorskoj grafici, mogu se koristiti visoke rezolucije štampe.

## 2. Štampanje na providnoj foliji ili paus papiru

Za kvalitetni otisak je neophodno koristiti laserski štampač rezolucije bar 1200dpi. Druge vrste štampača ne mogu dobro da štampaju na ovim materijalima, i uglavnom imaju manju rezoluciju. Oba materijala dobro propuštaju UV svjetlost, za razliku od običnog papira. Za jednostranu izradu pločice se štampa se originalni crtež, a ne odraz u ogledalu.

## 3. Osvjetljavanje UV lampom

Sada se papir postavi uz ploču od pertineksa stranom na kojoj je štampano. Sve se zajedno pritisne uz staklo, okrenuto prema UV lampi (slika 7.1). U ovom slučaju je vrijeme osvjetljavanja iznosilo tri minuta, a ono zavisi od jačine osvjetljenja.



Slika 7.1: Kutija sa UV lampama

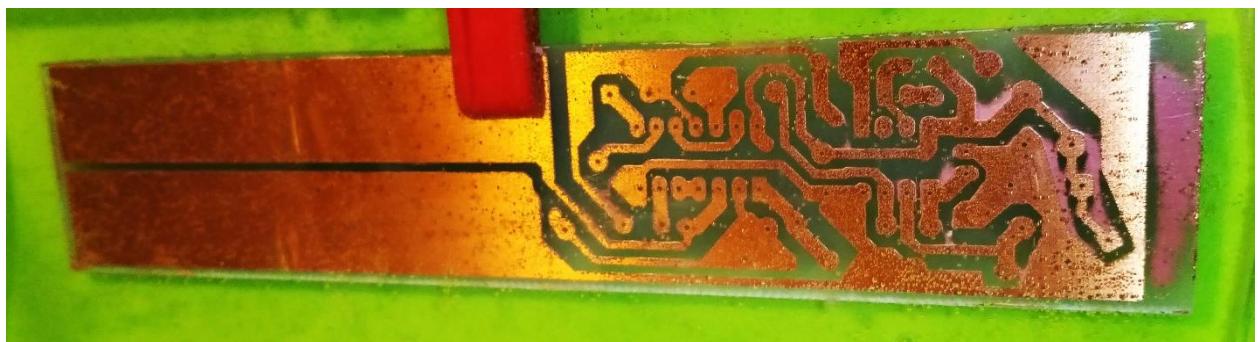
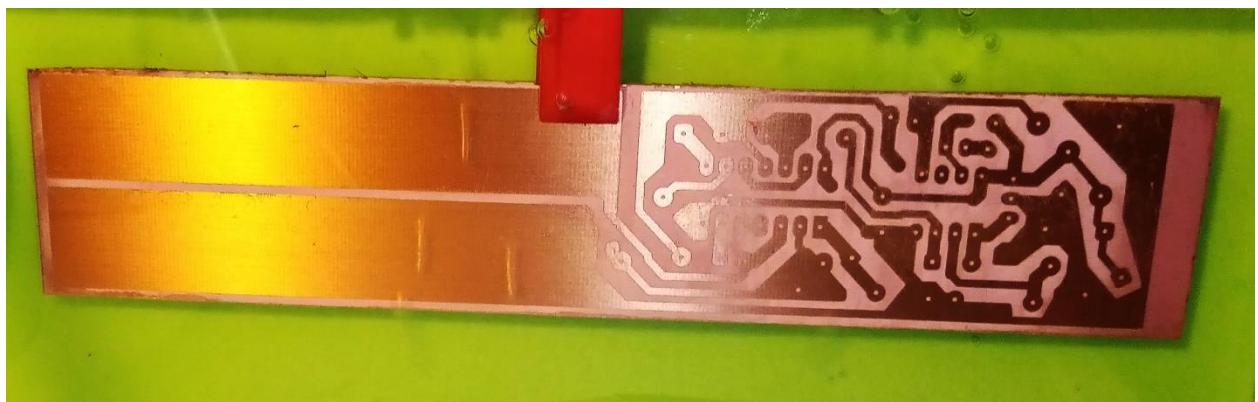
UV svjetlost priprema izloženi lak za razvijanje. Preslikavanje nije vidljivo dok se lak ne razvije. Korišćene su četiri fluorescentne UV sijalice snage 15W, postavljene tako da svjetlost bude što ravnomjernije raspoređena. Po potrebi se koristi samo gornji ili donji par (za jednostranu tehnologiju), ili sve četiri (za dvostranu).

#### 4. Razvijanje laka

Pločica od pertineksa se ubaci u rastvor NaOH (10g na 1l vode). NaOH nagriza kožu, pa se treba odgovarajuće zaštiti od dodirivanja i isparenja. Uz stalno miješanje rastvora, razvijanje ne treba da traje duže od tri minuta. Na kraju će se jasno razlikovati linije koje predstavljaju kontakte. Ako se ploča zadrži predugo u rastvoru, doći će do otapanja čitavog laka.

#### 5. Nagrizanje bakra

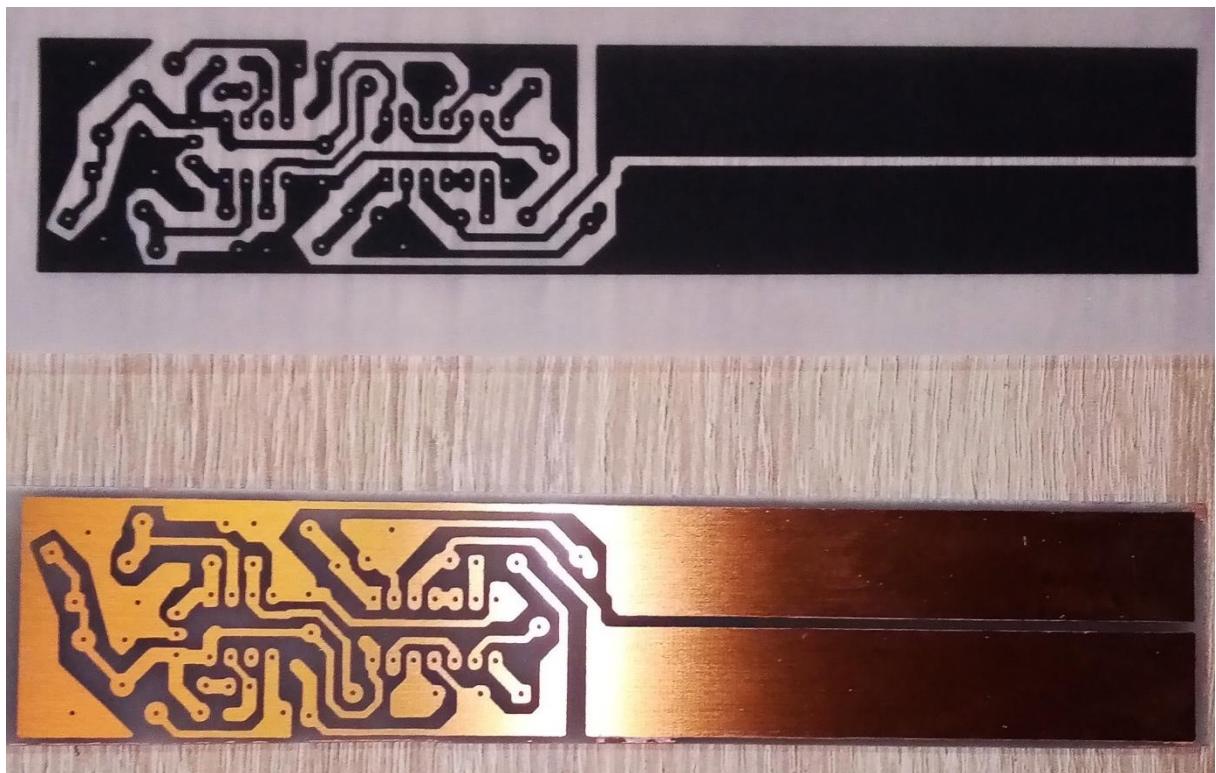
Za uklanjanje viška bakra je najbolje koristiti ferihlorid ( $\text{FeCl}_3$ ). Međutim, kako se on teško nalazi, može da posluži i rastvor sone kiseline (HCl) i vodonikovog peroksida ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). Isto se potrebno zaštiti od dodirivanja hemikalije i isparenja, a nagrizanje treba obaviti na otvorenom ili u prostoriji sa dobrom ventilacijom. Kako bi nagrizanje bilo ravnomerno, rastvor treba miješati tokom cijelog postupka. Rezultati su vidljivi ubrzo nakon potapanja ploče, a završeno je kada se odstrani sav nepotrebni bakar (slika 7.2). Na gornjoj slici se vidi tek započeti tok odstranjivanja bakra, a u sredini poodmakli gdje je ostalo još malo bakra uglavnom pri krajevima.





Slika 7.2: Tri faze nagrizanja bakra

Na donjoj slici je prikazana gotova pločica, i tada je treba izvaditi iz rastvora jer bi se otopio i korisni bakar. Iako je on sa gornje strane zaštićen lakom, ivice su izložene i zbog toga bi se otapanje nastavilo u svim pravcima normalnim na ivice kontakata, što bi dovelo do njihovog stanjivanja i, na kraju, iščezavanja. Na slici 7.3 je data provjera kvaliteta sa zadovoljavajućim rezultatom.



Slika 7.3: Poređenje štampane maske i gotove bakarne pločice

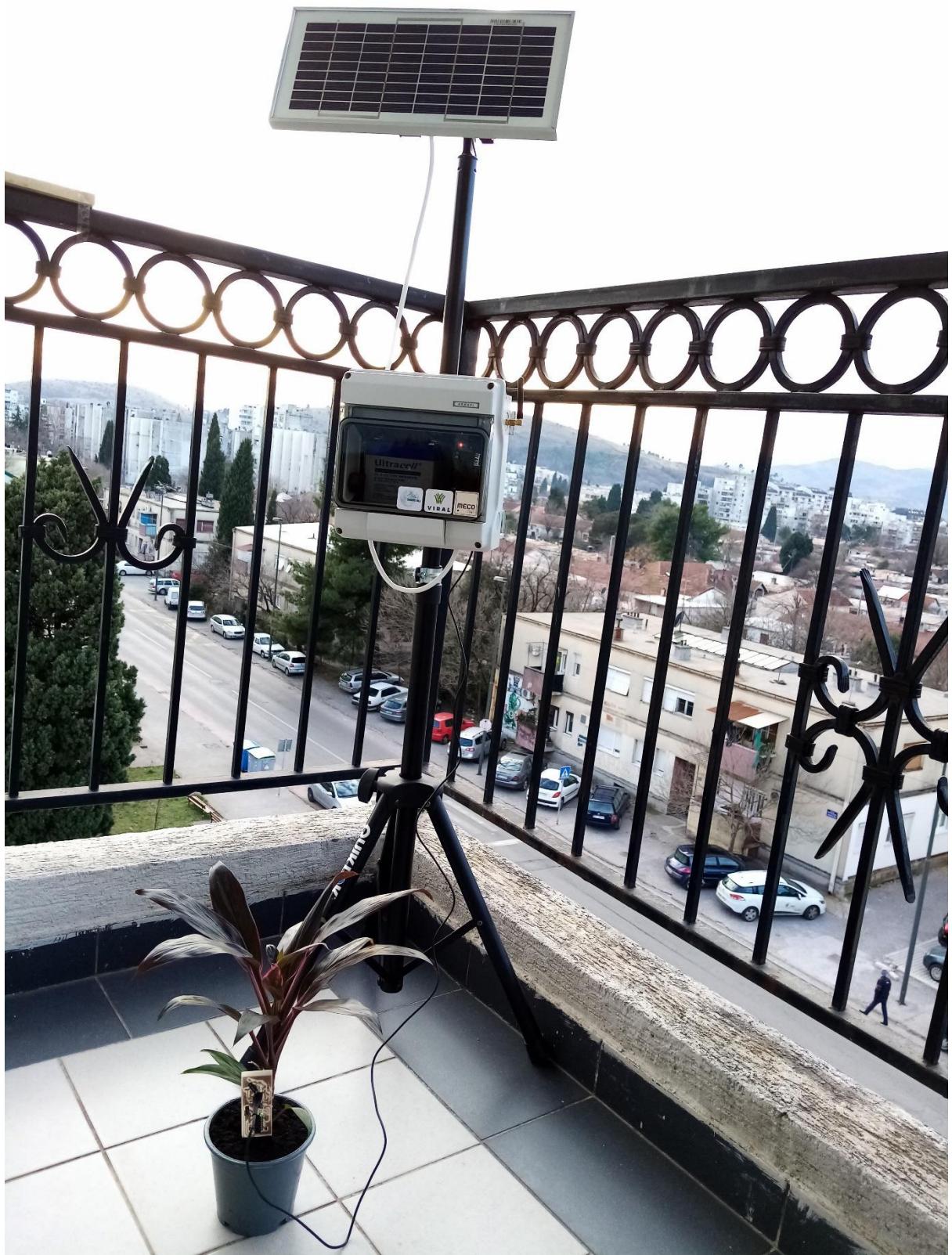
## 6. Lemljenje

Kada je peti korak gotov, može se preći na lemljenje. Najprije treba odstraniti višak laka blagim šmirglanjem i probušiti rupice za komponente, a potom ih zalemiti sa suprotne strane kontakata.

Izgled gotovog senzora u radnom režimu, kao i njegovo smještanje je dato na slikama 7.4 i 7.5.



Slika 7.4: Senzor vlažnosti zemljišta u saksiji



Slika 7.5: Radna proba čitavog sistema

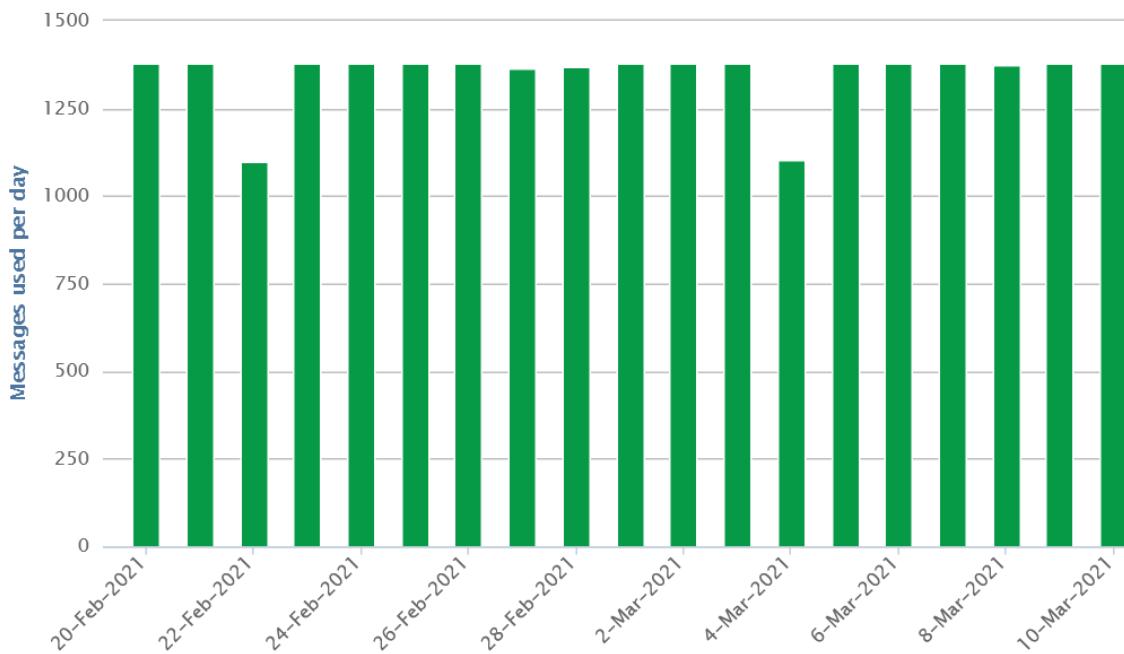
## VIII Rezultati testiranja

Testiranje predloženog sistema je izvršeno u periodu od 15/10/2020 do 24/03/2021. Ukupan broj kanala poslatih poruka prema *ThingSpeak* kanalu "IoT MECOnet", <https://thingspeak.com/channels/1199838>, dat je u Tabeli 8.1.

Poruke/kanali	Broj poslatih poruka	Frekvencija slanja
Broj poruka	149661	60 sekundi
Broj kanala	4	60 sekundi

Tabela 8.1: Broj poslatih poruka

Dnevno je slato oko 1380 poruka, što se vidi na slici 8.1.



Slika 8.1: Dnevni protok poruka od uređaja prema serverima ThingSpeak i [www.meconet.me](http://www.meconet.me)

Postignuti rezultati u odnosu na domet uređaja su predstavljeni u tabeli 8.3. Poruku čini jedan neprekidni string (niz karaktera), i primjećuje se da je uspješnost prijema veća ukoliko je on manji. Idealno bi bilo svesti veličinu poruke na jedan bajt i ponavljati slanje više puta kako bi se ostvarila najveća vjerovatnoća prijema. Međutim, u ovom slučaju ne mogu svi podaci da stanu u jedan bajt. Dodatna mogućnost je razbijanje poruke na osmobilne cjeline, i slanje svake od njih uzastopno više puta.

Veličina poruke	Ostvareni domet
9 znakova	> 1,5 km
30 znakova	200-300 m

Tabela 8.2: Zavisnost dometa od veličine poruke

Parametri koje je prihvatao i obrađivao testni kanal su dati u Tabeli 8.3.

Ime kanala	IoT MEConet
Opis kanala	Vlažnost i temperatura vazduha i vlažnost zemljišta na lokaciji MEConet mjeri <i>Heltec WiFi LoRa 32(V2)</i> i šalje svakih 60 sekundi na <i>Thing Speak</i> . Povratna sprega i kontrolni signal se šalju sa <i>Thing Speak</i> na MEConet lokaciju.
Polje 1 (Field 1)	Humidity in %
Polje 2 (Field 2)	Temperature in Cel
Polje 3 (Field 3)	Moisture in %
Polje 4 (Field 4)	Control (H-T-M)
Polje 5	Send command (threshold) value

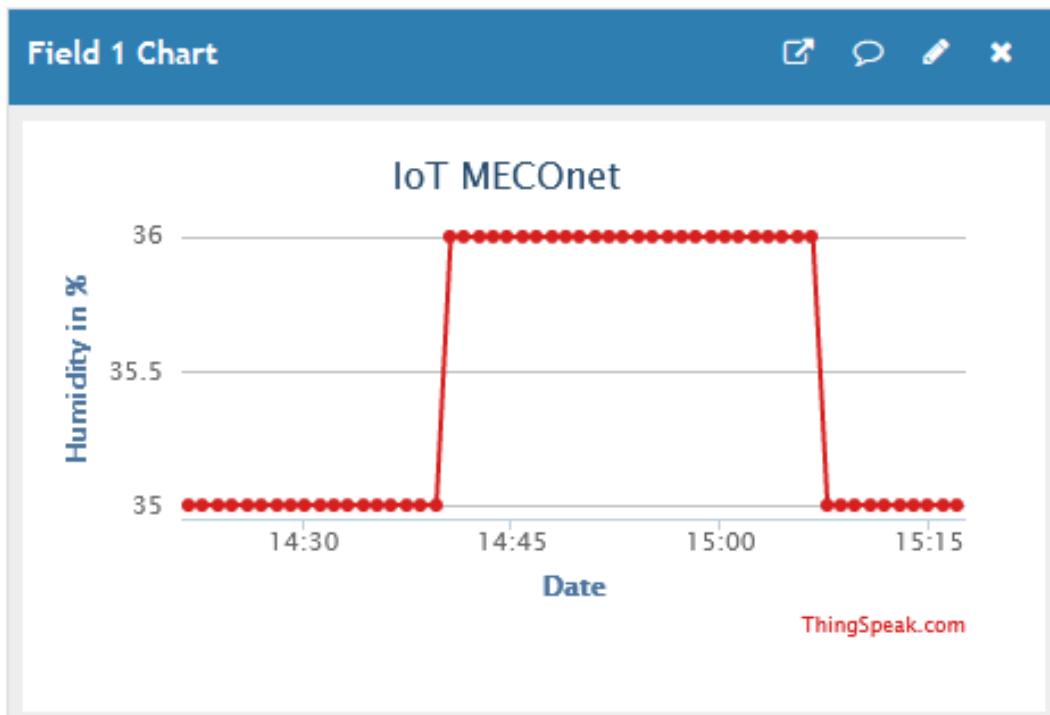
Tabela 8.3: Parametri testnog kanala

Fotografija objekta regulacije na lokaciji je prikazana na donjoj slici. Verifikacija je obavljena kako u realnom okruženju preuzeća "Plantaže", tako i u laboratoriji Instituta MEConet (slika 8.2).

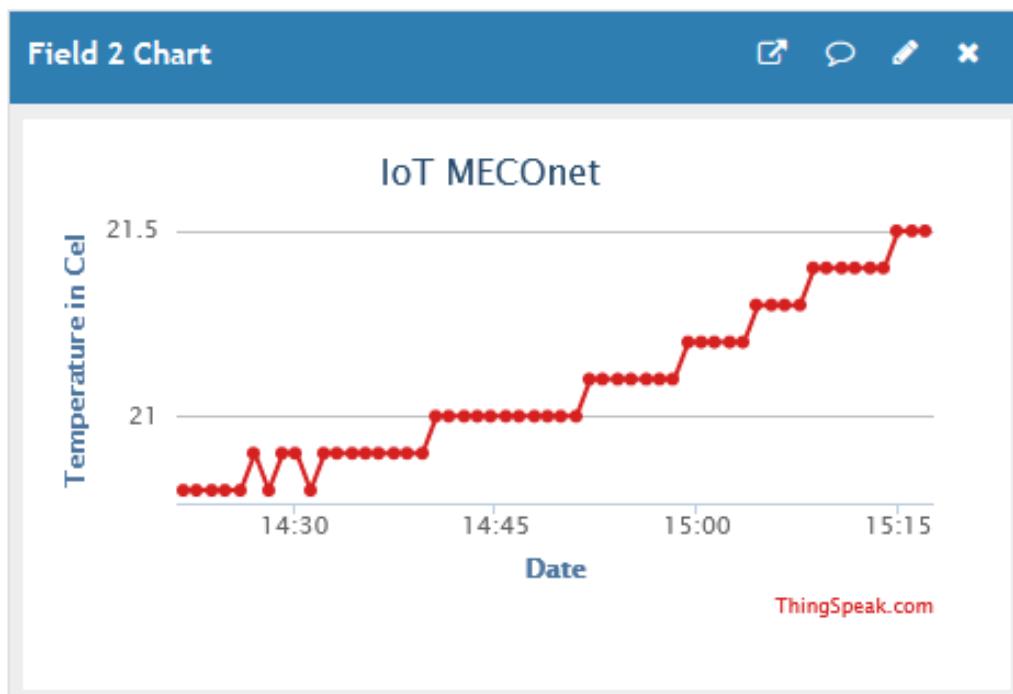


Slika 8.2: Detalji eksperimenta i prototip uređaja – Plantaže (lijevo) i MEConet (desno)

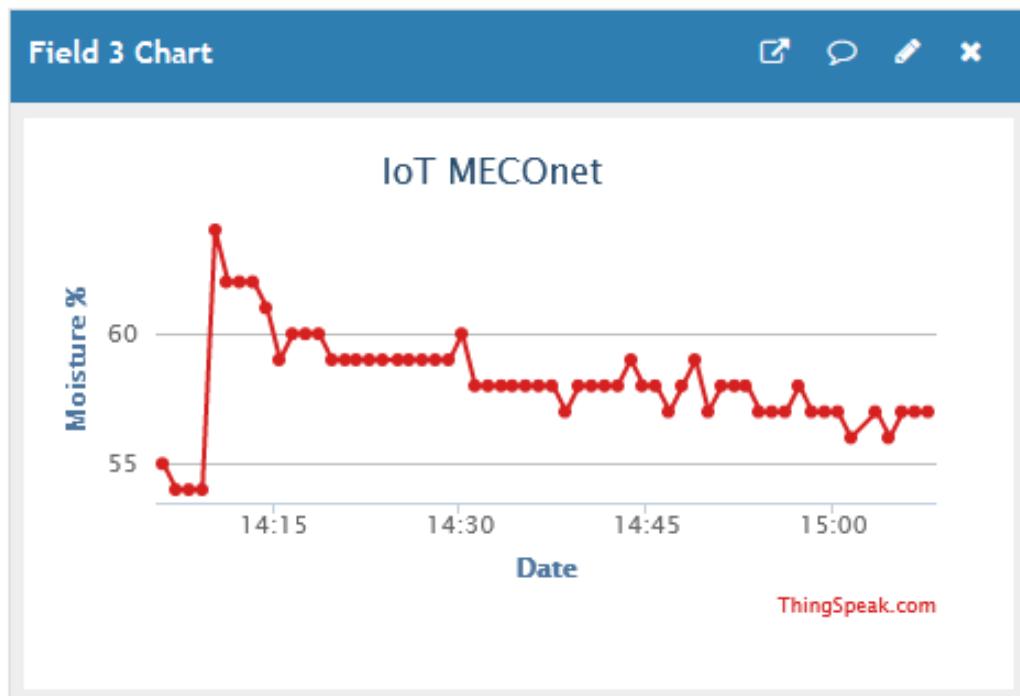
Slike ispod prikazuju realno stanje na ThingSpeak kanalu u segmentu regulacije po gornjim poljima (*Fields*).



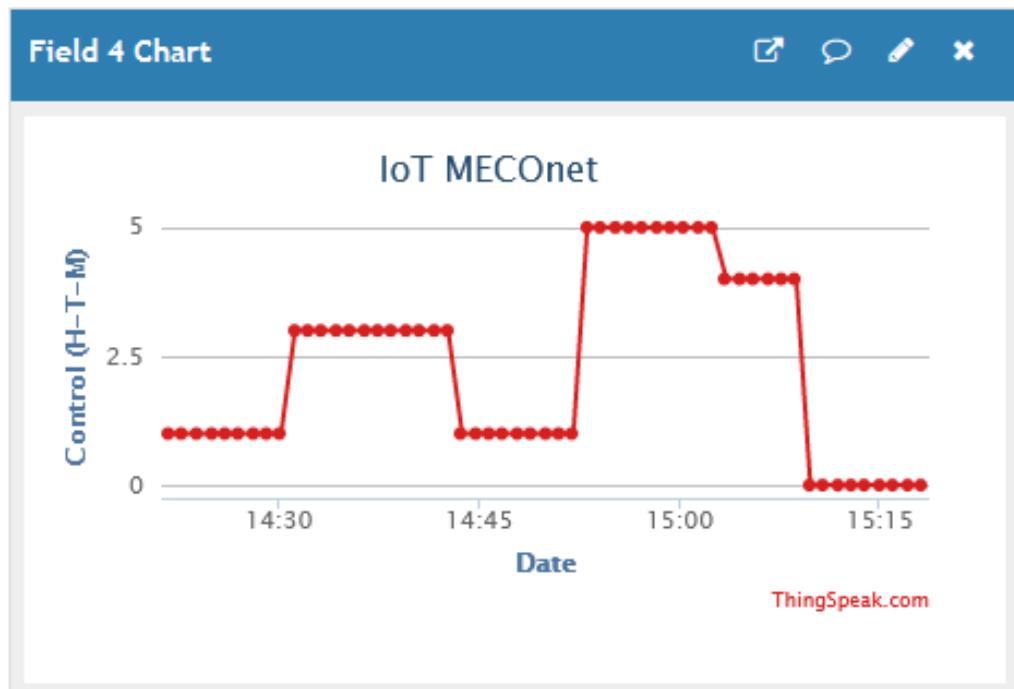
Slika 8.3: Dijagram promjene vlažnosti vazduha u određenom vremenskom intervalu



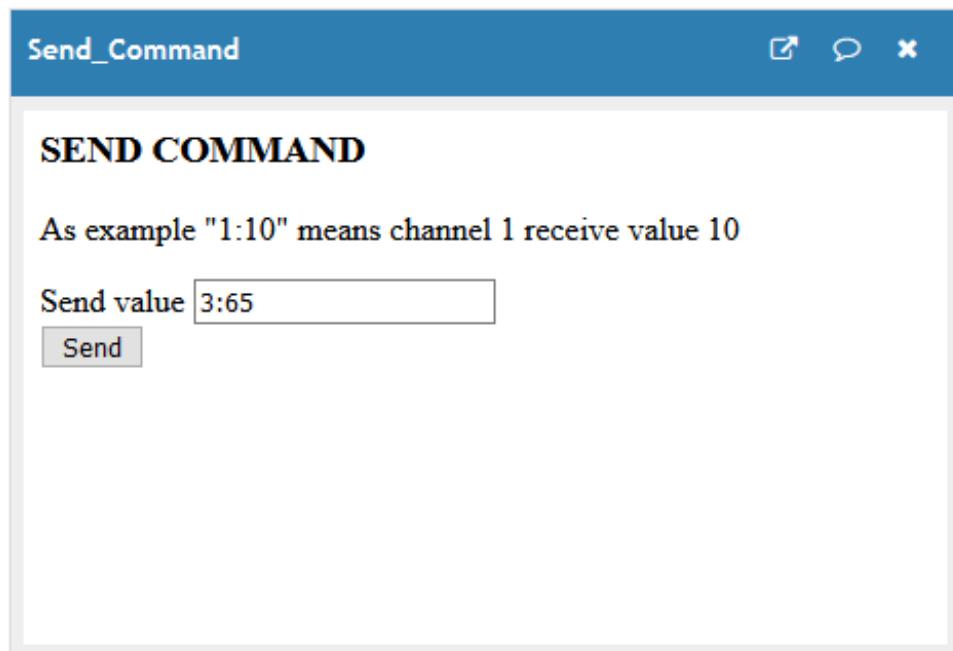
Slika 8.4: Dijagram promjene temperature vazduha u određenom vremenskom intervalu



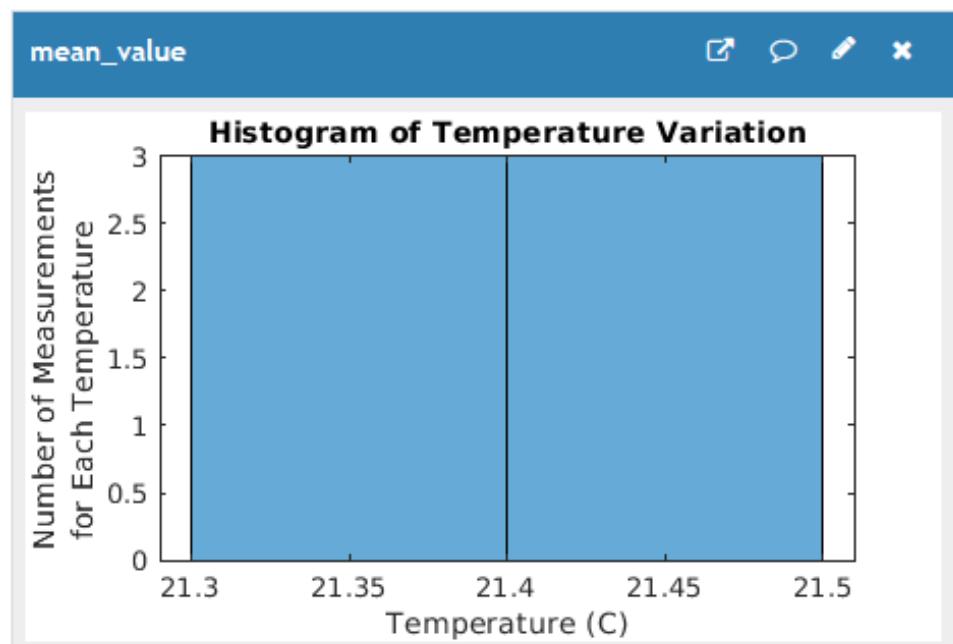
Slika 8.5: Dijagram promjene vlažnosti zemljišta u određenom vremenskom intervalu



Slika 8.6: Kontrolni signal paljenja-gašenja uređaja u određenom vremenskom intervalu



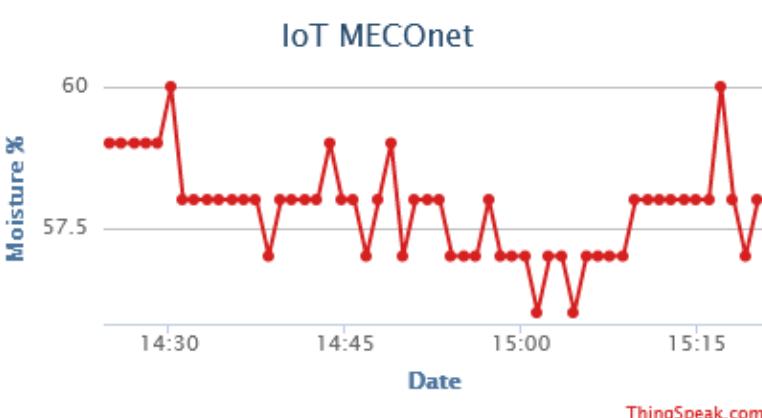
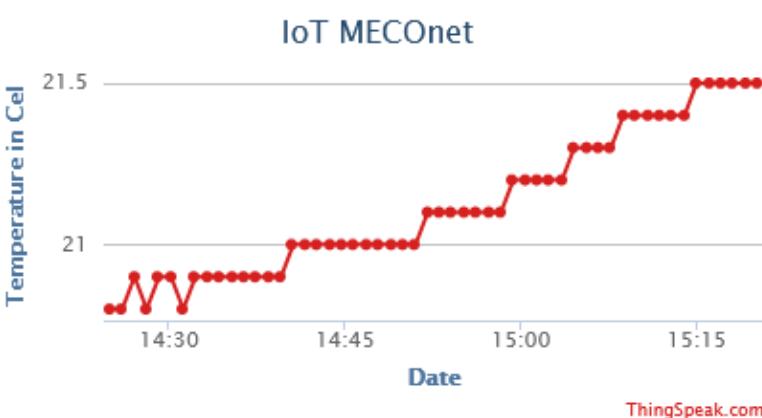
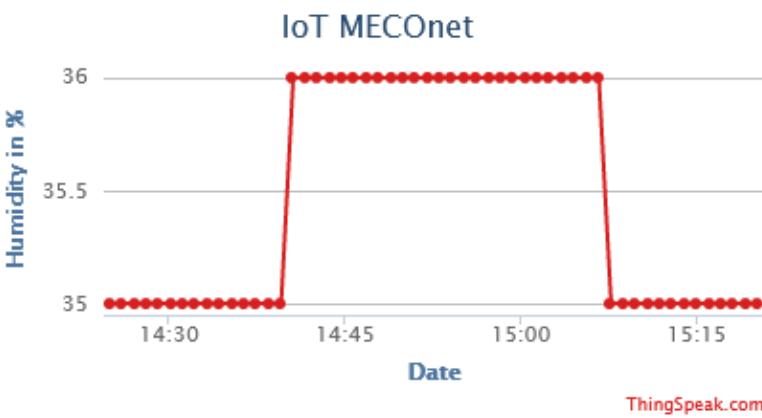
Slika 8.7: Polje za unošenje referentnih vrijednosti



Slika 8.8: Srednja vrijednost temperature za određeni broj mjerena

## LIVE diagrams

Wed Mar 24 2021 15:21:00 GMT+0100 (Central European Standard Time)



Slika 8.9: Uživo posmatranje dijagrama na korisničkoj web stranici

Na slikama 8.10 i 8.11 je prikazana serijska komunikacija između uređaja i računara. Osim pregleda brojnih vrijednosti, ona je korisna i za kontrolu rada koda, tj. debagovanje. Na slici 8.10 su dati izlazni podaci serijske komunikacije na stanicu. Promjenjiva *Reg* sadrži kombinovanu poruku koju čine mjerene brojne vrijednosti, svaka u svom binarnom opsegu. Pomoću nje je moguće provjeriti da li su brojne vrijednosti pravilno zapisane i primljene na drugoj strani.

Slika 8.11 sadrži nešto više podataka. Linija „*Received a packet.*“ označava da je primljena poruka od stanice. Osim prethodno navedenih promjenjivih, nalaze se i one za: kontrolu, snagu signala (*RSSI*) i poruka u obliku stringa, tj. njen *ASCII* kod. Linija „*Sending message:*“ sadrži promjenjivu koja se šalje od servera ka stanicu, a vezana je za kontrolu. Na primjer, u ovdje je zadata vrijednost 1:40 koja se odnosi na prvi kanal namijenjen vlažnosti vazduha. Poruka je skraćena na „140“ radi veće vjerovatnoće ispravnog prijema, i poslata ka stanicu. Već u narednoj poruci vidimo da je kontrolni broj promijenjen iz nule u jedinicu jer je vlažnost od 35% manja od zadate, a prvi kanal je predstavljen bitom najmanje težine u kontrolnoj promjenjivoj.

```
Reg = 6560822
Vl. vazduha: 34.00 %      Temperatura: 20.00 *C
Vl. zemljista: 54.13 %    Broj poruke: 9

Reg = 6593590
Vl. vazduha: 34.00 %      Temperatura: 20.10 *C
Vl. zemljista: 54.96 %    Broj poruke: 10

Reg = 6593590
Vl. vazduha: 34.00 %      Temperatura: 20.10 *C
Vl. zemljista: 54.52 %    Broj poruke: 11

Reg = 6593589
Vl. vazduha: 34.00 %      Temperatura: 20.10 *C
Vl. zemljista: 53.65 %    Broj poruke: 12

Reg = 6593590
Vl. vazduha: 34.00 %      Temperatura: 20.10 *C
Vl. zemljista: 54.26 %    Broj poruke: 13

Reg = 6593590
Vl. vazduha: 34.00 %      Temperatura: 20.10 *C
Vl. zemljista: 54.57 %    Broj poruke: 14

Reg = 6594102
Vl. vazduha: 35.00 %      Temperatura: 20.10 *C
Vl. zemljista: 54.26 %    Broj poruke: 15
```

Slika 8.10: Serijski izlaz stанице

Linija IoT „Handling Server Channel update successfull.“ označava uspješno postavljanje trenutnih vrijednosti na serveru. To je znak da sistem radi kako treba, pa treba resetovati *watchdog* tajmer. Linija „Resetting WDT...“ znači da je on resetovan. Ukoliko bi, iz nekog razloga, došlo do zastoja u slanju poruka na server, istekao bi *watchdog* tajmer i mikrokontroler bi se restartovao i krenuo sa radom ispočetka. Takvi zastoji se uglavnom dešavaju u zastoju u radu programa i mogu biti trajni, pa bi bio nepohodno ručno restartovati mikrokontroler.

```
Received a packet.  
Reg = 6790716  
Vl. vazduha = 35 %  
Temperatura = 20.70 *C  
Vl. zemljista = 60 %  
Kontrola = 0  
Message: g<  
RSSI: -72  
  
IoT Handling Server Channel update successful.  
Resetting WDT...  
  
Checking queue...  
Latest command from queue: b  
COM=1:40END  
0  
  
Sending message: 140  
  
Received a packet.  
Reg = 6823484  
Vl. vazduha = 35 %  
Temperatura = 20.80 *C  
Vl. zemljista = 60 %  
Kontrola = 1  
Message: h<  
RSSI: -68
```

Slika 8.11: Serijski izlaz priručnog uređaja

## Zaključak

U ovom radu je napravljen sistem koji može da mjeri: temperaturu vazduha, vlažnost vazduha i vlažnost zemljišta. Grafici i trenutne vrijednosti se mogu posmatrati na IoT platformi *ThingSpeak*. Omogućena je dvosmjerna komunikacija na kanalu *ThingSpeak* radi zadavanja ciljanih vrijednosti, koje bi stanica postizala uključivanjem i isključivanjem odgovarajućih uređaja.

Pored grafika za mjerene veličine, nalazi se i jedan grafik namijenjen kontroli od strane korisnika. On sadrži informacije o tome koji su uređaji trenutno aktivni. Kontrolne (željene) vrijednosti se zadaju na kanalu *ThingSpeak*, a povratnu informaciju šalje stanica nakon preuzimanja potrebnih radnji. Ovdje se radi demonstracije kontroliše rad LED dioda – po jedne za svaku veličinu, od kojih je obrazovan binarni broj.

Iskorišćene su prednosti savremene tehnologije, koje podrazumijevaju upotrebu solarne energije i interneta. Opisan je i postupak izrade štampanih pločica *UV* metodom, koji je korišćen za pravljenje kapacitivnog senzora.

Sistem je pogodan za naučna istraživanja i koristan je poljoprivrednim proizvođačima koji žele da primijene savremenu tehnologiju u svom radu. Može se koristiti i kao gradivni blok za složenije sisteme, koji bi pokrivali i kontrolisali veće zasade, što odgovara industrijskim potrebama.

Iako su korišćeni senzori koji su od značaja u poljoprivredi, stanica se može opremiti i drugim vrstama senzora koji odgovaraju drugim djelatnim oblastima.

Navedeni domet za komunikaciju između mikrokontrolera iznosi 5km, međutim, to predstavlja idealni slučaj: kada su vremenske prilike najpovoljnije, nema elektromagnetnih i fizičkih smetnji i predajnik se nalazi na visini iznad prijemnika. Kako se ovdje radi o dvosmjernoj komunikaciji, najbolje je da uređaji budu na otprilike istoj visini. Domet značajno zavisi i od dužine poslate poruke: što je poruka duža – veća je i vjerovatnoća da dođe do greške. Rješenje za to je slanje što kraće poruke više puta uzastopno uz korišćenje tehnika binarne provjere (npr. parnost ili kontrolni bitovi). Time se znatno povećava vjerovatnoća ispravnog prijema bar jedne poruke pri slabijem signalu (na većoj razdaljini). U projektu je postignuta komunikacija na daljini od preko jednog kilometra.

Neke mogućnosti daljeg usavršavanja su:

- Povećanje dometa signala za komunikaciju između mikrokontrolera, što je moguće ugradnjom jače antene.
- Dodavanje većeg broja senzora, kao npr: brzina i smjer vjetra, količina padavina, jačina UV svjetlosti i drugih.
- Realizacija složenijeg pregleda grafika, tako da se na zahtjev može pogledati duža istorija tokom mjeseci i godina, upoređujući mjerene veličine.
- Računanje statistike i parametara koji su bitni za rast, sazrijevanje i zdravlje biljke, kao i razvoj štetočina. Ovo se može sprovesti na jednom od mikrokontrolera ili na samom serveru.

## Literatura

1. Joshua Hrisko, "Capacitive Soil Moisture Sensor Theory, Calibration, and Testing", Research Gate, 2020
2. John Gialelis, Maria Fokaeos, Gerasimos Theodorou, Christos Paparizos, Nikos Tsafas, A Low Cost Energy Efficient IoT Node Utilized in the Agricultural Field, 2020 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), 1-6.
3. Vesna Maraš, Tomo Popović, Spasenija Gajinov, Milena Mugoša, Vladimir Popović, Ana Savović, Katarina Pavićević, Vasilije Mirović, Precision Viticulture Using Wireless Sensor Network, 2020 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), 1-6.
4. Peter Dalmaris, "KiCAD Like A Pro: Learn The World's Favourite Open Source PCB Electronic Design Automation tool!", Tech Explorations, 2016
5. Semtech Corporation, AN1200.22 LoRa™ Modulation Basics, 2015
6. Texas Instruments, LM317 3-Terminal Adjustable Regulator, SLVS044Y – SEPTEMBER 1997 – REVISED APRIL 2020
7. Texas Instruments, LM340, LM340A and LM7805 Family Wide  $V_{IN}$  1.5-A Fixed Voltage Regulators, SNOSBT0L – FEBRUARY 2000 – REVISED SEPTEMBER 2016
8. Heltec, <https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>, Pristupljeno 25.3.2021.
9. Heltec Automation Docs, Heltec ESP32+LoRa Series Quick Start, [https://heltec-automation-docs.readthedocs.io/en/latest/esp32/quick\\_start.html#via-arduino-board-manager](https://heltec-automation-docs.readthedocs.io/en/latest/esp32/quick_start.html#via-arduino-board-manager), Pristupljeno 25.3.2021.
10. LoRa Alliance, <https://lora-alliance.org/>, Pristupljeno 25.3.2021.
11. LoRa Developers Portal, LoRa® and LoRaWAN® <https://lora-developers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>, Pristupljeno 25.3.2021.
12. Thing Speak, <https://thingspeak.com/>, Pristupljeno 25.3.2021.
13. Link Labs, What Is LoRa? A Technical Breakdown, <https://www.link-labs.com/blog/what-is-lora>, Pristupljeno 25.3.2021.
14. IOT Assistant, How to enable hardware WDT on ESP32 using Arduino IDE, <https://iotassistant.io/esp32/enable-hardware-watchdog-timer-esp32-arduino-ide/>, Pristupljeno 25.3.2021.
15. <http://www.meconet.me/Products>, Pristupljeno 25.3.2021.