

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Edin Kočo

Razvoj i izrada uređaja za kontinuirani nadzor i
upravljanje agrikulturnim sustavima

Zagreb, travanj 2013.

Ovaj rad izrađen je u Laboratoriju za Robotiku i Inteligentne Sustave Upravljanja, pri Zavodu za Automatiku i Računalno Inženjerstvo pod vodstvom prof. dr. sc. Zdenka Kovačića i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2013.

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Pregled rada	3
2.1. Programska podrška	7
2.1.1. Izbornik komunikacijskih postavki	9
2.1.2. Izbornik za prikupljanje i obradu podataka	12
2.2. Senzorska stanica	32
2.3. Upravljačka stanica	38
2.4. Prikaz djelomične implementacije i dobivenih rezultata	40
3. Mikrokontrolerski sustav	45
3.1. Korišteni komunikacijski protokoli	48
3.1.1. Serijska UART komunikacija	49
3.1.2. I^2C komunikacija	52
3.1.3. SPI komunikacija	56
3.2. Programska podrška za korištene periferne jedinice	59
3.2.1. $GPIO$ jedinica	59
3.2.2. Analogno digitalni pretvornik	61
3.2.3. 16 i 32 bitni timeri	61
3.2.4. $UART$, I^2C i SSP periferna jedinica	63
4. Sustav prikupljanja podataka	65
4.1. Senzori	65
4.1.1. Senzor tlaka - BMP085	65
4.1.2. Senzor tlaka - MPL115A1	70
4.1.3. Senzor vlažnosti zraka - $DHT11$	73
4.1.4. Senzor temperature - KTY 81	77
4.1.5. Senzor osvjetljenja - BPW 40	80
4.1.6. Senzor vlažnosti tla na senzorskoj sondi	82

4.1.7. Senzor i <i>AFE</i> rješenje za mjerenje pH vrijednosti - LMP01200	83
4.1.8. Senzor i <i>AFE</i> rješenje za mjerenje koncentracije <i>CO₂</i> - LMP91050	86
4.2. Opis senzorskih sondi.	88
4.2.1. Analogno digitalni pretvornik <i>ADS1015</i>	91
4.2.2. Ulazno-izlazno proširenje <i>MCP23009</i>	93
4.2.3. Programska podrška za dobivanje mjerenja sa senzorske sonde	95
4.3. Proračun dodatnih podataka	96
4.3.1. Proračun trenutne visine	96
4.3.2. Proračun prognoze vremena	97
4.3.3. Proračun točke rosišta i visine oblaka.	99
4.3.4. Proračun evapotranspiracije	100
4.3.5. Proračun vjerojatnosti izbivanja bolesti biljaka	104
4.4. GPS sustav lociranja modula - SirfStar II	107
4.4.1. Poruke <i>NMEA</i> protokola	109
4.4.2. Implementacija GPS pozicioniranja na mikrokontroleru	112
4.5. Mjerenje trenutnog vremena - RTC PCF 8586.	114
5. Memorijski sustav za spremanje podataka i programska podrška	118
5.1. Realizacija spremanja i čitanja sa EEPROM memorije.	120
5.2. Organizacija memorijskog prostora	123
5.3. Pretraživanje memorijskog prostora	128
6. Sustav prijenosa i prezentacije podataka	129
6.1. X-Bee komunikacija za bežični pristup podacima.	132
6.1.1. Implementacija komunikacije sa modulom.	134
6.1.2. Implementacija komunikacije sa mikrokontrolerom	138
6.1.3. Ostvarena programska podrška za razmjenu podataka	139
6.2. LCD ekran za lokalni pristup podacima	143
6.2.1. Povezivanje LCD ekrana i mikrokontrolera	143
7. Sustav napajanja i mjerenja potrošnje	146
7.1. Mjerenja veličina struje	150
8. Izrada električne sheme i PCB-a senzorske stanice	154
9. Zaključak	160
10. Literatura	161

11. Sažetak	166
12. Summary	167

Popis slika

1.1	Stanica tvrtke Sutron	2
1.2	Stanica tvrtke Pinova-Meteo	2
2.1	Apstraktan prikaz sustava za kontinuirani nadzor i upravljanje agrikulturnim sustavima	4
2.2	Glavni prozor nakon pokretanja programske podrške	7
2.3	Izbornik za ostvarivanje serijske komunikacije prema komunikacijskom modulu na računalu	10
2.4	Uspješno povezivanje sa komunikacijskim modulom na računalu	10
2.5	Izbornik za traženje stanica u blizini	10
2.6	Odabir pronađene stanice kako bi se pristupilo njenim podacima	10
2.7	Prikaz lokacije pronađene senzorske stanice	11
2.8	Izbornik za podešavanje komunikacijskog modula spojenog na korisničko računalo	12
2.9	Izbornik za podešavanje komunikacijskog modula spojenog na odabranu stanicu	12
2.10	Podizbornik za preuzimanje i spremanje podataka	13
2.11	Odabir mjerenja koja se žele preuzeti	14
2.12	Odabir vremenskog intervala koji nas zanima	14
2.13	Prikazani preuzeti podaci	15
2.14	Podprozor za grafički prikaz dobivenih mjerenja	16
2.15	Prikaz odabira temperaturnih mjerenja za dan 7.4.2013	17
2.16	Dodatne mogućnosti podešavanja izgleda grafa	18
2.17	Dodatne mogućnosti nakon iscertavanja željenog grafa	18
2.18	Prikaz mjerenja temperature zraka za dan 7.4.2013	18
2.19	Prikaz mjerenja tlaka zraka za dan 7.4.2013	19
2.20	Drugačiji prikaz mjerenja temperature zraka za dan 7.4.2013	19
2.21	Drugačiji prikaz mjerenja tlaka zraka za dan 7.4.2013	19
2.22	Odabir dodatnog proračuna u podizborniku "Additional Calculations"	20
2.23	Prikaz učitanih parametara potrebnih za proračun vjerojatnosti pojave bolesti "Botryosphaeria dothidea" za kulturu jabuke	21
2.24	Prikaz vjerojatnosti pojave bolesti "Botryosphaeria dothidea" za kulturu jabuke prilikom rada senzorske stanice u prirodi	22
2.25	Dodatne opcije za prikaz točke rosišta	22

2.26	Proračunata točka rosišta prema Magnusovom modelu za dan 8.4.2013.	23
2.27	Proračunata točka rosišta prema jednostavnoj aproksimaciji za dan 8.4.2013.	23
2.28	Postavke za izračun evapotranspiracije	24
2.29	Prozor za pokretanje proračuna visine i temperature oblaka	25
2.30	Izračunata visina oblaka na temelju mjerenja za dan 8.4.2013. u zatvorenoj prostoriji	25
2.31	Izračunata temperatura oblaka na temelju mjerenja za dan 8.4.2013. u zatvorenoj prostoriji	25
2.32	Izgled sučelja za podešavanje postavki senzorske stanice	26
2.33	Prikaz lokacije pronađene senzorske stanice	27
2.34	Preuzimanje proizvoljnog broja zadnjih dijagnostičkih poruka sa odabrane senzorske stanice	28
2.35	Konceptualni prikaz načina upravljanja zelenom površinom	30
2.36	Podešavanje načina upravljanja	31
2.37	Izrađena senzorska stanica	32
2.38	Izrađena senzorska stanica sa označenim dijelovima	33
2.39	Indikacija paljenja senzorske stanice	34
2.40	Indikacija konfiguriranja senzorske stanice nakon paljenja	34
2.41	Čitanje zadnje vrijednosti temperature	35
2.42	Čitanje zadnje vrijednosti tlaka zraka	35
2.43	Prikaz dijagnostičke poruke paljenja stanice	35
2.44	Prikaz vremena paljenja stanice	35
2.45	Prikaz dijagnostičke poruke pristupa podacima daljinskom vezom	36
2.46	Prikaz vremena pristupa podacima	36
2.47	Izgled izrađene senzorske sonde za dobivanje dodatnih mjerenja	36
2.48	Način povezivanja senzorske stanice i senzorske sonde	36
2.49	Unutrašnjost izrađene senzorske stanice	37
2.50	Pronađena upravljačka i senzorska stanica	38
2.51	Upravljačka stanica u razvojnoj fazi	38
2.52	Postava za ispitivanje rada senzorske stanice	40
2.53	Sonda za mjerenje vlažnosti i temperature zemlje	40
2.54	Prikaz izmjerene temperature zraka prilikom testiranja	41
2.55	Prikaz izmjerene vlažnosti zraka prilikom testiranja	41
2.56	Prikaz promjene tlaka zraka prilikom testiranja	42
2.57	Prikaz promjene osvjetljenja prilikom testiranja	42
2.58	Prikaz promjene vlažnosti zemlje prilikom testiranja	42
2.59	Prikaz promjene temperature zemlje prilikom testiranja	43
2.60	Izračunata točka rosišta prema Magnusovom modelu	43
2.61	Izračunata visina oblaka iz dobivenih mjerenja	43
2.62	Površina za testiranje cijeloga sustava	44
2.63	Površina za testiranje cijeloga sustava	44
2.64	Korištena prskalica za zalijevanje trave	44
2.65	Dva elektromagnetska ventila za upravljanje zalijevanjem	44
2.66	Razvodne cijevi prema prskalicama	44

3.1	Razvojna pločica <i>LPCXpresso</i> sa JTAG debuggerom i mikrokontrolerom <i>LPC1343</i>	45
3.2	Blokovski prikaz mikrokontrolera <i>LPC1343</i> baziranog na ARM Cortex-M3 arhitekturi	47
3.3	Prijenos poruka UART komunikacijom	51
3.4	Konfiguracija <i>I²C</i> sabirnice	53
3.5	Prikaz stanja <i>I²C</i> sabirnice pri upisu podatka na podređeni čvor na adresi 1010000	54
3.6	Prikaz stanja <i>I²C</i> sabirnice pri čitanju podataka sa podređenog čvora na adresi 1010000	55
3.7	Standardno povezivanje čvorova na <i>SPI</i> sabirnici	57
3.8	Način rada <i>SPI</i> komunikacije	57
3.9	Ovisnost signala <i>SPI</i> komunikacije o odabiru parametara <i>Polarity</i> i <i>Phase</i>	58
3.10	Shema rada <i>GPIO</i> jedinice	60
4.1	Izgled senzora tlaka <i>BMP085</i>	66
4.2	Shema spajanja <i>BMP</i> senzora na mikrokontroler	66
4.3	Tijek radnji za dobivanje mjerenja senzora <i>BMP085</i>	69
4.4	Izgled senzora tlaka <i>MPL115A1</i>	70
4.5	Blokovska shema senzora <i>MPL115A1</i>	70
4.6	Tijek radnji za dobivanje mjerenja senzora <i>MPL115A1</i>	72
4.7	Aktivna površina za detekciju vlažnosti zraka	73
4.8	Izgled senzora vlage DHT 11	75
4.9	Shema spajanja DHT senzora na mikrokontroler	75
4.10	Primjer zahtjeva za podacima nadređenog sustava <i>MCU</i> i primanje informacija sa senzora <i>DHT</i>	76
4.11	Izgled senzora temperature KTY 81	77
4.12	Shema spajanja KTY 81 senzora	77
4.13	Krivulja analognog senzora temperature KTY 81	79
4.14	Krivulja senzora KTY 81 i linearna aproksimacija na području -20 do 50 [°C]	79
4.15	Ukupna pogreška mjerenja temperature zbog linearizacije i AD pretvorbe senzora KTY 81	79
4.16	Fotootpornik <i>LDR07</i>	81
4.17	Fotodiode <i>BPW40</i>	81
4.18	Spektralna osjetljivost fotodiode <i>BPW40</i>	81
4.19	Promjena struje fotodiode <i>BPW40</i> u ovisnosti o intenzitetu svjetlosti	81
4.20	Sonde za detekciju vlage tla	82
4.21	Način povezivanja sonde za mjerenje vlažnosti tla	82
4.22	<i>AFE</i> rješenje za mjerenje pH vrijednosti <i>LMP91200</i>	85
4.23	Povezivanje <i>LMP91200</i> sa pH sondom i nadređenim sustavom	85
4.24	Princip rada <i>NDIR</i> senzora	87
4.25	Senzor za detekciju <i>CO₂</i> , <i>MG811</i>	87
4.26	<i>AFE</i> rješenje za mjerenje prisutnosti plinova <i>LMP91050</i>	87
4.27	Prikaz senzorskih sonde	88
4.28	Korišteni konektor za senzorsku sondu	90

4.29	Raspored signala na konektoru za senzorsku sondu	90
4.30	Funkcijska blokovska shema za <i>ADS1015</i>	91
4.31	<i>ADS1015</i> registri dostupni korisniku	92
4.32	Korišteno proširenje <i>MCP23009</i> u DIP 18 kućištu	93
4.33	Blokovska shema IO proširenja <i>MCP23009</i>	93
4.34	Profil ovisnosti visine o mjerenom tlaku	97
4.35	Prikaz evapotranspiracije	100
4.36	Profil ovisnosti uvjeta duljine vlažnosti o temperaturi	106
4.37	Korišteni čip za dobivanje lokacije <i>SirfStar II</i>	107
4.38	GPS sateliti u zemljinoj orbiti	107
4.39	Korišteni GPS modul baziran na <i>SirfStar II</i> čipu	108
4.40	Blokovski dijagram korištenog GPS modula	108
4.41	Apstraktan prikaz dobivanja pozicije senzorskog modula	110
4.42	Svi izlazi čipa <i>PCF8563</i>	114
4.43	Povezivanje RTC čipa <i>PCF8563</i>	114
4.44	Blokovska shema korištenog RTC-a sa memorijskim lokacijama	115
5.1	Dijagram toka za spremanje podataka u senzorsku memoriju	119
5.2	Memorijska organizacija podatkovne strukture	125
5.3	Memorijska organizacija spremanja podatkovnih struktura	126
5.4	Memorijska organizacija spremanja konfiguracijskih podataka	127
6.1	Pregled komunikacijskog sustava	131
6.2	Izgled XBee-PRO modula	133
6.3	Ulazi i izlazi XBee-PRO modula	133
6.4	Općenita poruka pri komunikaciji u API modu	135
6.5	Korišteni API frame-ovi	137
6.6	Korišteni 16-segmentni LCD ekran <i>GDM1601E</i>	144
6.7	Izgled i topologija čipa <i>ULN2803</i>	144
6.8	Prikaz načina spajanja LCD modula sa mikrokontrolerom	144
7.1	Korišteni regulator napona <i>MIC5205</i>	148
7.2	Način spajanja regulatora <i>MIC5205</i>	148
7.3	Korišteni regulator napona <i>MCP1804</i>	148
7.4	Način spajanja regulatora <i>MCP1804</i>	148
7.5	Korišteni regulator napona <i>LM1117</i> 3.3 [V]	148
7.6	Način spajanja regulatora <i>LM1117</i>	148
7.7	Shema upravljanja napajanjem	149
7.8	Highside mjerenje struje	151
7.9	Lowside mjerenje struje	151
7.10	Diferencijalno pojačalo napona	151
7.11	Spoj naponskog sljedila	151
7.12	Instrumentacijsko pojačalo sa offsetom	153
7.13	Čip <i>OP07</i> sa operacijskim pojačalom	153

7.14	Čip <i>TL072</i> sa operacijskim pojačalima	153
8.1	Prikaz dijela električne sheme sa mikrokontrolerom i XBee modulom	155
8.2	Prikaz dijela električne sheme sa memorijskim modulima	155
8.3	Prikaz dijela električne sheme sensorima i RTC modulom	156
8.4	Prikaz dijela električne sheme sa operacijskim pojačalima za mjerenje struje	156
8.5	Prikaz dijela električne sheme sa vezama prema senzorskim sondama	157
8.6	Prikaz dijela električne sheme sa regulatorima napajanja	157
8.7	Prikaz dijela električne sheme sa priključkom za LCD ekran	158
8.8	Prikaz dijela električne sheme senzorskih sondi	158
8.9	Konačan izgled PCB-a poslan na izradu	159
8.10	Izrađena elektronička pločica	159

1. Uvod

Za kvalitetno upravljanje poljoprivrednim zemljištima i nasadima potrebno je osigurati kvalitetno, brzo i jednostavno mjerenje različitih fizikalnih veličina. Kao bitne veličine mogu se nabrojati: temperatura zraka, vlažnost zraka, tlak zraka, vlažnost zemlje itd. Dobivanjem mjerenja i njihovim spremanjem te statističkom obradom omogućuje se detaljan uvid u sva stanja poljoprivredne površine. Prezentacijom tih podataka moguće je optimizirati poslovanje, te osigurati određene preinake kako bi se povećala rodnost kulture, uštedili energenti i smanjio rizik ulaganja. Dobivena mjerenja moguće je iskoristiti kao povratnu vezu pri automatizaciji upravljanja poljoprivrednom površinom. Na vrlo jednostavan način moguće je dodatno smanjiti troškove automatizacijom sustava zalijevanja zelenih površina. Time se dodatno smanjuje potreba za ljudskim resursima ili sirovinama te se osigurava da se određene fizikalne vrijednosti (temperatura, vlažnost ili osvjetljenje) drže unutar definiranih granica.

Očito je, da bi izrada ovakvog sustava bila visoko primjenjiva za poljoprivredne poduzetnike koji su voljni uložiti u ovakva tehnološka rješenja. U ovom segmentu razvoja nazire se nekoliko poznatih rješenja od kojih će se prikazati:

- Slika 1.1 - Senzorska postaja tvrtke Sutron [1]
- Slika 1.2 - Senzorska postaja tvrtke Pinova-Meteo [2]

Većina spomenutih implementacija su skupa i glomazna. Gotovo sva spomenuta rješenja omogućavaju nadgledanje stanja poljoprivredne površine bez mogućnosti njihovog upravljanja. Postavljanje ovih rješenja nerijetko uključuje potrebu za građevinskim radovima izrade betonskog postolja te dovođenje energetskih vodova. Nefleksibilnost i visoka cijena su najveća mana do sada razvijenih sustava koja stvaraju skepticizam kod privatnika. Cilj rada na ovome projektu je razvoj i izrada uređaja za kontinuirani nadzor i upravljanje agrikulturnim sustavima kako bi se objedinila kvaliteta, fleksibilnost i cijena u jednom proizvodu. Ovaj rad uključuje izradu senzorske stanice za prikupljanje podataka, upravljačke stanice za upravljanje određenim veličinama i programske podrške za prikaz i obradu podataka. U uvodu su opisani koncepti i korištenje svih spomenutih dijelova, bez detaljnog ulaganja u problematiku izrade. U dijelu tehničke dokumentacije prikazana je detaljna



Slika 1.1. Stanica tvrtke Sutron



Slika 1.2. Stanica tvrtke Pinova-Meteo

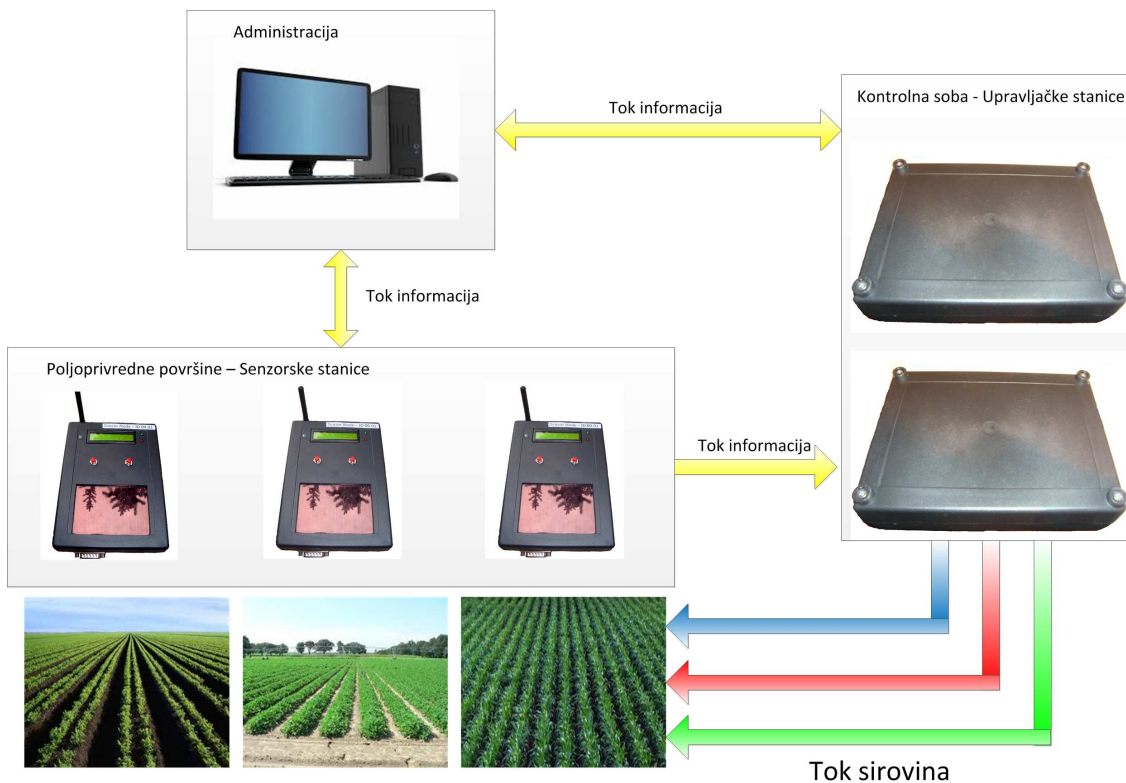
analiza postupka izrade senzorske stanice. Postupak izrade upravljačke stanice opisan je konceptualno jer je trenutno u razvojnoj fazi. Konačno, programska podrška detaljno je opisana u uvodu, dok implementacija neće biti opisana u ovom radu.

2. Pregled rada

Razvijani sustav sastoji se od proizvoljnog broja senzorskih i upravljačkih stanica sa definiranom adresom. Svaka senzorska stanica razlikuje se po definiranoj heksadecimalnoj adresi u rasponu od 0x0001-0x00FF, dok svaka upravljačka stanica ima adrese definirane u rasponu 0x0100-0x01FF. Senzorske stanice postavljaju se na zanimljive lokacije na poljoprivrednoj površini. Apstraktan prikaz konfiguracije sustava za kontinuirani nadzor i upravljanje agrikulturnim sustavima prikazan je na Slici 2.1. Mogućnost integracije do 255 sonde u sustav omogućuje iznimno veliko pokrivanje različitih konfiguracija terena. Svaka senzorska stanica posjeduje glavnu jedinicu, izlaz za sondu za mjerenje temperature i vlage tla, te dva priključka za periferne sonde ili vanjske jedinice. Sonde su napajane iz baterijskog i solarnog napajanja te je osigurana njihova energetska autonomija. Senzorska stanica prikuplja podatke o mikroklimatskim promjenama na svojoj lokaciji i iste sprema u unutarnju memoriju. Korisnik može definirati u kojim intervalima se prikupljaju podaci sa svih senzora stanice. Vremena uzorkovanja kreću se od 1 minute pa na više. Nakon svakog uzorkovanja, mjerenja se spremaju u internu memoriju koju je moguće proširiti prema potrebi, zajedno s vremenom kada je mjerenje uzeto. Maksimalnim proširenjem memorije na senzorskoj stanici moguće je spremati podatke preko mjesec dana.

Podacima je moguće pristupiti lokalno, pomoću mini LCD ekrana na samoj senzorskoj stanici ili daljinski pomoću aplikacije za korisnike. Svaka senzorska i upravljačka stanica posjeduje modul za bežičnu komunikaciju čiji doseg iznosi 1600 [m]. Korisnička aplikacija omogućuje skeniranje područja oko osobnog računala i pronalazak svih stanica koje se nalaze na tom području. Korisnik može zahtijevati od svake stanice izlist mjerenja koje ta stanica provodi. Odabirom željenih mjerenja te vremenskog intervala u kojem želimo pronaći podatke, moguće je iste preuzeti, grafički prikazati i obrađivati. Korisniku se nude mnoge opcije proračuna dodatnih podataka. Neki od dodatnih podataka koje je moguće proračunati su: predikcija bolesti biljaka, količina evapotranspiracije ili proračun kratkoročne vremenske prognoze. Svaka senzorska stanica posjeduje mogućnost proračuna vlastite pozicije pomoću GPS modula kako bi korisnik vrlo jednostavno vidio pozicije svih spojenih senzorskih stanica u blizini.

Ukoliko je potrebno, zadnjim mjerenjima moguće je pristupiti direktno na stanici. Korisnik pritiskom na dva tipkala može pregledavati vrijednosti zadnjih mje-



Slika 2.1. Apstraktan prikaz sustava za kontinuirani nadzor i upravljanje agrikulturnim sustavima

renja. Također, moguće je pregledavati i zadnje dijagnostičke poruke sa vremenom njihovog generiranja. Tako npr. moguće je vidjeti kada je stanica upaljena, kada se provodio daljinski zahtjev za informacijama ili kada se dogodio određeni alarm. Implementirane su mnoge različite dijagnostičke poruke koje daju korisniku detaljan uvid u zadnje procese koji su se događali. Na senzorskoj stanici nalaze se izlazi za proširivanje. Stanica može automatski detektirati kada je određeno proširenje spojeno ,te nakon toga automatski kreće preuzimanje podataka sa spojenog proširenja.

Upravljačke stanice zamišljene su za montiranje u prostor gdje je moguće upravljati određenim veličinama koje utječu na promatrana mjerenja senzorskih stanica. Ukoliko je potrebno upravljačka stanica može se postaviti na poziciju gdje se lakše može upravljati ventilima koji upravljaju zalijevanjem, klimatizacijom koja upravlja temperaturom ili opremom koja upravlja osvjetljenjem. Svako senzorskoj stanici moguće je dodijeliti određenu upravljačku stanicu te određene izlaze na istoj. Upravljačka stanica posjeduje mnoštvo digitalnih izlaza na kojima se nalaze releji. Njima je omogućeno upravljanje otvaranjem i zatvaranjem ventila, paljenjem ili gašenjem svjetla ili paljenjem i gašenjem grijanja. U okviru programske podrške za krajnjeg korisnika, moguće je pridjeljivati upravljačke stanice i njihove izlaze svakoj senzorskoj stanici. Moguće je definirati do četiri promatrana mjerenja kojima se želi upravljati.

Za svako odabrano mjerenje može se odrediti paljenje određenog digitalnog izlaza ukoliko mjerenje premaši definiranu gornju ili donju razinu. Korisnik zatim može definirati želi li da izlaz bude upaljen cijelo vrijeme dok je granica prijeđena ili određeni broj sekundi. Nakon što korisnik odredi zakon upravljanja prema konfiguraciji spajanja upravljačkih signala na upravljačkoj stanici, konfiguracija se prenosi na senzorske i upravljačke stanice i automatski se počinje izvršavati. Ukoliko senzorska stanica nakon prikupljanja mjerenja primjeti da je premašena gornja ili donja granica, tada pokreće slanje informacije specificiranoj upravljačkoj stanici da upali ili ugasi određene izlaze. Ukoliko se želi upravljati zalijevanjem potrebno je podesiti donju granicu na mjerenje vlažnosti tla, te digitalni izlaz spojiti za upravljanje elektromagnetskim ventilom. Ukoliko nakon mjerenja vlažnosti tla, sonda "osjeti" da je vlažnost ispod razine, tada će poslati informaciju upravljačkoj stanici da uključi elektromagnetski ventil i pokrene zalijevanje na određeno vrijeme.

Upravljačka stanica također posjeduje spremnik dijagnostičkih poruka u kojeg se spremaju informacije o zahtjevima pojedine senzorske stanice za promjenom stanja digitalnog izlaza. Na upravljačkoj stanici postoje 8 analognih ulaza koji omogućuju spajanje mjerača potrošnje, mjerača protoka ili bilo kojeg drugog uređaja na zahtjev korisnika. Time je omogućeno mjerenje, primjerice potrošnje vode prilikom zalijevanja ili potrošnje struje prilikom rada pumpe. Informacije se spremaju u internu memoriju i dostupne su korisniku preko daljinskog pristupa. Na taj način moguće je optimizirati potrošnju, imati stalni nadzor nad potrošnjom sustava te generirati financijska izvješća.

U trenutnoj fazi projekta izrađena je programska podrška i senzorska stanica te je osmišljen koncept upravljačke stanice. Upravljačka stanica je testirana na proto-boardu i trenutno je u fazi razvoja. U trenutnoj verziji senzorske stanice omogućeno je povezivanje do dva dodatna modula. Senzorska stanica posjeduje mogućnost mjerenja sljedećih veličina:

- Temperatura zraka
- Vlažnost zraka
- Tlak zraka
- Osvjetljenje
- Mjerenje potrošnje modula
- Mjerenje stanja baterijskog napajanja
- Proračun GPS pozicije
- Vlažnosti tla
- Temperature tla

uz posredna mjerenja u sklopu programske podrške:

- Točke rosišta
- Visine senzorske stanice
- Visine i temperature oblaka
- Evapotranspiracije
- Kratkoročne vremenske prognoze
- Proračun vjerojatnosti pojave bolesti kultura

Uz razvoj senzorske stanice razvijena je i senzorska sonda koja se spaja na ulaz senzorske stanice i koja omogućuje mjerenje sljedećih veličina:

- Temperatura iznad tla
- Temperatura tla
- Vlažnost tla
- pH vrijednost tla
- Koncentracija CO_2
- Tlak zraka
- Vlažnost zemlje
- Temperatura zemlje

Ovoj senzorskoj sondi dodjeljeno je ime *Probe1*. Prema potrebi korisnika drugi izlaz senzorske stanice može se koristiti za nadogradnju sustava. Prema potrebi moguće je izraditi sonde za provedbu drugih mjerenja kao:

- Mjerenje brzine i smjera vjetra
- Mjerenje solarnog zračenja
- Mjerenje vlažnosti tla prema dubini itd.

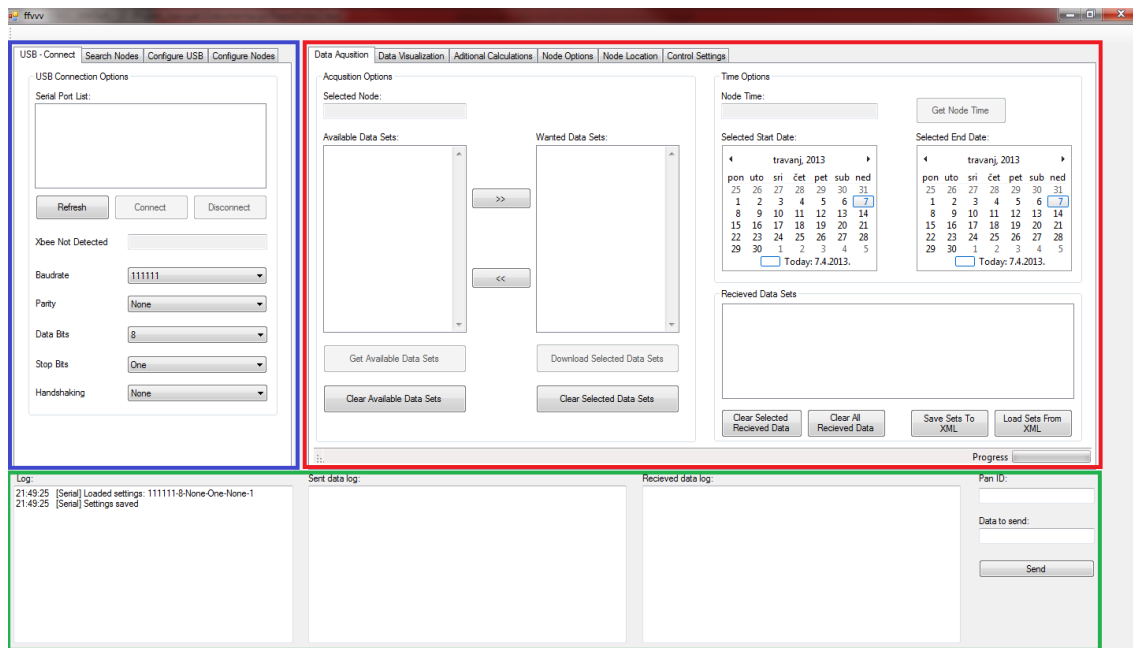
Priključci za spajanje proširenja opremljeni su sa svim potrebnim komunikacijskim signalima kako bi platforma bila pripremljena za buduća unaprijeđenja prema željama korisnika.

2.1. Programska podrška

Najbitnije karakteristike ovog sustava za krajnjeg korisnika su kvaliteta mjerenja i jednostavnost uporabe. Imajući to na umu pri izradi programske podrške za ovaj sustav pazilo se na jednostavnost i intuitivnost sustava, dok je u isto vrijeme pokušano osigurati dovoljnu fleksibilnost kako krajnji korisnik ne bi bio zakinut za sve mogućnosti ovog sustava. Kao odabrana platforma za izradu programskog alata korišteno je .NET okruženje i programski jezik C#. Programska podrška razvijala se uz pomoć [3] i dostupnih materijala na internetu. Visoka razina ovog jezika, mogućnost objektno orijentiranog programiranja i izvrsna podrška omogućila je brz razvoj kvalitetnog programskog rješenja za upravljanje ovim sustavom. U nastavku je opisano korištenje izrađenog programskog alata i opis većine mogućnosti koje on nudi. Programska podrška je pisana na engleskom jeziku, dok je u planu izrada višejezičnog sučelja ukoliko to bude potrebno.

Izgled korisničkog sučelja nakon otvaranja aplikacije prikazan je na Slici 2.2. Korisničko sučelje je podijeljeno na tri glavna dijela koja su jasno označena na Slici 2.2:

1. Informacijske poruke - Zelena boja
2. Komunikacijske postavke - Plava boja
3. Prikupljanje i obrada podataka - Crvena boja



Slika 2.2. Glavni prozor nakon pokretanja programske podrške

Dio informacijskih poruka sastoji se od tri prozora: Dnevnik (eng. Log), Dnevnik poslanih poruka (eng. Sent data log) i Dnevnik primljenih poruka (eng. Received data log). U prozoru dnevnika poslanih i primljenih poruka pojavljuju se podaci u heksadecimalnom zapisu, podataka koji su poslani odnosno primljeni preko bežične komunikacije. Svaki unos u dnevnik započinje s vremenom pojave poruke. Pregledom poslanih i primljenih poruka moguće je primijetiti neodgovaranje određene stanice i samim time se može dijagnosticirati određeni problem komunikacije. Sve poruke koje se pošalju prema stanicama u pravilu zahtijevaju odgovor od stanice. Korisnik je obaviješten o grešci tako što nakon slanja poruke ispisuje: vrijeme kada je poruka poslana, adresu na koju se šalje poruka, sadržaj poruke, informacija o tome je li poruka poslana bežičnim putem i informacija da li je poruka primljena na određitu. Primjer ispisa uspješnog slanja poruke sadržaja 00 na adresu 00-01 glasi:

```
22:07:09 ID: 0001 Data: 00 Status: OK Response Status: RESPONSE RECEIVED
```

Neke od informacija koje se mogu ispisati pod "Status" odnosno informacije o slanju na uređaj spojen na korisničko računalo su: "OK" - Poruka je uspješno poslana, "TIMEOUT" - Nema odgovora modula, "NO ACK" - nije dobivena potvrda primitka. Poruka "TIMEOUT" najčešće znači da modul nije spojen na računalo dok "NO ACK" najčešće znači pogrešku serijskog pretvornika između komunikacijskog modula i USB priključka na računalo. Neke od informacija koje se mogu ispisati pod "Response Status" odnosno informacije o tome je li poruka primljena na željenom određitu su: "RESPONSE RECEIVED" - Poruka je uspješno primljena na određitu, "CCA ERROR" - Pogreška zbog smetnje na kanalu, "NO ACK" - Poruka nije primljena ili stanica ne postoji.

U prozoru "Received data log" ispisuju se poruke u obliku: Vrijeme primljene poruke, adresa čvora sa kojeg je stigla poruka i sadržaj poruke u heksadecimalnom obliku:

```
22:07:09 ID: 0001 Data: 00-01-02-03-04
```

Za krajnjeg korisnika ispisi u spomenutim prozorima nisu zanimljivi. Zanimljive informacije za korisnika pojavljuju se u prozoru "Log". Bilo kakva akcija korisnika ispisuje se u ovom prozoru zajedno sa vremenom izvršavanja. Količina poruka koje se mogu generirati je izuzetno velika. U daljnjem razvoju ovog sustava planira se uvođenje korisničkog računa za svakog korisnika, sa različitim razinama pristupa. Prije pokretanja korisnik unosi svoje korisničko ime i lozinku te se sve informacije o radnjama koje je određeni korisnik radio, spremaju se u memoriju. Ovime bi se spriječila neovlaštena uporaba ili zlonamjerne radnje.

2.1.1. Izbornik komunikacijskih postavki

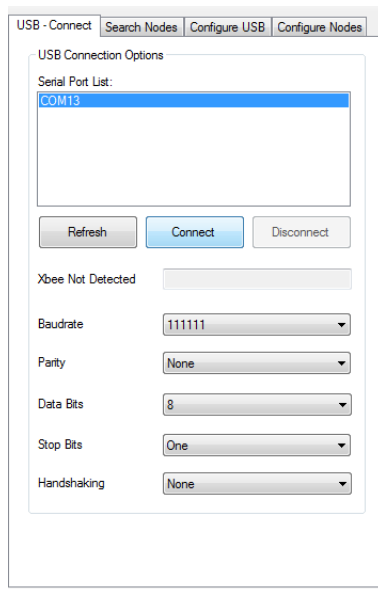
Izbornik komunikacijskih postavki služi za podešavanje komunikacije između korisničkog računala i obližnjih stanica. Sastoji se od četiri podprozora:

1. "USB - Connect" - Podešavanje postavki serijske veze prema komunikacijskom uređaju spojenom na korisničko računalo
2. "Search Nodes" - Pretraživanje okolnog prostora kako bi se identificirale obližnje stanice
3. "Configure USB" - Podešavanje postavki komunikacijskog uređaja spojenog na korisničko računalo
4. "Configure Nodes" - Podešavanje postavki komunikacijskog uređaja spojenog na definiranu stanicu

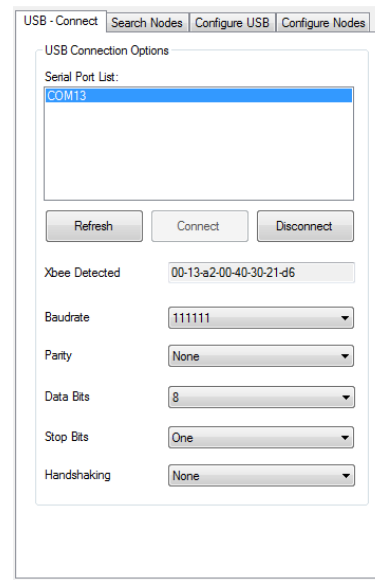
Izbornikom "USB - Connect" potrebno je ostvariti serijsku vezu prema komunikacijskom modulu spojenom na računalo. Izgled ovog izbornika prikazan je na Slici 2.3. Sve postavke komunikacije su već predpodešene i nije ih potrebno mijenjati. Za naprednije korisnike ostavljene su dodatne opcije. Pritiskom na tipku "Refresh", prikazuju se mogući portovi na koje je spojen komunikacijski modul. Ukoliko se ne prikaže niti jedna opcija nakon pritiska "Refresh", potrebno je provjeriti način povezivanja i osigurati da su instalirani driveri za komunikacijski modul. Nakon odabira porta, pritiskom na tipku "Connect" povezujemo se sa modulom. Ukoliko je povezivanje obavljeno uspješno, ispisuje se "Xbee Detected" i jedinstveni 64-bitni identifikacijski kod komunikacijskog uređaja, kao što je to prikazano na Slici 2.4. Veza se u svakom trenutku može zaustaviti pritiskom na tipku "Disconnect". Provedba povezivanja sa komunikacijskim modulom nužno je nakon svakog pokretanja programa i obavezan je preduvjet za bilo kakav oblik komunikacije sa stanicama.

Zatim, izborom podprozora "Search Nodes" prikazanog na Slici 2.5 korisnik može pretražiti okolni prostor za svim uključenim senzorskim i upravljačkim stanicama. Pritiskom na tipku "Search Nodes" provodi se postupak skeniranja prostora koji traje približno 5 sekundi. Kako bi korisnik pristupio određenoj stanici potrebno je označiti stanicu koja se pojavila u prozoru "Node List" i pritisnuti tipku "Select Node". Nakon pritiska "Select Node", 64-bitni identifikacijski kod ispisuje se u prozoru "Selected Node" koji obavještava koja je stanica trenutno odabrana. Podprozor "Search Nodes" nakon odabira stanice prikazan je na Slici 2.5.

Prilikom ovog skeniranja pronađena je jedna stanica na adresi 00 – 01 što označava senzorsku stanicu. Uz adresu senzorske stanice i 64-bitni kod prikazan je i iznos koji određuje kvalitetu signala. Ukoliko je pronađeno više njih, pritiskom na tipku "Show Node On Map" otvara se prikaz geografske karte sa pozicijama svih pronađenih stanica. Pozicija koja se u ovom slučaju dobiva je zadnja točna pozicija spremljena u memoriji svake senzorske stanice. Ukoliko pozicija nije dovoljno točna, moguće je zahtijevati od senzorske stanice ponovno traženje GPS pozicije, što će

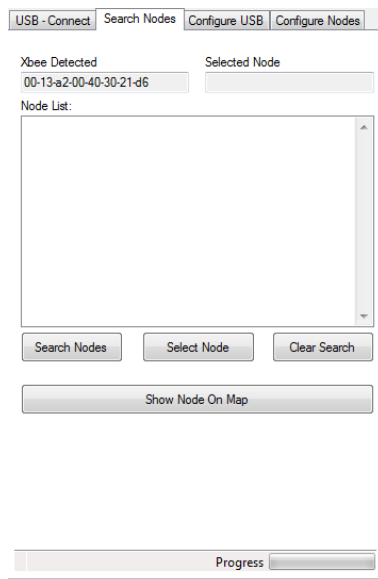


Slika 2.3. Izbornik za ostvarivanje serijske komunikacije prema komunikacijskom modulu na računalu

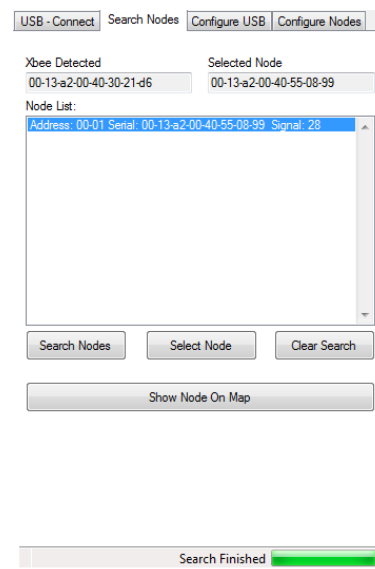


Slika 2.4. Uspješno povezivanje sa komunikacijskim modulom na računalu

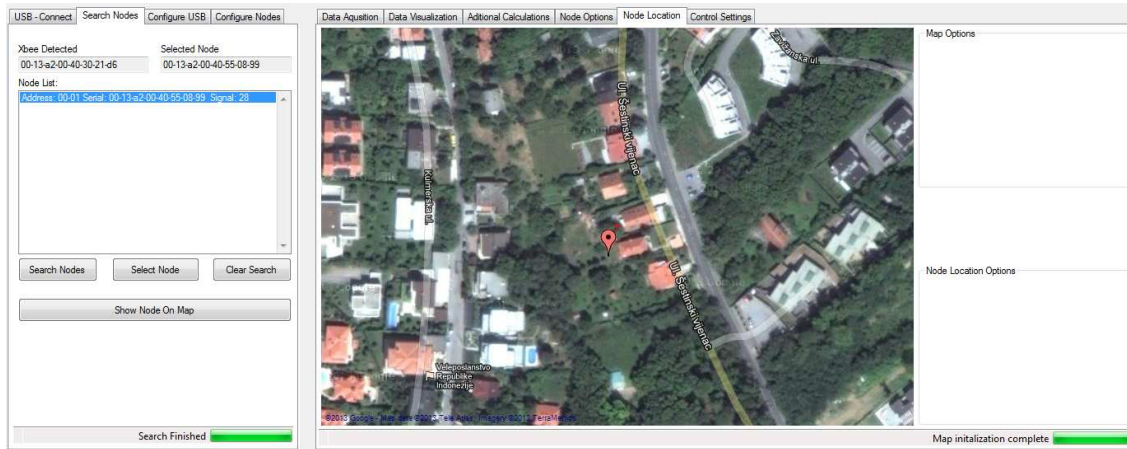
biti opisano u nastavku. Pronađene upravljačke stanice neće biti prikazane na mapi jer one nemaju mogućnost GPS lociranja. Nakon pritiska "Show Node On Map" i inicijalizacije mape otvara se prozor prikazan na Slici 2.7.



Slika 2.5. Izbornik za traženje stanica u blizini



Slika 2.6. Odabir pronađene stanice kako bi se pristupilo njenim podacima



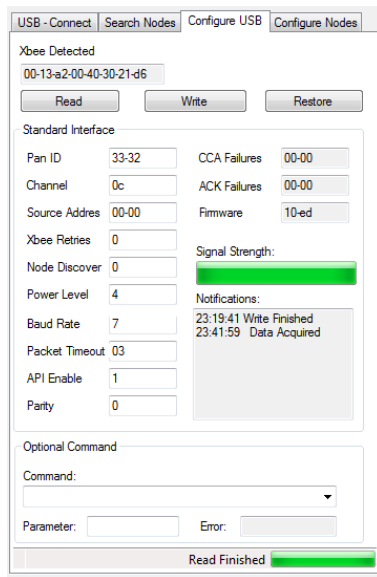
Slika 2.7. Prikaz lokacije pronađene senzorske stanice

Izbornik "Configure USB" omogućuje podešavanje parametara komunikacijskog modula spojenog na korisničko računalo. Pritiskom na tipku "Read" popunjavaju se parametri modula kao što je to prikazano na Slici 2.8. Indikator "Signal Strength" pokazuje kvalitetu veze između računala i modula te je ona uvijek maksimalna jer je veza ostvarena fizičkim povezivanjem. Najbitniji parametri modula prikazani su izravno na otvorenom prozoru, dok je ostalim parametrima moguće pristupiti pomoću padajućeg izbornika "Command". Pomoću ovog izbornika moguće je podešavati sve parametre modula koji su opisani u službenoj dokumentaciji [4] te je tako eliminirana potreba za korištenjem službene programske podrške, jer se sve može izvoditi iz ovog programskog paketa.

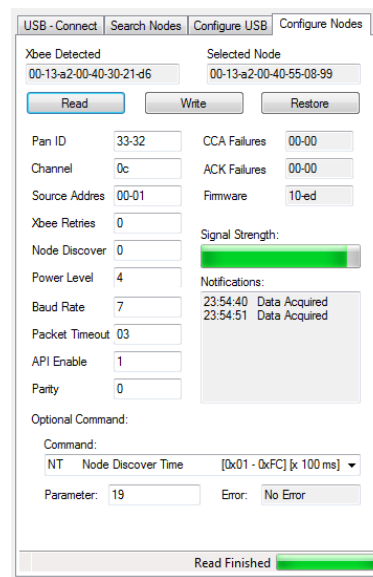
Neke od bitnijih postavki koje se mogu mijenjati na ovaj način je adresa modula "Source Address", kanal komunikacije "Channel" ili broj ponavljanja slanja "Xbee Retries". Promjena ovih postavki preporuča se samo iskusnim korisnicima i osigurano je da niti u jednom trenutku nije potrebno mijenjati ove postavke. Promjenom određene postavke i pritiskom na tipku "Write", mijenja se konfiguracija komunikacijskog modula. Sve izvršene radnje kao i uspješnost njihovog izvršenja prikazuju se na prozoru "Notifications".

Na isti način kao i u izborniku za konfiguriranje komunikacijskog modula na korisničkom računalu, moguće je mijenjati parametre komunikacijskog modula na odabranoj stanici pomoću podizbornika "Configure Nodes" prikazanog na Slici 2.9. U ovom slučaju popunjenost indikatora "Signal Strength" predložuje kvalitetu veze između korisničkog računala i odabrane stanice. Kvaliteta veze može biti narušena preprekama, udaljenošću ili vremenskim uvjetima. Čitanje i pisanje na komunikacijski modul stanice provodi se na isti način kao i kod izbornika "Configure - USB".

Od svih spomenutih opcija za krajnjeg korisnika je jedino bitno povezivanje sa komunikacijskim uređajem i pretraživanje stanica u okolini. Tijek radnji je sljedeći: Refresh->Connect->Search Nodes->Select Nodes, kako bi se odabrala stanica čijim



Slika 2.8. Izbornik za podešavanje komunikacijskog modula spojenog na korisničko računalo



Slika 2.9. Izbornik za podešavanje komunikacijskog modula spojenog na odabranu stanicu

se podacima želi pristupiti.

2.1.2. Izbornik za prikupljanje i obradu podataka

Većina bitnih opcija za korisnika nalazi se u podprozorima izbornika za prikupljanje i obradu podataka. Korisniku se na izbor nude podprozori koji služe za sljedeće funkcije:

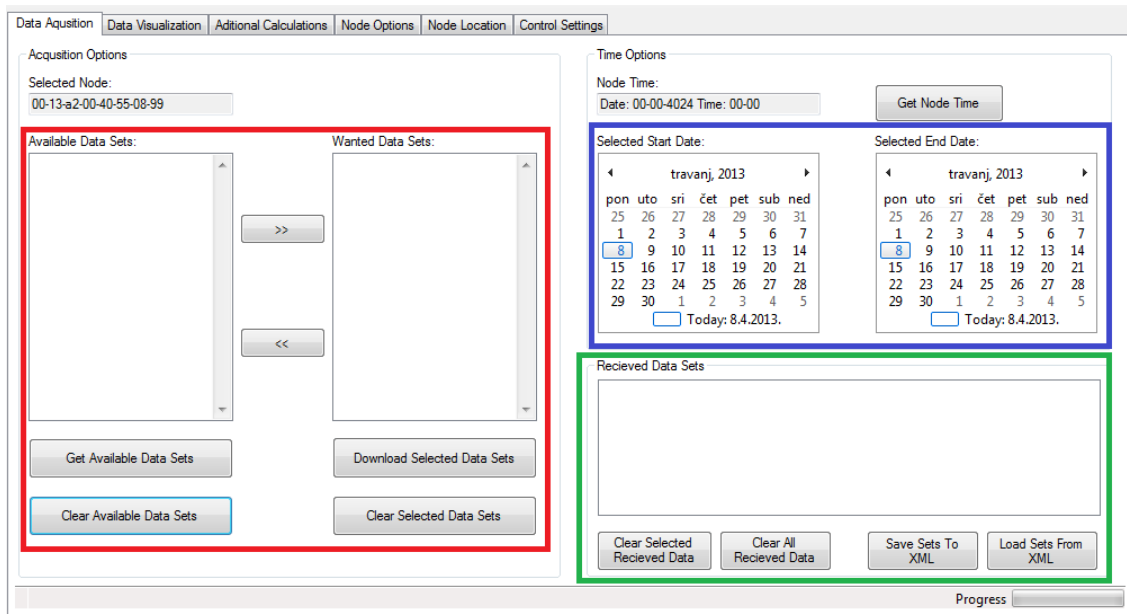
1. "Data Acquisition" - Opcije za prikupljanje i spremanje mjerenja
2. "Data Visualization" - Prikaz dobivenih mjerenja
3. "Additional Calculations" - Proračun dodatnih informacija iz dobivenih mjerenja
4. "Node Options" - Podešavanje postavki određene stanice
5. "Node Location" - Prikaz lokacije određene stanice
6. "Control Settings" - Podešavanje algoritama upravljanja

U nastavku opisani su pojedini podizbornici.

1.) "Data Acquisition" podizbornik

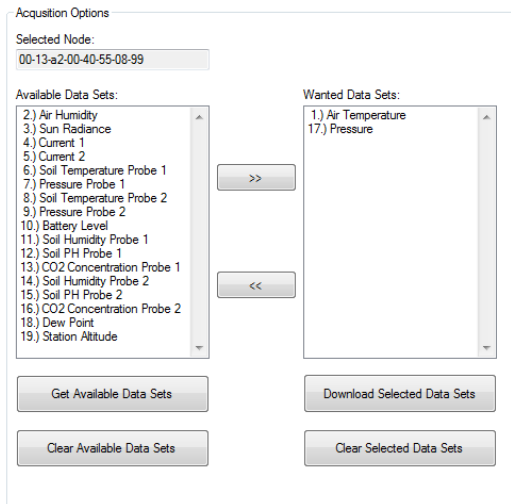
U podizborniku prikazanom na Slici 2.10 korisnik može izvršiti preuzimanje podataka sa odabrane stanice. Ovaj podizbornik moguće je podijeliti na tri cjeline:

- Izbornik za prikaz dostupnih i željenih mjerenja - Crveno
- Izbornik za definiranje vremenskog intervala podataka koji se žele preuzeti - Plavo
- Izbornik sa informacijama o preuzetim mjerenjima - Zeleno

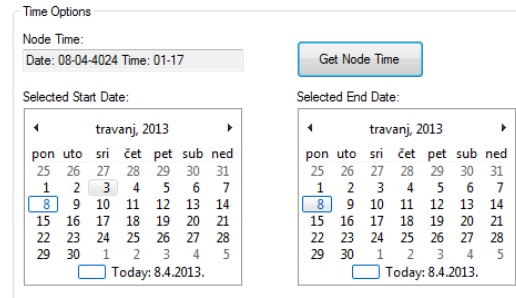


Slika 2.10. Podizbornik za preuzimanje i spremanje podataka

Ukoliko je odabrana stanica pod izbornikom "Search Nodes" tada će njezin kod biti prikazan pod "Selected Node". Korištenje ovog izbornika nije omogućeno sve dok korisnik ne odabere stanicu kojoj želi pristupiti. Kako bi korisnik dobio sva mjerenja koja odabrana stanica provodi potrebno je pritisnuti "Get Available Data Sets". Odabrana stanica zatim šalje informacije o mjerenjima koje izvodi i popunjava listu "Available Data Sets". Korisnik zatim odabire koja ga mjerenja zanimaju tako da pomoću dvije tipke prebacuje iz izbornika "Available Data Sets" u "Wanted Data Sets" kao što je to prikazano na Slici 2.12 na kojoj su odabrana mjerenja temperature i tlaka zraka senzorske stanice. Prebacivanje određenog mjerenja u "Wanted Data Sets" ono se miče sa liste "Available Data Sets" kako korisnik ne bi preuzimao dva puta isto mjerenje. Ovime je također omogućeno preuzimanje samo zanimljivih mjerenja kako bi se skratilo vrijeme potrebno za prijenos podataka. Implementiran je algoritam koji zapisuje mjerenja u minimalan broj bitova kako bi se komunikacija maksimalno ubrzala.



Slika 2.11. Odabir mjerenja koja se žele preuzeti



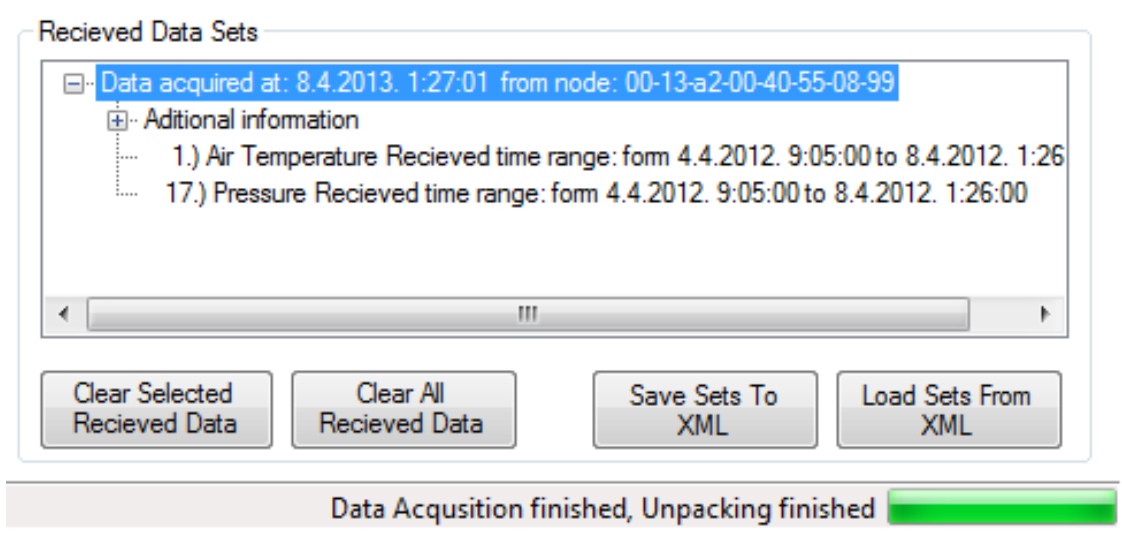
Slika 2.12. Odabir vremenskog intervala koji nas zanima

Prije početka zahtjeva za preuzimanjem, potrebno je definirati željeni vremenski interval pomoću početnog datuma "Selected Start Date" i krajnjeg datuma "Selected End Date" između kojih se podaci moraju nalaziti. Također je moguće preuzeti trenutno vrijeme na senzorskoj stanici da bi se korisnik uvjerio da stranica dobro mjeri vrijeme. Na Slici 2.12 prikazan je odabir vremenskog intervala željenih podataka. Pritiskom na tipku "Download Selected Data Sets" provodi se preuzimanje podataka sa senzorske stanice. Indikator na dnu ekrana prikazuje korisniku estimirano vrijeme završetka preuzimanja, te dojavljuje kraj preuzimanja. Nakon toga dobiveni podaci vidljivi su u prozoru "Received Data Sets" kao što je to prikazano na Slici 2.13. Svi preuzeti podaci su prikazani unutar ovog prozora. U okviru ovog prikaza mogu se naći dodatne informacije o prikupljenim podacima kao:

- Kod stanice sa koje su podaci preuzeti
- Datum i vrijeme zahtjeva za preuzimanjem podataka
- Imena preuzetih podataka
- Dobiveni početni i krajnji datum i vrijeme preuzetih podataka
- Traženi početni i krajnji datum i vrijeme preuzetih podataka
- Broj podataka pronađenih u memoriji stanice
- Broj primljenih podataka

Dostupne su sve informacije kako bi primljene podatke bilo što lakše razlikovati. Korisnik može uspoređujući broj primljenih podataka i broj pronađenih podataka u memoriji stanice zaključiti da su se određene poruke izgubile tijekom slanja, te zahtijevati ponovno slanje. Pri testiranju sustava još nije primjećen gubitak niti

jedne poruke. Ukoliko ne postoje željena mjerenja na stanici za definirano vrijeme dojavljuje se poruka "No available data found". Korisnik može pobrisati određeni set

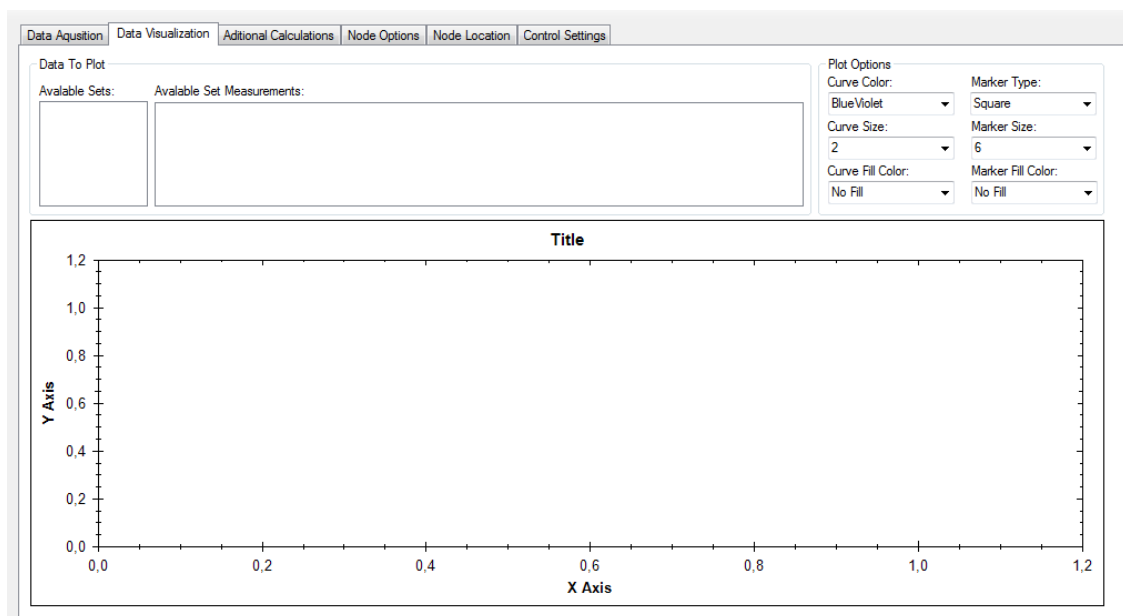


Slika 2.13. Prikazani preuzeti podaci

podataka pritiskom na tipku "Clear Selected Received Data" ili "Clear All Received Data". Iste je moguće spremiti u XML datoteku odabirom "Save Sets To XML" te ih učitati kasnije, odabirom "Load Sets From XML". Ovime je omogućeno korisniku pregledavanje starih podataka ili korištenje već ranije preuzetih podataka, kako se isti ne bi ponovno preuzimali sa stanice. Odabirom različitih dostupnih stanica korisnik može preuzeti bilo koja mjerenja koja se zatim pojavljuju u istom prozoru. Trenutno je izrađena samo jedna senzorska stanica, no koncept je jasno primjenjiv na veliki broj senzorskih stanica sa različito definiranim adresama.

2.) "Data Visualization" podizbornik

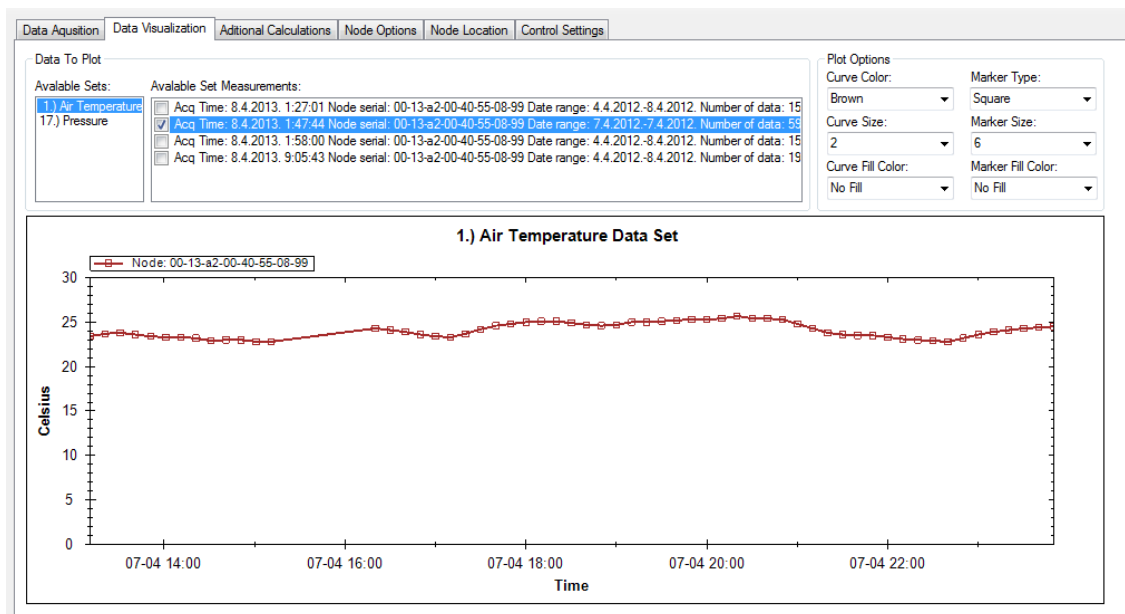
Prikaz preuzetih podataka se izvršava na "Data Visualization" podizborniku. Sam podizbornik prikazan je na Slici 2.14 te se sastoji od sortirane liste dostupnih mjerenja, parametara za podešavanje prikaza i prozora za prikaz podataka. Svi podaci koji su preuzeti sortiraju se prema imenu. Ukoliko je sa više stanica preuzeto mjerenje temperature, iste je moguće paralelno prikazati na grafu da bi korisnik mogao usporediti dobivene podatke sa više stanica. Paralelno prikazivanje podataka koje nisu istog tipa (npr. Temperatura i Tlak), nije omogućeno kako bi se osigurao prikaz samo jedne skale mjernih jedinica na y-osi grafa. Crtanje grafova realizirano je uz pomoć open-source paketa ZedGraph dostupnog na [5].



Slika 2.14. Podprozor za grafički prikaz dobivenih mjerenja

U prethodnom primjeru preuzeto je nekoliko mjerenja temperature i tlaka zraka u različitim vremenskim razmacima. Korisnik zatim odabire koje podatke želi prikazati. Podaci se prepoznavaju prema 64-bitnom kodnom imenu stanice, vremenu preuzimanja i broju primljenih podataka. Korisnik na istom grafu može prikazati proizvoljan broj preuzetih podataka istog tipa, tako da označi kućice pored određenog podatkovnog seta. Na Slici 2.15 prikazan je odabir iscrtavanja temperature na stanici za dan 7.4.2013.

Svaki novi podatkovni set koji korisnik odabere za prikaz, prikazuje se u drugoj boji. Kako se mjerenja izvode u diskretnim vremenskim intervalima svaki vremenski trenutak kada je mjerenje uzeto je označeno markerom. Korisnik može sam odabrati boju grafa, veličinu linije, izgled markera, veličinu markera, i popunjavanje površine ispod grafa sa bilo kojom bojom. Mogućnosti podešavanja izgleda grafa su iznimno velike. Na korisniku je izbor preko 100 različitih boja, 20 debljina linija i

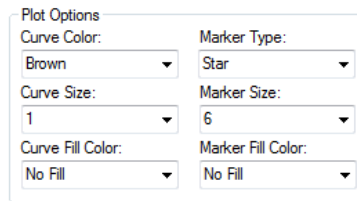


Slika 2.15. Prikaz odabira temperaturnih mjerenja za dan 7.4.2013

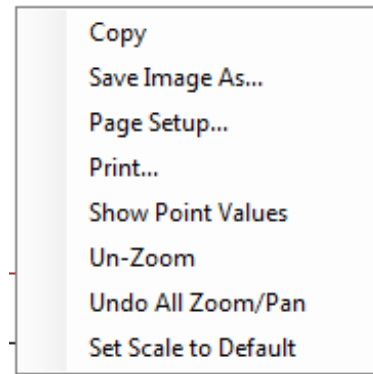
preko 10 različitih izgleda markera. Time je omogućena sloboda podešavanja izgleda prema željama korisnika. Promjena prikaza grafa (boja, izgled) provodi se odabirom željenog seta podataka i promjenom opcija prikazanih na Slici 2.16.

Kako bi se točno znalo koja linija predstavlja koje mjerenje, na vrhu grafa prikazana je legenda sa 64-bitnim kodom stanice i izgled linije, dok je u naslovu prikazano ime podatkovnog seta koji se prikazuje. Selektiranjem određenog dijela povlačenjem miša, povećava se prikaz na određenom dijelu kako bi se detaljnije mogli promotriti zanimljivi vremenski intervali. Pritiskom desnog klika iznad grafičkog prikaza otvara se prozor sa dodatnim mogućnostima prikazan na Slici 2.17. Dodatne mogućnosti glase:

- Copy - Kopiranje prikaza
- Save Image As - Spremanje prikaza
- Page Setup - Podešavanje ispisa na printeru (izgled i orijentacija papira, kvaliteta ispisa)
- Print - Pokretanje ispisa prikaza
- Show Point Values - Ovom opcijom korisnik može pregledavati vrijednosti pojedinih mjerenja jednostavnim prelaskom miša preko markera
- Un-Zoom - Vraćanje prikaza za jedan korak
- Undo All Zoom/Pan - Vraćanje prikaza na početno stanje
- Set Scale to Default - Postavljanje osnovnog prikaza

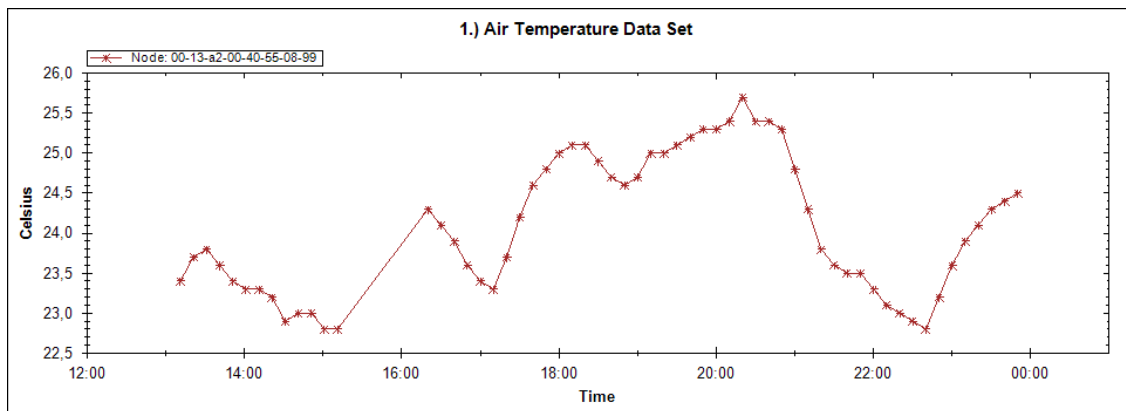


Slika 2.16. Dodatne mogućnosti podešavanja izgleda grafa



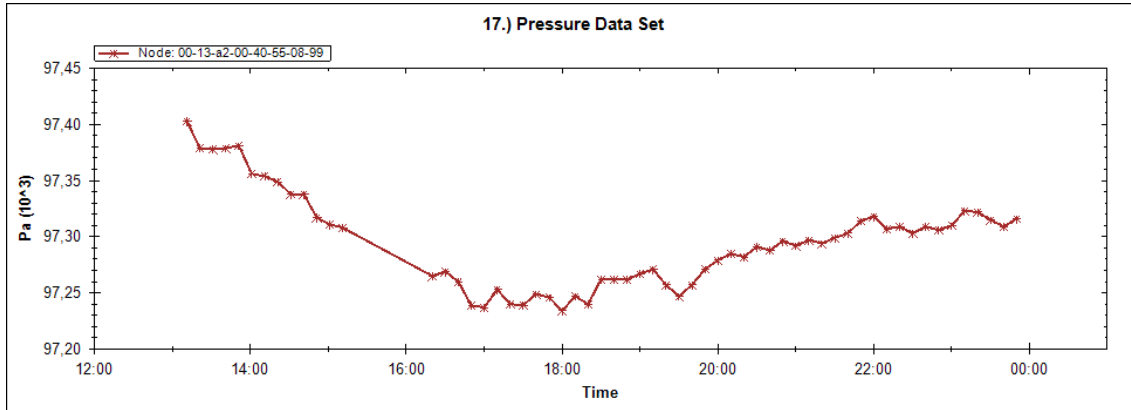
Slika 2.17. Dodatne mogućnosti nakon iscrtavanja željenog grafa

Kako bi se prikazalo iscrtavanje preuzetih podataka, koriste se snimljeni podaci temperature i tlaka zraka za datum 7.4.2013. na senzorskoj stanici sa 64-bitnim kodom 00-13-a2-00-40-55-08-99. Taj dan stanica je bila upaljena u vremenu od 13:11 do 23:50 sa kratkom pauzom u 15:11. Uzorkovanje mjerenja je bilo postavljeno na 10 [min] dok se stanica nalazila u zatvorenom prostoru. Na Slici 2.18 prikazana je promjena temperature dok je na Slici 2.19 prikazana promjena tlaka zraka. Mjerne jedinice su definirane u $^{\circ}C$ za temperaturu i jedinici [Pa] za tlak zraka. Na Slikama 2.20 i 2.21 prikazani su drugačije podešeni prikazi grafova.

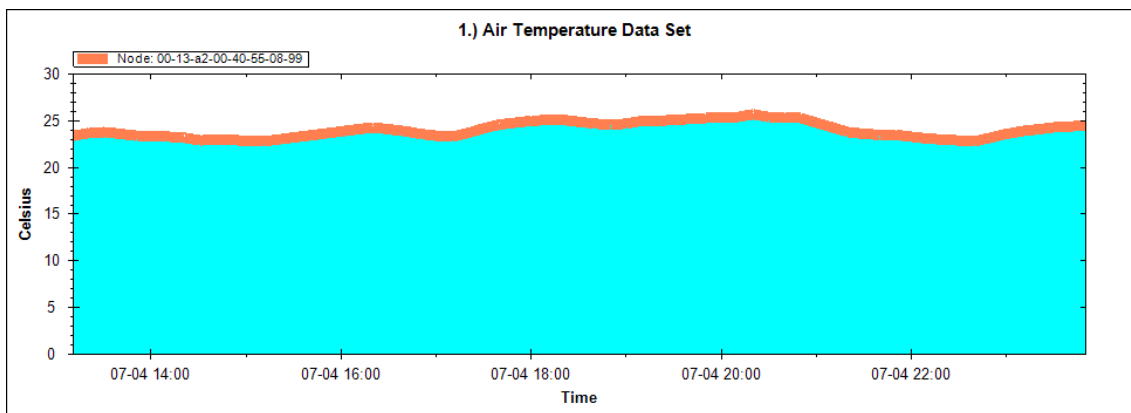


Slika 2.18. Prikaz mjerenja temperature zraka za dan 7.4.2013

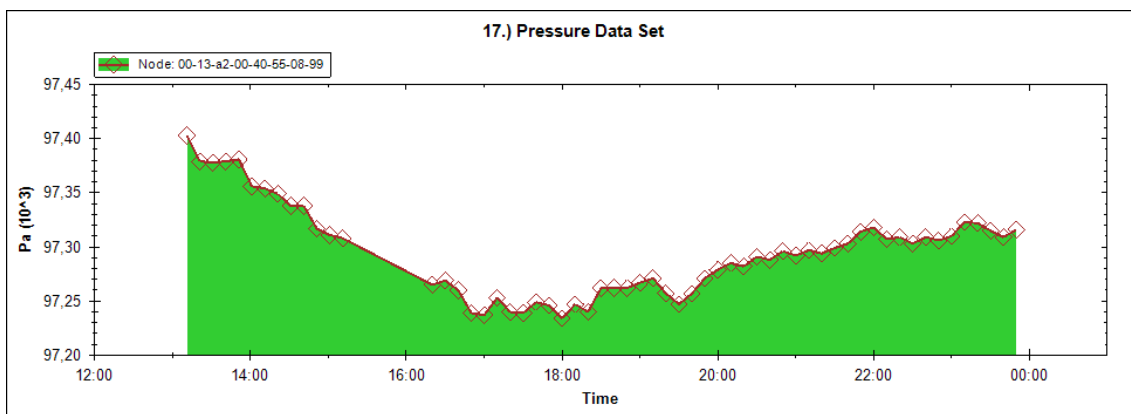
U nastavku rada na projektu planira se dodavanje dodatnih mogućnosti uz prikaz rezultata. Moguće je vrlo jednostavno dodati prikaz maksimalne i minimalne vrijednosti te izračun srednje vrijednosti. Dodatne preinake moguće su prema zahtjevu krajnjeg korisnika. Teško je predvidjeti koje opcije bi bile korisne za korisnika u ovoj fazi projekta, no pri eventualnoj komercijalizaciji bi se obratila velika pažnja na specifične zahtjeve u određenim primjenama. Prikaz dobivenih rezultata je doista pojednostavljen, kako bi se korisnik više posvetio korištenju sustava nego savladavanju tehničkih aspekata njegovog rada.



Slika 2.19. Prikaz mjerenja tlaka zraka za dan 7.4.2013



Slika 2.20. Drugačiji prikaz mjerenja temperature zraka za dan 7.4.2013

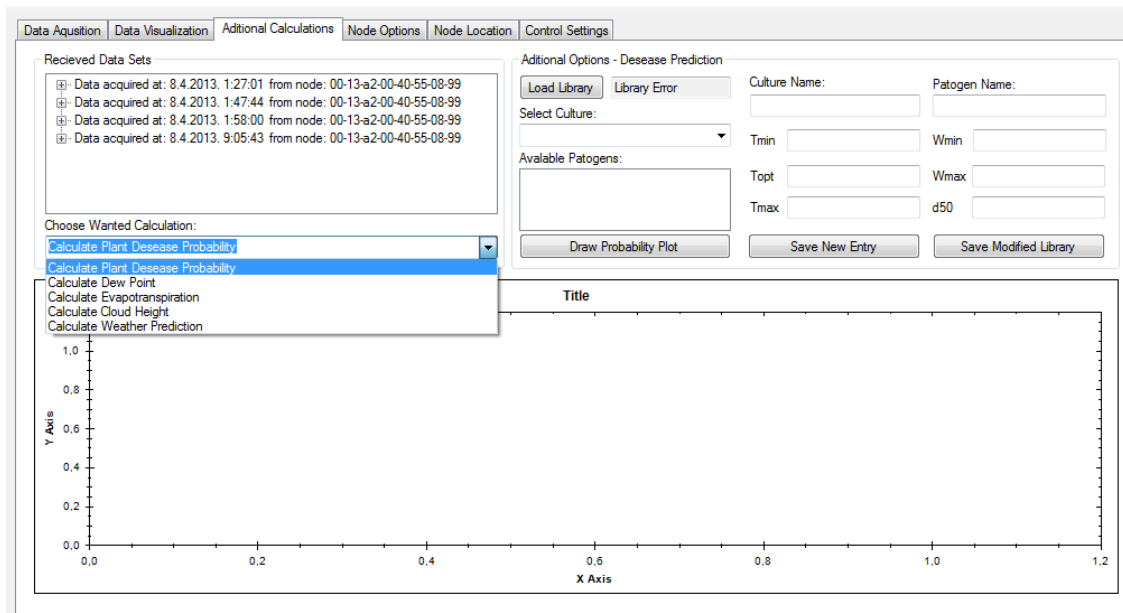


Slika 2.21. Drugačiji prikaz mjerenja tlaka zraka za dan 7.4.2013

3.) "Additional Calculations" podizbornik

U podizborniku "Additional Calculations" korisnik može na jednostavan način proračunati i prikazati dodatne podatke. Neke od dodatnih opcija koje se nude glase:

- "Calculate Plant Disease Probability" - Proračun vjerojatnosti izbijanja bolesti biljaka
- "Calculate Dew Point" - Proračun točke rosišta
- "Calculate Evapotranspiration" - Proračun evapotranspiracije
- "Calculate Cloud Height" - Proračun visine i temperature oblaka
- "Calculate Weather Prediction" - Proračun kratkoročne vremenske prognoze



Slika 2.22. Odabir dodatnog proračuna u podizborniku "Additional Calculations"

Odabir određenog proračuna prikazan je na Slici 2.22. Proračuni se računaju iz preuzetih setova podataka sa senzorskih stanica. Odabirom različitih željenih proračuna, mijenja se prozor sa dodatnim opcijama za konkretan proračun. Za početak objasniti će se proračun vjerojatnosti pojave bolesti biljaka. Proračun se provodi prema vrlo jednostavnom i pouzdanom generičkom modelu zasnovanom na 6 jednostavno mjerljivih fizikalnih parametara. Ovaj generički model predstavljen je u radu [6]. Model je napravljen prvenstveno za prognozu pojave patogena određenih kultura za koje nisu dostupni epidemiološki podaci. Većina modela zahtijevaju mnogo epidemioloških informacija. Ovakav model koristi informacije o graničnim temperaturama i potrebnim trajanjima vlažnosti biljke. Model koristi ovisnost minimalne i optimalne duljine trajanja vlažnosti koja pogoduje razvijanju patogena.

Za neke kulture i poznate patogene, parametri potrebni za proračun vjerojatnosti izbijanja bolesti su prikazani u prije spomenutom radu. Kako bi korisnik dobio izlist poznatih kultura i patogena potrebno je učitati datoteku sa informacijama. Pritiskom na tipku "Load Library" i odabirom priložene datoteke "Patogen Library.xml" učitavaju se dosad unešeni podaci. Odabir kulture koja se promatra izvodi se u padajućem izborniku "Cultures" dok se odabir patogena izvodi u padajućem izborniku "Patogens".

Kao primjer možemo prikazati prikaz vjerojatnosti pojave patogena "Botryosphaeria dothidea" za kulturu jabuke. Dobiveni rezultat proračunat iz prikupljenih mjerenja u prirodi, prikazan je na Slici 2.23. Na ovome izborniku također su vidljivi podaci koji su potrebni za proračun vjerojatnosti pojave bolesti kulture. Na vrlo jednostavan način moguće je dodavati dodatne kulture i patogene te iste spremati u bazu podataka pritiskom na tipku "Save New Entry". Nakon modificiranja baze podataka istu je potrebno spremati pritiskom na tipku "Save Modified Library" kako bi se pri novom pokretanju programa ista mogla ponovno učitati. Prednost ovog generičkog modela je relativno jednostavan proračun epidemioloških podataka te korisnik može na jednostavan način dodati nove uzročnike bolesti, ukoliko podaci nisu dostupni u preuzetom paketu. Dodatan opis ovog modela i načina proračuna je prikazan u tehničkoj dokumentaciji projekta.

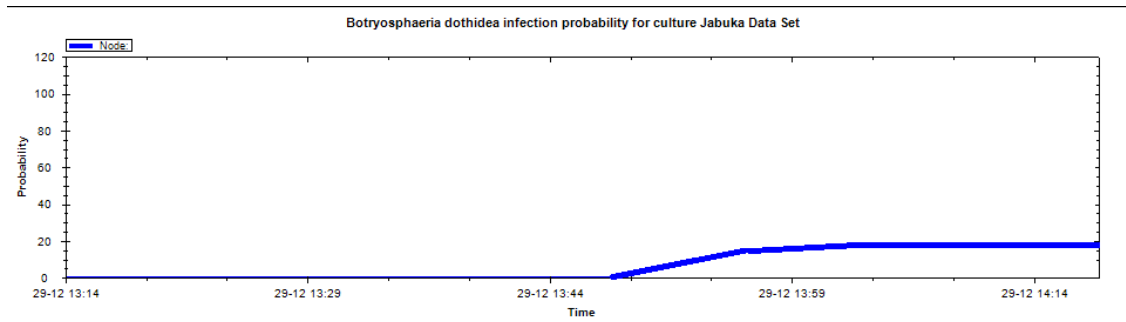
Slika 2.23. Prikaz učitanih parametara potrebnih za proračun vjerojatnosti pojave bolesti "Botryosphaeria dothidea" za kulturu jabuke

Prije prikaza rezultata potrebno je odabrati set podataka koji će se koristiti za proračun. Potrebno je osigurati da set podataka sadrži informacije o temperaturi, relativnoj vlažnosti zraka i vlažnosti tla kako bi se proračun mogao izvesti. Ukoliko je korisnik odabrao set podataka koji ne sadrži sve potrebne informacije u dnevniku se ispisuje poruka:

[AdditionalCalc] Selected Data Set Doesn't Contain Temperature, Humidity and Soil Humidity

dok se u suprotnom slučaju iscertava graf vjerojatnosti pojave određene bolesti kao što je prikazano na Slici 2.24. Sa velikom zbirkom mogućih bolesti za određene

kulture i uz mogućnost unošenja novih bolesti ova mogućnost predstavlja izvršno rješenje za poduzetnike. U daljnjem razvoju ovog sustava planira se uvesti obavještanje korisnika kada postoji velika vjerojatnost pojave bolesti da bi se mogle poduzeti mjere zaštite uzgajane kulture.



Slika 2.24. Prikaz vjerojatnosti pojave bolesti "Botryosphaeria dothidea" za kulturu jabuke prilikom rada senzorske stanice u prirodi

Proračun točke rosišta provodi se odabirom "Calculate Dew Point". Za proračun je potrebno odabrati set podataka se temperaturom i relativnom vlažnosti zraka. Algoritam proračunava točku rosišta na osnovi jednostavne aproksimacije ili Magnusovog modela, dok se odabir algoritma izvodi padajućim izbornikom "Method Selection". Nakon odabira metode pritiskom na "Calculate Dew Point From Selected Data Set" prikazuje se graf. Kao što je prikazano na Slici 2.25 korisniku su dostupne informacije o maksimalnoj, minimalnoj i srednjoj vrijednosti točke rosišta.

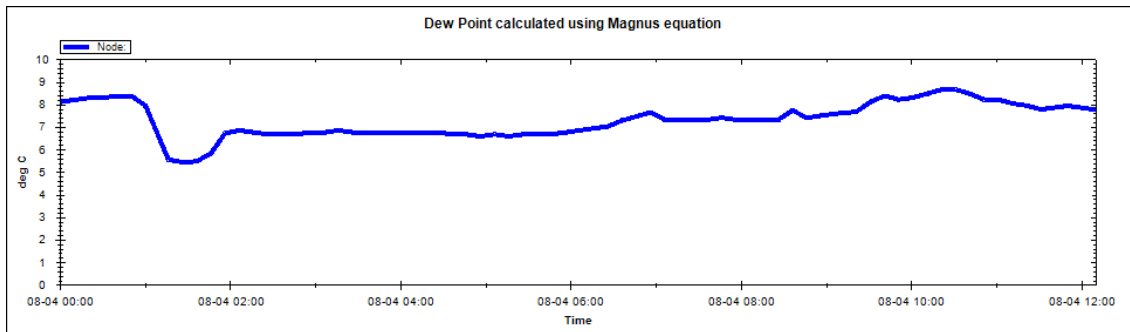
Additional Options - Dew Point

<p>Method Selection:</p> <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">Magnus model</div>	<p>Dew Point Min <input style="width: 100%;" type="text" value="5,45831178846094"/></p>
<p><input type="button" value="Calculate Dew Point From Selected Data Set"/></p>	<p>Dew Point Avg <input style="width: 100%;" type="text" value="7,33054707111149"/></p>
	<p>Dew Point Max <input style="width: 100%;" type="text" value="8,67869842060958"/></p>

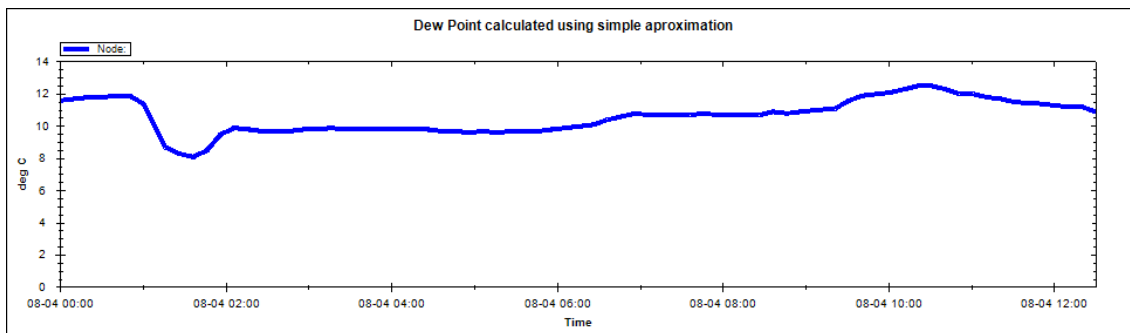
Slika 2.25. Dodatne opcije za prikaz točke rosišta

Na Slici 2.26 prikazano je izračunato kretanje točke rosišta prema Magnusovom modelu dok je kretanje točke rosišta prema jednostavnoj aproksimaciji prikazano na Slici 2.27. Za dobivanje točke rosišta koristili su se podaci o temperaturi i relativnoj vlažnosti sa senzorske stanice postavljene u zatvorenom prostoru na dan 8.4.2013. u vremenskom razdoblju od 00:00 do 12:30 sati sa vremenom uzorkovanja od 10 [min]. Za taj vremenski interval dobivene su sljedeće vrijednosti:

- Magnusov model
 - Maksimalna vrijednost - 8.67 [°C]
 - Srednja vrijednost - 7.33 [°C]
 - Minimalna vrijednost - 5.45 [°C]
- Jednostavna aproksimacija
 - Maksimalna vrijednost - 12.5 [°C]
 - Srednja vrijednost - 10.6 [°C]
 - Minimalna vrijednost - 8.1 [°C]



Slika 2.26. Proračunata točka rosišta prema Magnusovom modelu za dan 8.4.2013.



Slika 2.27. Proračunata točka rosišta prema jednostavnoj aproksimaciji za dan 8.4.2013.

Proračun evapotranspiracije provodi se odabirom "Calculate Evapotranspiration". Za proračun je potrebno odabrati set podataka sa temperaturom zraka, relativnom vlažnosti zraka, osvjetljenost, tlakom zraka i nadmorskom visinom stanice. Konačno je potrebna i srednja brzina vjetera kako bi se proračun mogao provesti. Bez izrađenog anemometra korisnik je dužan unijeti procijenjenu srednju vrijednost brzine vjetera. Ukoliko je procjenu nemoguće napraviti, preporuča se odabir brzine vjetera od $2 \left[\frac{m}{s} \right]$ koja odgovara najčešćoj brzini vjetera za našu regiju.

Odabirom opcije "Calculation Method" nude se sljedeće opcije:

- Penmanova jednadžba
- Penman-Monteithova jednadžba
- Priestley-Taylorova jednadžba
- Blaney-Criddleova jednadžba

Proračun evapotranspiracije omogućen je samo korištenjem Penman-Monteithove jednadžbe. Način proračuna je detaljno opisan u tehničkoj dokumentaciji. U nastavku rada na projektu, planiraju se uvesti i ostali načini proračuna. Izgled prozora za odabir opcija proračuna evapotranspiracije je prikazan na Slici 2.28. Dodatni potrebni parametri koje korisnik mora unijeti su povezani sa lokacijom instaliranja senzorske stanice i karakteristikama uzgajane kulture. Pritiskom na tipku "Calculate Evapotranspiration" iscrtava se graf količine evapotranspiracije u jedinicama $\left[\frac{mm}{h}\right]$ za odabrani set podataka. U ovom trenutku proračun nije u potpunosti testiran i rezultati se neće prikazivati.

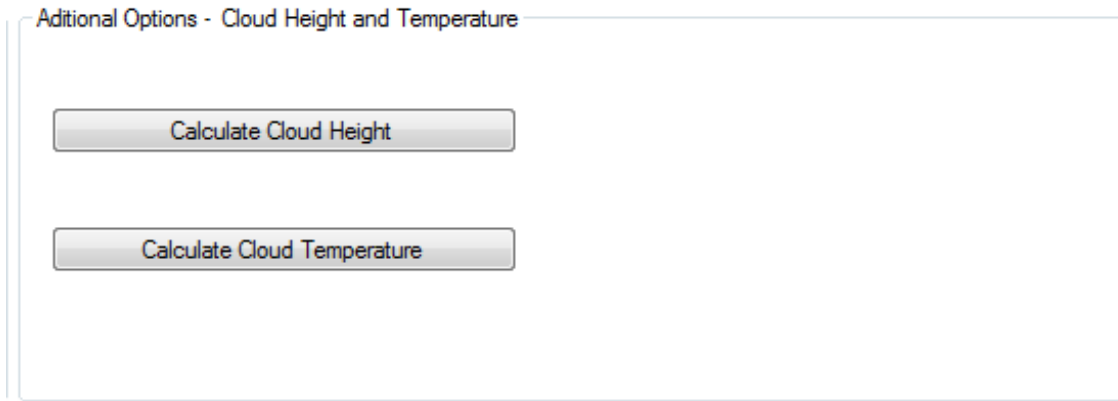
Additional Options - Calculate Evapotranspiration

Calculation Method: Penman-Montet equation	Avg. Wind Speed 2 m/s
Sampling Interval: 1 h	Wind Sp. Height 2 m
Calculate Evapotranspiration	Temp and Hum Meas. Hight 1 m
	Avg. Crop Height 0.5 m

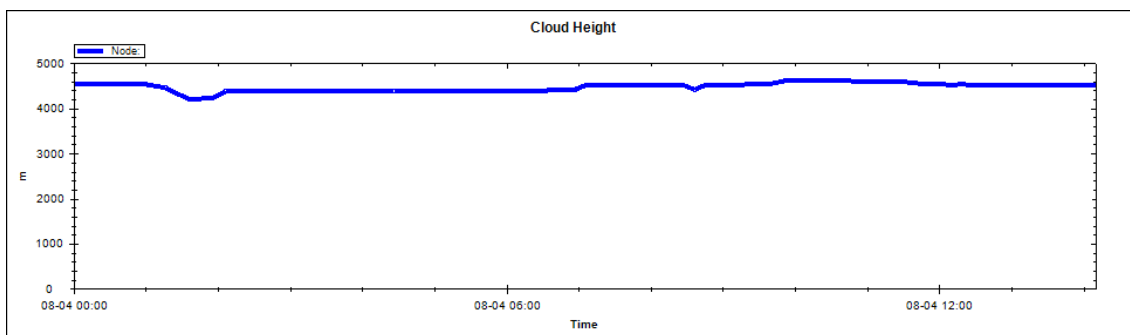
Slika 2.28. Postavke za izračun evapotranspiracije

Pomoću jednostavnih relacija moguće je proračunati i visinu oblaka kao i temperaturu oblaka odabirom opcije "Calculate Cloud Height". Odabirom ove opcije pojavljuje se prozor prikazan na Slici 2.29. Relacije za izračunavanje opisane su u tehničkoj dokumentaciji projekta. Za izračun potrebno je preuzeti podatke o temperaturi, vlažnosti zraka i visini stanice. Ukoliko je odabran odgovarajući set podataka pritiskom na tipku "Calculate Cloud Hight" prikazuje se graf visine oblaka koji je prikazan na Slici 2.30. Vrijednosti su izračunate iz seta podataka snimljenog datuma 8.4.2013. u zatvorenoj prostoriji i kao takvi nisu mjerodavni. Pritiskom na tipku "Calculate Cloud Temperature" prikazuje se graf temperature oblaka prikazan na Slici 2.31.

Posljednja opcija dodatnog proračuna je proračun kratkoročne vremenske prognoze. Ova mogućnost je teorijski obrađena u tehničkoj dokumentaciji ali nije do kraja implementirana. Iz tog razloga ova mogućnost neće biti prezentirana. Za

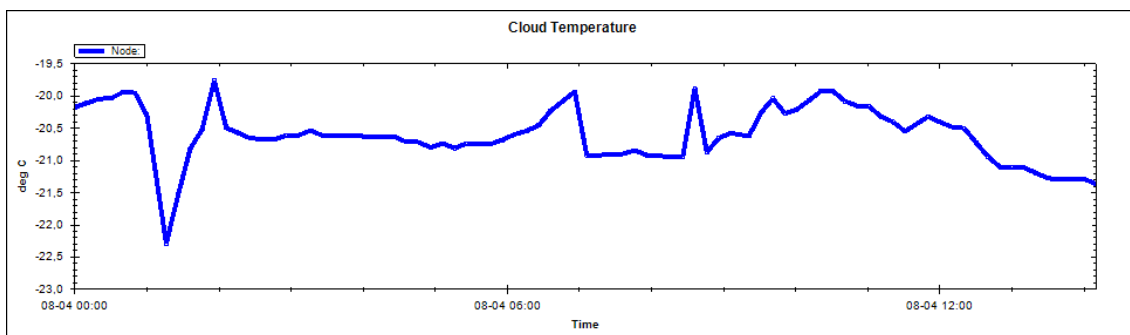


Slika 2.29. Prozor za pokretanje proračuna visine i temperature oblaka



Slika 2.30. Izračunata visina oblaka na temelju mjerenja za dan 8.4.2013. u zatvorenoj prostoriji

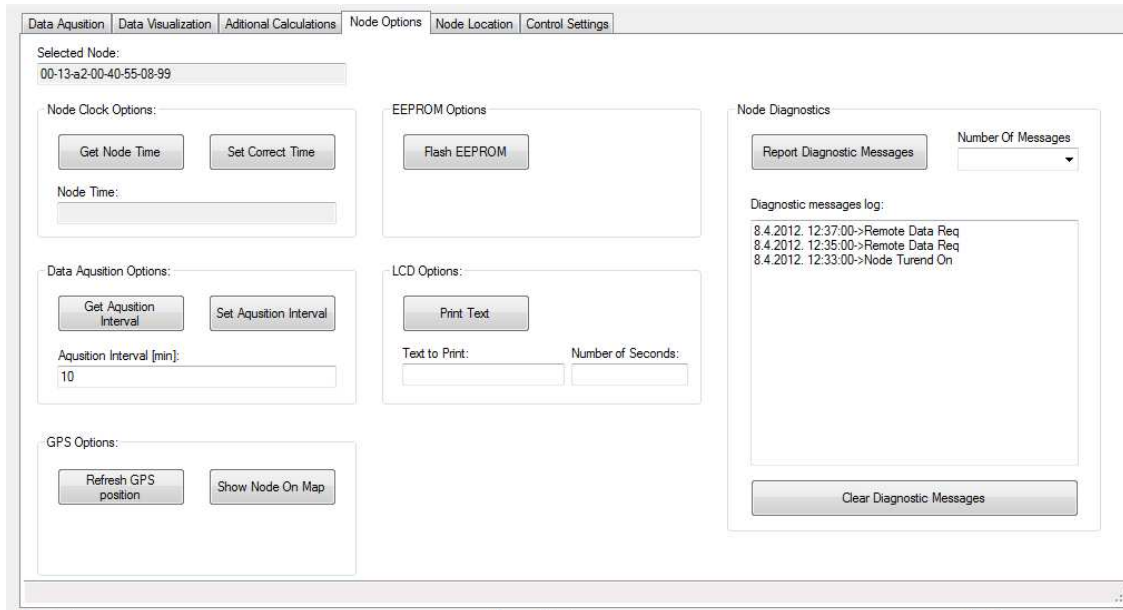
potrebe kratkoročne vremenske prognoze potrebno je preuzeti informacije o tlaku, osvjetljenosti i temperaturi. Predikcija se provodi na osnovi zadnjih sat vremena mjerenih podataka.



Slika 2.31. Izračunata temperatura oblaka na temelju mjerenja za dan 8.4.2013. u zatvorenoj prostoriji

4.) "Node Options" podizbornik

Podizbornik "Node Options" nudi različita podešavanja za odabranu stanicu. Opcije dostupne na ovom izborniku ovise o tome da li je odabrana senzorska ili upravljačka stanica prilikom skeniranja okolnog područja. Ukoliko je odabrana senzorska stanica, tada je izgled sučelja prikazan na Slici 2.32. Izgled sučelja za konfiguriranje upravljačke stanice neće biti prikazan jer je u fazi razvoja.

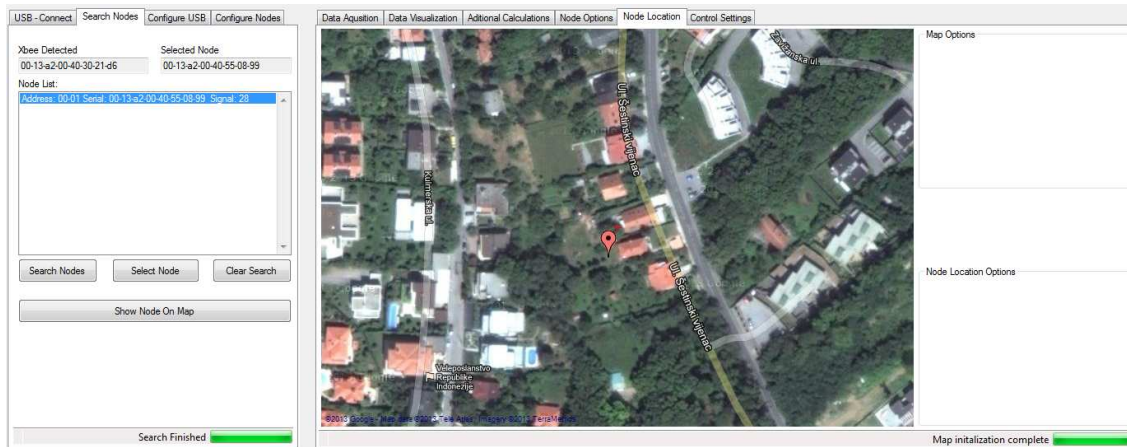


Slika 2.32. Izgled sučelja za podešavanje postavki senzorske stanice

Pritiskom na tipku "Get Node Time" moguće je pročitati trenutno vrijeme na odabranoj stanici. Ukoliko je došlo do pogreške mjerenja vremena ili do malog odstupanja, korisnik može pritiskom na tipku "Set Correct Time" upisati točno sistemsko vrijeme sa korisničkog računala. Pritiskom na tipku "Flash EEPROM" korisnik može izbrisati sva mjerenja sa stanice. Proces čišćenja memorije može potrajati do par minuta i senzorska stanica za to vrijeme ne može prikupljati nova mjerenja. Na LCD ekranu stanice ispisuje se poruka "Erasing Memory" i pale se obje indikacijske diode, kako bi se upozorilo da je senzorska stanica zauzeta. Nakon završetka čišćenja memorije korisnik je obaviješten pojavom obavijesti i gašenjem indikacijskih dioda.

Pod opcijama "Data Acquisition Interval" moguće je čitati i podešavati vrijeme uzorkovanja mjerenja. Nakon upisivanja novog vremena ono se upisuje u stalnu memoriju senzorske stanice i ostaje zapamćeno i prilikom gašenja stanice. Pod opcijama "LCD Options" moguće je ispisivati proizvoljni tekst od 16 znakova na LCD-u odabrane sonde onoliko vremena koliko je specificirano u prostoru "Number of seconds". U dijelu "GPS Options" moguće je zadati senzorskoj stanici proračun nove GPS pozicije. Ukoliko korisnik procjeni da trenutna lokacija stanice nije dobro

određena tada pritiskom na tipku "Refresh GPS position" daje naredbu sondi da se pokuša ponovno locirati. Vrijeme lociranja traje približno 5 [min] i korisnik je obaviješten odgovarajućom porukom nakon isteka vremena. Ukoliko GPS pozicija nije uspješno dohvaćena dojavljuje se poruka o grešci, dok se u suprotnom slučaju dojavljuje uspješnost. Pritiskom na tipku "Show Node On Map" otvara se podprozor "Node Location" sa trenutnom pozicijom stanice na Google maps karti kao što je to prikazano na Slici 2.33.



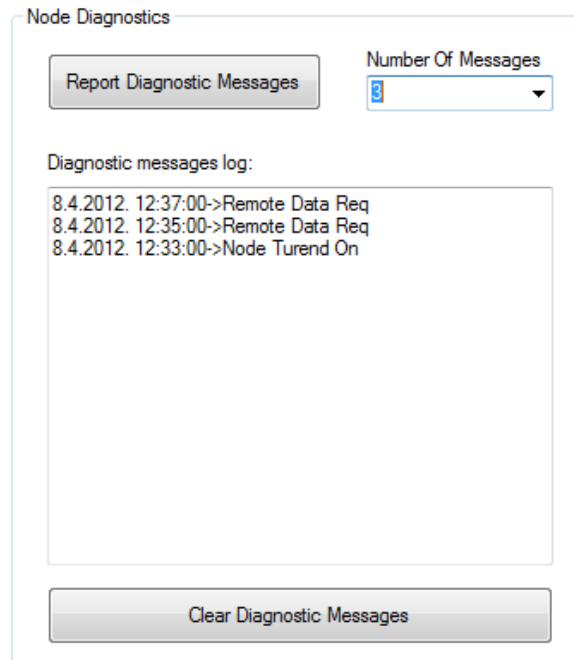
Slika 2.33. Prikaz lokacije pronađene senzorske stanice

Na senzorsku stanicu se u svakom trenutku spremaju informacijske poruke koje govore o procesima koji su se događali na senzorskoj stanici kao i trenutak kada se proces dogodio. Neke od informacija koje se bilježe glase:

- Paljenje stanice
- Spajanje senzorske sonde
- Odvajanje senzorske sonde
- Daljinski zahtjev za podacima
- Mnogobrojne poruke greški
- Informacije o slanju zahtjeva na upravljačke stanice
- Itd...

Broj ovih poruka je zaista velik i neće se svi oblici poruka spominjati. Kako se generiraju nove dijagnostičke poruke one se spremaju u internu memoriju zajedno sa vremenom nastanka. U internoj memoriji nalazi se mjesto za 10 dijagnostičkih poruka. Informacijama o radu stanice, odnosno dijagnostičkim porukama, korisnik može pristupiti direktno na stanici pomoću LCD ekrana ili daljinskim pristupom iz korisničke aplikacije. Pritiskom na tipku "Report Diagnostic Messages" i specificiranjem broja zadnjih dijagnostičkih poruka koje korisnik želi preuzeti, preuzimaju

se poruke i ispisuju u prozoru "Diagnostic Messages Log" kao što je to prikazano na Slici 2.34. Na prikazanom primjeru odabrano je preuzimanje triju poruka. Zadnje dvije poruke govore korisniku kada je sonda dobila zahtjev za slanjem podataka dok posljednja poruka govori korisniku kada je sonda upaljena. Mogućnosti podešavanja senzorskih stanica su zaista mnogobrojne. Prema željama krajnjeg korisnika programski paket moguće je na vrlo jednostavan i brz način prilagoditi prema potrebama.



Slika 2.34. Preuzimanje proizvoljnog broja zadnjih dijagnostičkih poruka sa odabrane senzorske stanice

5.) "Node Location" podizbornik

U podizborniku "Node Location" prikazuje se karta na kojoj se nalaze pozicije svih pronađenih senzorskih stanica. Pri prvom otvaranju podizbornika započinje inicijalizacija karte. Kako bi se karta inicijalizirala potrebno je osigurati da je korisničko računalo spojeno na internet. Kada se karta učita korisnik je obaviješten porukom "Map loaded". Prikazivanje karte ostvareno je uz pomoć open-source rješenja Gmap [7]. Ukoliko korisnik procjeni da pozicije sonde nisu dobro određene potrebno je odabrati sondu i u podizborniku "Node Options" pritisnuti gumb "Refresh GPS Position". Kako bi se pozicija točno odredila potrebno je postaviti sondu na mjesto sa direktnim pogledom na nebo. Također je preporučljivo pokretati dobivanje GPS pozicije kada su povoljni vremenski uvjeti (nepostojanje oborina i naoblake). Potpuna funkcionalnost u ovoj verziji programa još nije ostvarena.

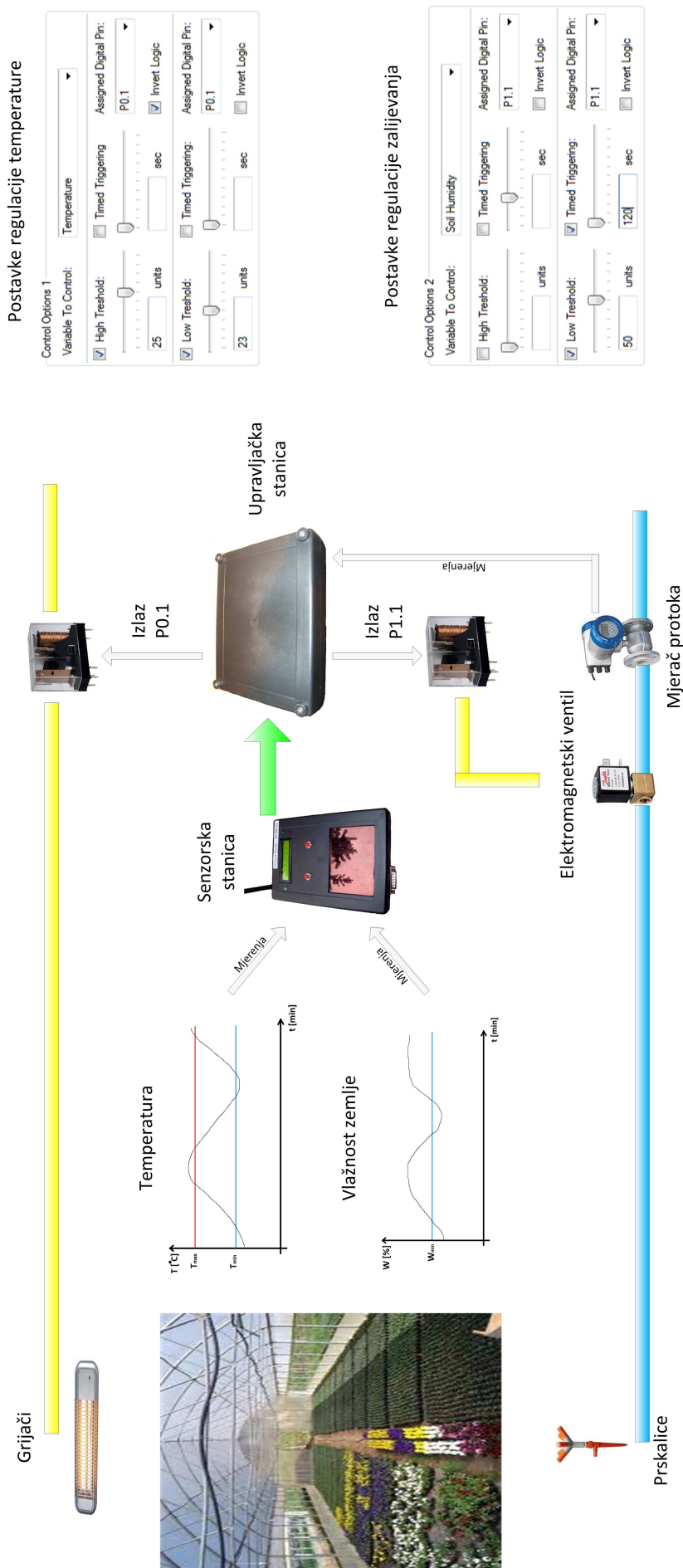
6.) "Control Settings" podizbornik

Ostvarivanje upravljanja provodi se komunikacijom između senzorskih i upravljačkih stanica. Korisnik može odabrati svako mjerenje na senzorskoj stanici kao okidač za određenu reakciju upravljačke stanice. Na upravljačkoj stanici nalazi se mnoštvo relejnih izlaza i svaki relejni izlaz je pridjeljen određenom digitalnom izlazu mikrokontrolera koji upravlja upravljačkom stanicom.

Korisnik svakoj senzorskoj stanici dodjeljuje jednu upravljačku stanicu i određene izlaze na njoj. Korisnik može postaviti do četiri promatrana mjerenja za svaku senzorsku stanicu. Tako se može definirati donja i gornja granica promatranog mjerenja. Ukoliko nakon prikupljanja mjerenja, određeno promatrano mjerenje poraste iznad gornje granice ili padne ispod donje granice, senzorska stanica dojavljuje upravljačkoj stanici paljenje ili gašenje određenog izlaza. Također se može definirati koliko će određeni izlaz dugo biti upaljen ili ugašen. Pomoću ovih funkcionalnosti korisnik doista može prilagoditi upravljanje prema svojim željama.

Jedan primjer upravljanja glasi. Korisnik može definirati promatrano mjerenje "Soil Humidity" odnosno vlažnost zemlje i definirati donju granicu od 50 [%]. Zatim definira digitalni izlaz na upravljačkoj stanici na koji je spojen elektromagnetski ventil koji upravlja protokom vode prema prskalici na terenu na kojem senzorska stanica mjeri vlažnost. Moguće je definirati vrijeme držanja otvorenosti ventila nakon paljenja, ukoliko je vrijeme prikupljanja veće od očekivanog vremena zadovoljavanja vlažnosti tla. Na sličan način moguće je i upravljati temperaturom, osvjetljenjem ili bilo kojim drugim mjerenjem ako postoji način utjecanja na to mjerenje. Ukoliko se i gornja i donja granica dodjele istom digitalnom izlazu, tada upravljačka stanica osigurava ponašanje relejnog regulatora sa histerezom. Ovaj koncept prikazan je na Slici 2.35.

Na prethodnom prikazu može se vidjeti način upravljanja zalijevanjem i temperaturom staklenika. Na izlaze upravljačke stanice spojena su dva releja. Jedan relej upravlja električnom grijalicom, dok drugi relej upravlja otvorenosti elektromagnetskog ventila. Korisnik postavlja gornju i donju granicu temperature te donju granicu vlažnosti. Nakon prebacivanja konfiguracije na senzorske i upravljačke stanice algoritam se počinje automatski izvršavati. Ako nakon prikupljanja mjerenja senzorska stanica primjeti da je određena granica prijeđena, šalje nalog upravljačkoj stanici za paljenjem ili gašenjem određenog izlaza. Na analogne ulaze upravljačke stanice moguće je spojiti mjerenje struje, mjerenje protoka ili bilo koji drugi senzor sa analognim izlazom. Prema potrebi upravljačka stanica logira potrošnju energenata kojima korisnik može pristupiti.



Slika 2.35. Konceptualni prikaz načina upravljanja zelenom površinom

Izgled korisničkog sučelja za podešavanje upravljanja prikazan je na Slici 2.36. Dostupno je podešenje četiri mjerenja na koje se može izvršiti određena reakcija. Pritiskom na tipku "Load Control Settings" dok je odabrana željena senzorska stanica preuzimaju se sve podešene postavke. Dodijeljena upravljačka stanica može se mijenjati upisivanjem novog 64-bitnog koda stanice u "Assigned Control Node" i pritiskom na tipku "Change Assigned Control Node". U izbornicima "Control Options 1" do "Control Options 4" korisnik podešava način upravljanja. U izborniku "Variable To Control" odabire se mjerenje za reakciju. Pomoću checkboxova "High Threshold" i "Low Threshold" korisnik odabire u kojem slučaju se šalje nalog za paljenjem izlaza. Postavljanjem "High Threshold" korisnik definira paljenje digitalnog izlaza u slučaju da mjerena varijabla prijeđe definirani iznos.

Postavljanjem checkboxa "Timed Triggering" moguće je definirati koliko će dugo izlaz biti upaljen nakon slanja naredbe od senzorske stanice. U suprotnom slučaju izlaz ostaje upaljen onoliko dugo, dok senzorska stanica ne javi da je mjerena varijabla prešla definiranu granicu. Odabirom opcije "Invert Logic" primjenjuje se obrnuta digitalna logika na odabrani pin. Svim ponuđenim opcijama moguće je doista prilagoditi način upravljanja različitim konkretnim primjenama.



Slika 2.36. Podešavanje načina upravljanja

2.2. Senzorska stanica

Izrađena senzorska stanica prikazana je na Slici 2.37. Na Slici 2.38 prikazan je izgled prednje strane senzorske stanice sa oznakama karakterističnih dijelova u različitim bojama. Na prednjoj strani senzorske stanice razlikujemo:

- LCD ekran - Crveno
- Tipkala za korisnika - Žuto
- Svjetlosna indikacija za korisnika - Tamno plavo
- Antena za bežično povezivanje - Sivo
- Priključak za senzorsku sondu - Svjetlo plavo
- Senzor osvjetljenja - Rozo
- Solarni panel - Ljubičasto

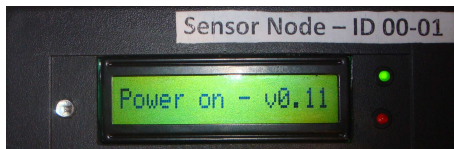


Slika 2.37. Izrađena senzorska stanica



Slika 2.38. Izrađena senzorska stanica sa označenim dijelovima

Nakon priključivanja baterijskog napajanja pali se indikacija zelenom led diodom sa porukom "Power On" i verzijom stanice kao što je to prikazano na Slici 2.39. Zatim stanica započinje konfiguraciju koja traje veoma kratko. Za vrijeme konfiguracije pale se obje led diode te ispisuje poruka "Initializing..." kao što je to prikazano na Slici 2.40. Paljenje obje indikacijske diode dojavljuje korisniku da je senzorska stanica zauzeta i za to vrijeme korisnik ne bi smio gasiti baterijsko napajanje. Ova indikacija se pojavljuje prilikom paljenja stanice, prikupljanja podataka i daljinskog zahtjeva za podacima sa korisničkog računala.



Slika 2.39. Indikacija paljenja senzorske stanice



Slika 2.40. Indikacija konfiguriranja senzorske stanice nakon paljenja

Na LCD ekranu se pojavljuju dodatne informacije za korisnika, kao indikacija kada se spoji ili odpoji senzorska sonda sa porukom "Probe Con" ili "Probe DCon" kao i zauzetost stanice prilikom brisanja memorije sa porukom "Erasing memory". To su samo neke od poruka koje se mogu pojaviti. Tekst poruke koji se pojavljuje jasno govori korisniku o čemu se radi. U trenutnoj verziji senzorske stanice postavljen je samo jedan izlaz za senzorske sonde, no unutarnji dizajn na jednostavan način omogućuje postavljanje i drugog izlaza.

Korisnik može lokalno pristupiti mjerenjima pritiskom na desno tipkalo na stanici. Svakim ponovnim pritiskom istog tipkala prikazuje se vrijednost zadnjeg mjerenja koje je stanica izvela. Sva mjerenja koja stanica izvodi mogu se i prikazati na ekranu. Na ekranu se prikazuje skraćenica imena mjerenja, vrijednost mjerenja i jedinica. Iz svih skraćenica se može jasno razaznati o kojem se mjerenju radi. Prvim pritiskom na desno tipkalo pojavljuje se informacija o mjerenju temperature kao što je prikazano na Slici 2.41 dok drugim pritiskom se pojavljuje informacija o mjerenju tlaka kao što je prikazano na Slici 2.42. Nakon što se korisniku pokažu sva mjerenja ponovno se počinje prikazivati prvo mjerenje.

Lijevo tipkalo se koristi za prikaz dijagnostičkih poruka. Broj dijagnostičkih poruka koje se mogu pojaviti je doista velik. Njihovim pregledavanjem korisnik može doznati koji su se procesi odvijali u stanici i u koje vrijeme. Prvim pritiskom na lijevo tipkalo pojavljuje se tekst koji opisuje događaj dok drugim pritiskom pokazuje se točan datum i vrijeme kada se događaj dogodio. Na ovaj način može se prikazati do deset zadnjih dijagnostičkih poruka koje su se dogodile na stanici. Jednostavnim pritiskanjem lijevog tipkala korisnik ih može na licu mjesta sve pregledati. Neke od dijagnostičkih poruka glase:

- Paljenje sonde - "Node Turned On"



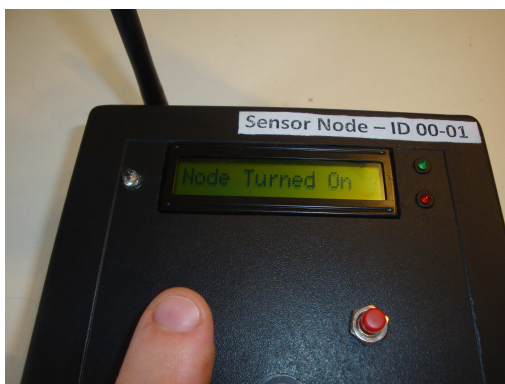
Slika 2.41. Čitanje zadnje vrijednosti temperature



Slika 2.42. Čitanje zadnje vrijednosti tlaka zraka

- Spajanje određene sonde - "Probe1 Con"
- Odspajanje određene sonde - "Probe1 DCon"
- Daljinski zahtjev za podacima - "Remote Data Req"
- Slanje poruka upravljačkoj stanici - "P1.0 ON", "P1.0 OFF"
- i još mnogo drugih poruka

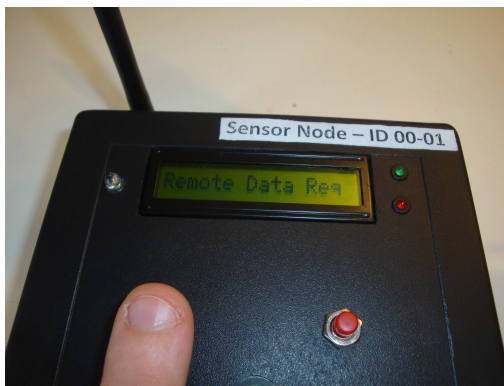
Na Slici 2.43 vidi se prikazana dijagnostička poruka o paljenju stanice. Nakon drugog pritiska vidi se vrijeme kada je poruka nastala kao što je prikazano na Slici 2.44. Poruke se prikazuju od najnovije prema starijim do maksimalno deset zadnje generiranih poruka. Nakon ponovnog pristupa korisnik vidi da je tražen daljinski pristup za podacima kao što je prikazano na Slici 2.45 te da se taj događaj dogodio datuma 7.4 u 14:44 sati kao što je vidljivo na Slici 2.46. Ova mogućnost je jako praktična ukoliko je korisnik na terenu te nema pristup osobnom računalu i programskoj podršci.



Slika 2.43. Prikaz dijagnostičke poruke paljenja stanice



Slika 2.44. Prikaz vremena paljenja stanice

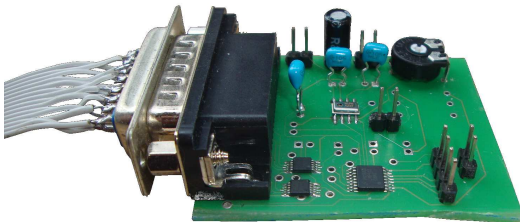


Slika 2.45. Prikaz dijagnostičke poruke pristupa podacima daljinskom vezom



Slika 2.46. Prikaz vremena pristupa podacima

Kao što je već rečeno, na senzorsku stanicu se mogu spojiti različite senzorske sonde. Trenutno je izrađena jedna senzorska sonda koja omogućuje mjerenje vlažnosti tla, temperature tla, temperature iznad tla, pH vrijednosti tla, tlaka zraka, i koncentracije plina CO_2 . Sonda je u potpunosti pripremljena za spajanje potrebnih senzora i osigurava kalibriranje mjerenja i prijenos mjerenja prema senzorskoj stanici u digitalnom obliku. Zbog nedostatka potrebne opreme nije testirano prikupljanje podataka o koncentraciji CO_2 i pH vrijednost tla, no sve potrebne pregradnje za spajanje ovih senzora su napravljene i opisane u tehničkoj dokumentaciji. Izgled senzorske sonde prikazan je na Slici 2.47.

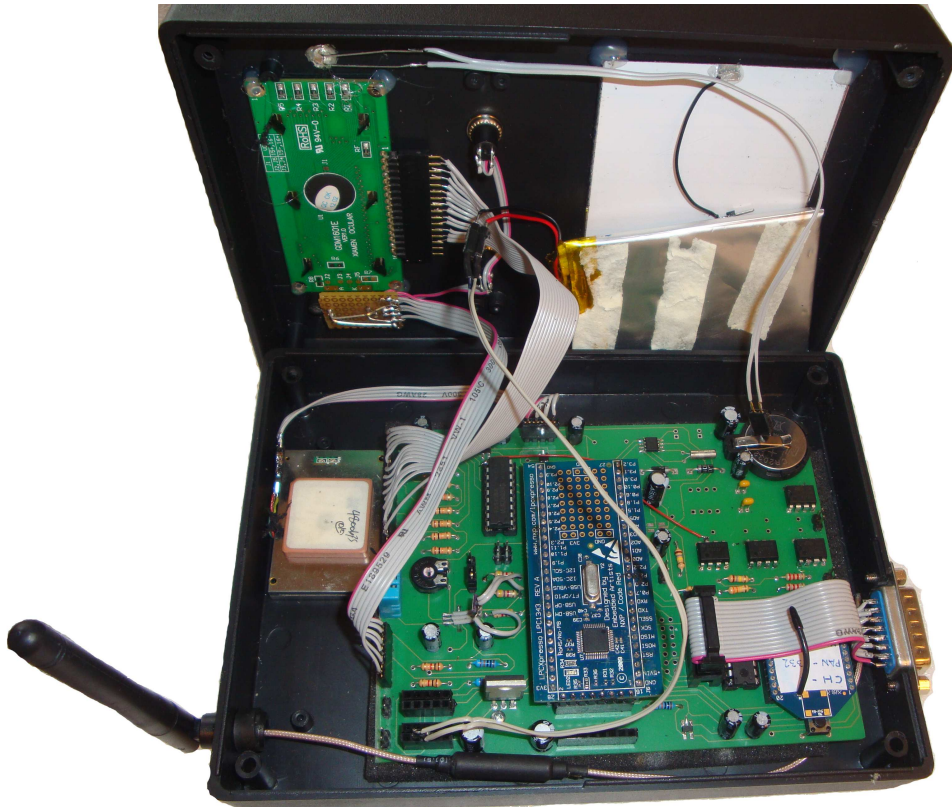


Slika 2.47. Izgled izrađene senzorske sonde za dobivanje dodatnih mjerenja



Slika 2.48. Način povezivanja senzorske stanice i senzorske sonde

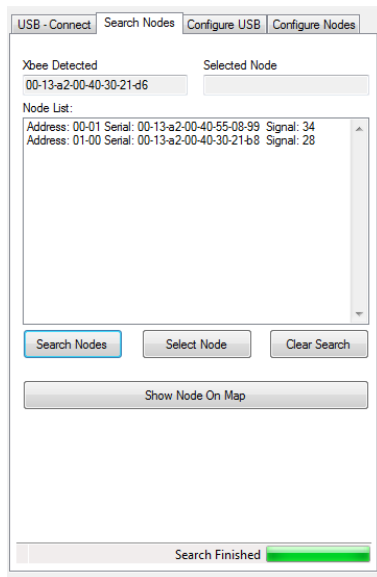
Na svakoj senzorskoj sondi nalaze se kalibracijski koeficijenti koji se razlikuju od sonde do sonde. Nakon spajanja sonde na stanicu ona se automatski prepoznaje i identificiraju se mjerenja te potrebni koeficijenti. Korisnik je nakon spajanja sonde obaviješten porukom na LCD ekranu porukom "Probe1 Con". Spajanje sonde sa senzorskom stanicom prikazano je na Slici 2.48. Osim mogućnosti spajanja dvaju senzorskih sondi postavljen je i poseban izlaz koji služi samo za spajanje sonde koja mjeri vlažnost i temperaturu tla. Zbog informativnog karaktera na Slici 2.49 prikazana je unutrašnjost senzorske stanice. Detaljna specifikacija i realizacija opisana je u tehničkoj dokumentaciji.



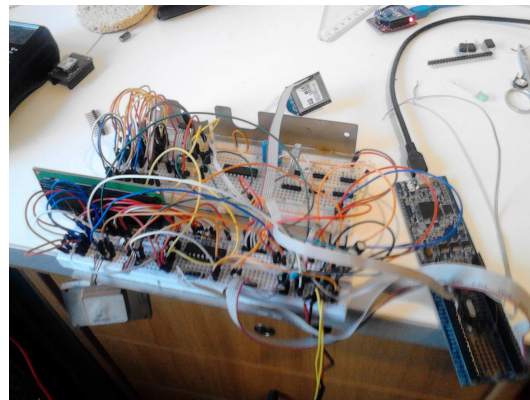
Slika 2.49. Unutrašnjost izrađene senzorske stanice

2.3. Upravljačka stanica

U trenutku pisanja ove dokumentacije upravljačka stanica je u razvojnoj fazi kao što je prikazano na Slici 2.51 i još nije izrađena kao kompaktna cjelina. Korisnik može spojiti do 256 upravljačkih stanica. U osnovnoj ideji ovog projekta zamišljeno je postavljanje malog broja upravljačkih stanica jer je osigurana mogućnost da jedna upravljačka stanica bude povezana sa više senzorskih stanica. Korisnik može identificirati upravljačku stanicu prema jedinstvenom kodnom broju koji se kreće u rasponu od 0x0100-0x01FF. Prilikom skeniranja prostora u korisničkom programu upravljačke stanice prikazuju se na jednak način kao i senzorske. Na Slici 2.50 prikazane su pronađene dvije stanice od kojih je jedna senzorska a druga upravljačka.



Slika 2.50. Pronađena upravljačka i senzorska stanica



Slika 2.51. Upravljačka stanica u razvojnoj fazi

Upravljačka stanica sastoji se od digitalnih izlaza povezanih na visokonaponske relejne sklopke. Kao primjer relejne sklopke može se navesti relej TRK22 [8] tvrtke Iskra. Upravljanje relejima ostvaruje se preko tranzistorskih sklopki sa diodnom zaštitom i svjetlosnom indikacijom upaljenosti releja. Na svakoj stanici zamišljeno je povezivanje od deset do trideset relejnih izlaza ovisno o potrebi. Upravljačka stanica posjeduje i 8 analognih ulaza za spajanje uređaja za mjerenje potrošnje. Na taj način moguće je mjeriti potrošnju energije spojene pumpe za vodu i potrošnju vode pomoću mjerača protoka. Upravljačka stanica posjeduje u sebi 16 MB Flash memorije za spremanje podataka o radu stanice kao i za detaljno zapisivanje trenutne potrošnje energenata. U daljnjem razvoju projekta ovi podaci biti će dostupni korisniku na isti način kao i podaci o mjerenju sa senzorske stanice.

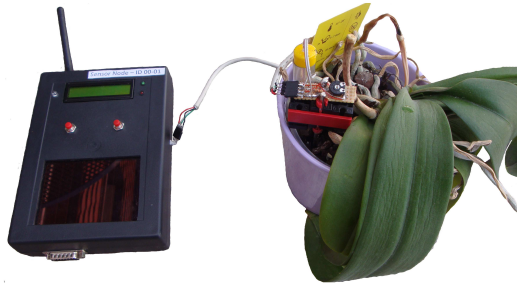
Koncepti za rad upravljačke stanice su zamišljeni no nisu u potpunosti implementirani, stoga se opisuje zamišljeni plan realizacije ovog dijela projekta. Svakom digitalnom izlazu dodijeljena je jedinstvena oznaka oblika $Px.xx$. Ove oznake su u direktnoj vezi sa portovima i pinovima mikrokontrolerskog sustava koji upravlja upravljačkom stanicom. Na kućištu upravljačke stanice ovi izlazi su jasno označeni kako bi korisnik znao gdje treba spojiti aktuator. Upravljačka stanica napaja se iz izvora izmjeničnog napona $220 [V] / 50 [Hz]$. Unutar stanice nalazi se pretvornik napona na standardne razine za pogonjenje upravljačke elektronike, releja i samih aktuatora. Svi pinovi releja osim upravljačkih pinova su dostupni korisniku, kako bi se složila odgovarajuća konfiguracija za upravljanje. Također su dostupni izlazi napona mreže za pogonjenje uređaja većih snaga kao i istosmjerni naponi od 24, 12, 5, 3.3 [V]. Na taj način ne treba osiguravati poseban izvor napajanja aktuatora te je integracija sustava znatno pojednostavljena.

Pomoću korisničkog programa svakoj senzorskoj stanici se dodjeljuju određeni digitalni izlazi na upravljačkoj stanici. Zahtjev za paljenjem ili gašenjem određenog izlaza dolazi od senzorske stanice te se bilježi u internu memoriju upravljačke stanice, kako bi se znalo kada je koja stanica poslala zahtjev za određenom akcijom i zašto. Upravljačka stanica ne može samoinicijativno upaliti određeni relejni izlaz, ali može ugasiti određeni izlaz ukoliko je korisnik podesio određeno vrijeme trajanja upaljenosti izlaza.

Osim informacija o zahtjevima pojedinih senzorskih stanica u internu memoriju bilježi se i stanje analogno digitalnih ulaza koje korisnik odabere. Ukoliko je na ove ulaze spojen linearni senzor, korisnik na jednostavan način može unijeti određene parametre kako bi se dobiveni signal na ulazu pretvorio u neko fizikalno mjerenje. Prema potrebi moguće je dodati bazu podataka poznatih senzora da bi se integracija dodatno pojednostavila. Ova funkcionalnost trenutno nije ukomponirana u programsku podršku.

2.4. Prikaz djelomične implementacije i dobivenih rezultata

Kako bi se djelomično testirao izrađeni sustav, postavljena je eksperimentalna instalacija koja uključuje senzorsku stanicu, korisničko računalo i posudu sa zemljom i biljkom. Instalacija je bila postavljena u zatvorenom prostoru te su snimane veličine temperature zraka, temperature zemlje, tlaka zraka, vlažnosti zemlje i osvjetljenja. Eksperimentalna postava prikazana je na Slici 2.52. Poseban izlaz na senzorskoj stanici korišten je za spajanje jednostavnog senzora vlažnosti tla i analognog temperaturnog senzora KTY81 opisanog u tehničkoj dokumentaciji. Ova senzorska sonda prikazana na Slici 2.53.



Slika 2.52. Postava za ispitivanje rada senzorske stanice



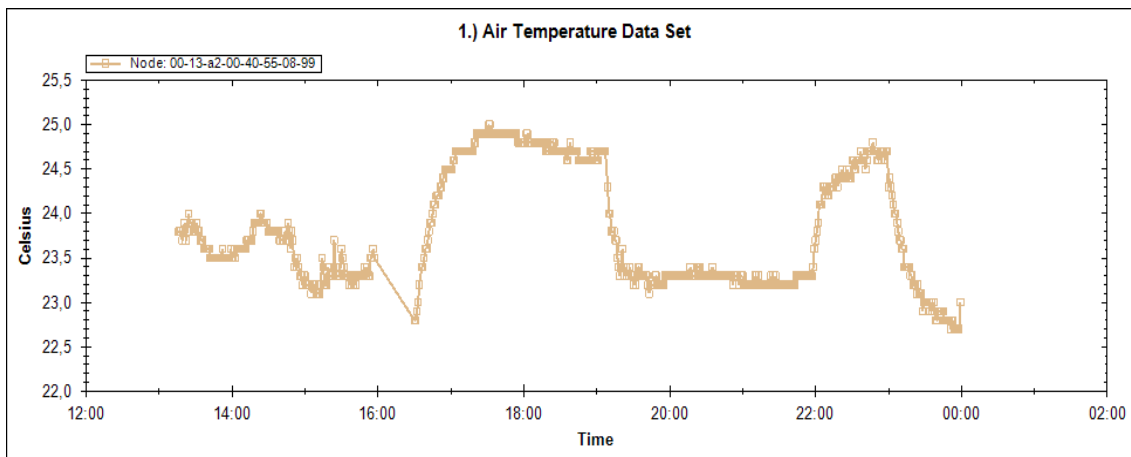
Slika 2.53. Sonda za mjerenje vlažnosti i temperature zemlje

Mjerenja su se provodila datuma 10.4.2013. u vremenu od 13:00 - 00:00 u zatvorenom prostoru sa kratkom pauzom u 16:00. Korišteno vrijeme uzorkovanja je postavljeno na 1 [min]. Oko 13:00 i 18:20 promatrana biljka je zalijevana što se jasno vidi na grafovima vlažnosti i temperature zemlje. Poboljšanje vremena i prestanak kiše nastupio je iza 18:00 što se može primijetiti porastom tlaka zraka koje utječe na stabilnost vremena. Na sljedećim slikama prikazana su dobivena mjerenja kao i neki dodatni proračuni dostupni u izrađenoj programskoj podršci:

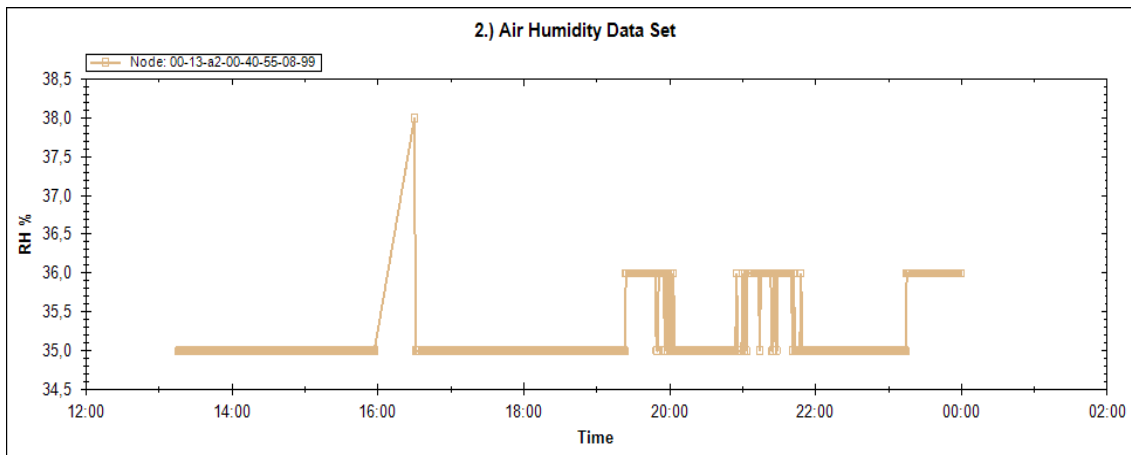
- Temperatura zraka - Slika 2.54
- Relativna vlažnost zraka - Slika 2.55
- Tlak zraka - Slika 2.56
- Osvjetljenje - Slika 2.57
- Vlažnost zemlje - Slika 2.58
- Temperatura zemlje - Slika 2.59
- Točka rosišta - Slika 2.60

- Visina oblaka - Slika 2.61

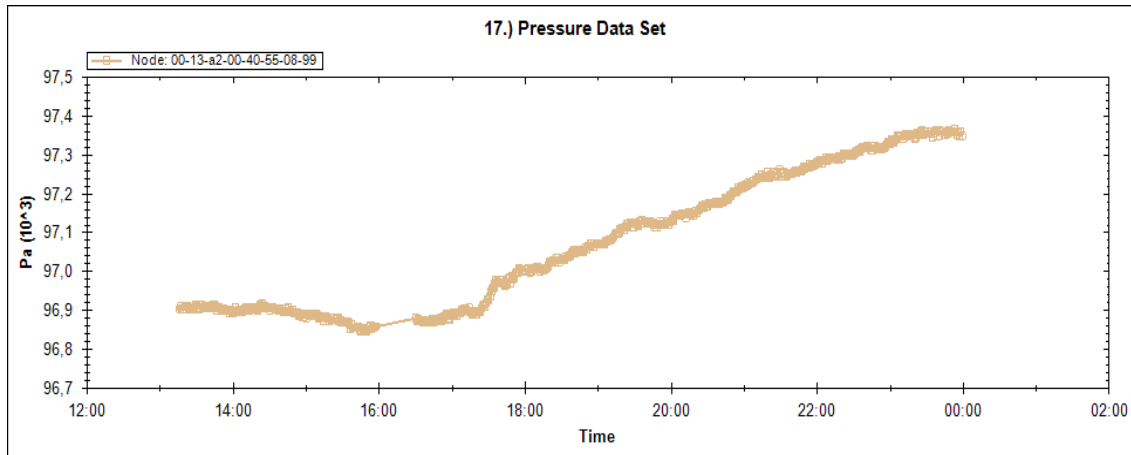
Mjerenje potrošnje i stanja baterijskog napajanja nije prikazano zbog poprično konstantnog iznosa sa nezanimljivim promjenama. Iako je izrađena senzorska sonda pripremljena za dodatna mjerenja kao pH vrijednost i koncentracija CO_2 ili bilo kojeg drugog plina za mjerenje kvalitete zraka, ova mjerenja nisu provedena zbog nemogućnosti nabavke potrebnih pH i CO_2 senzora. Iz grafova je jasno vidljiva jednostavnost prezentacije podataka krajnjem korisniku i kvaliteta mjerenja. Dostupnost ovakvih podataka uzgajivačima poljoprivrednih kultura je od velike važnosti.



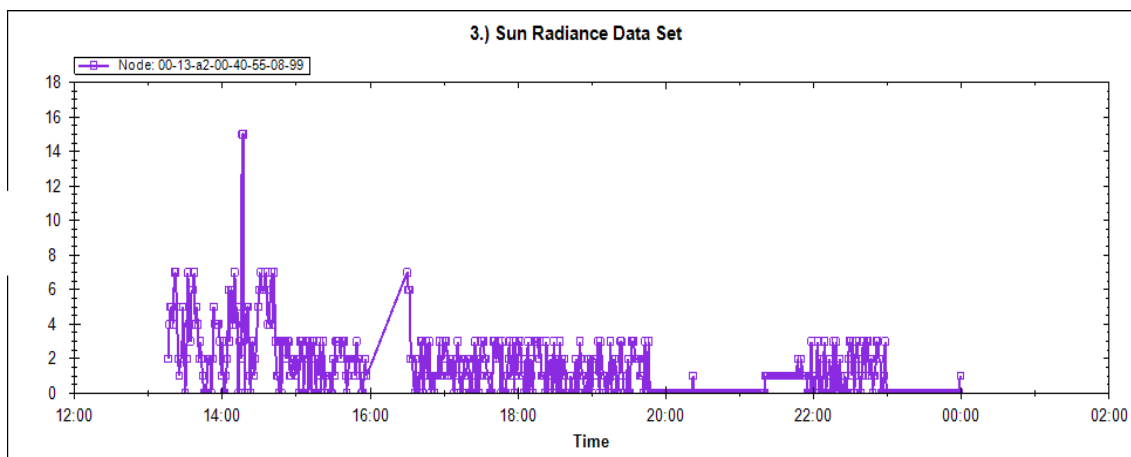
Slika 2.54. Prikaz izmjerene temperature zraka prilikom testiranja



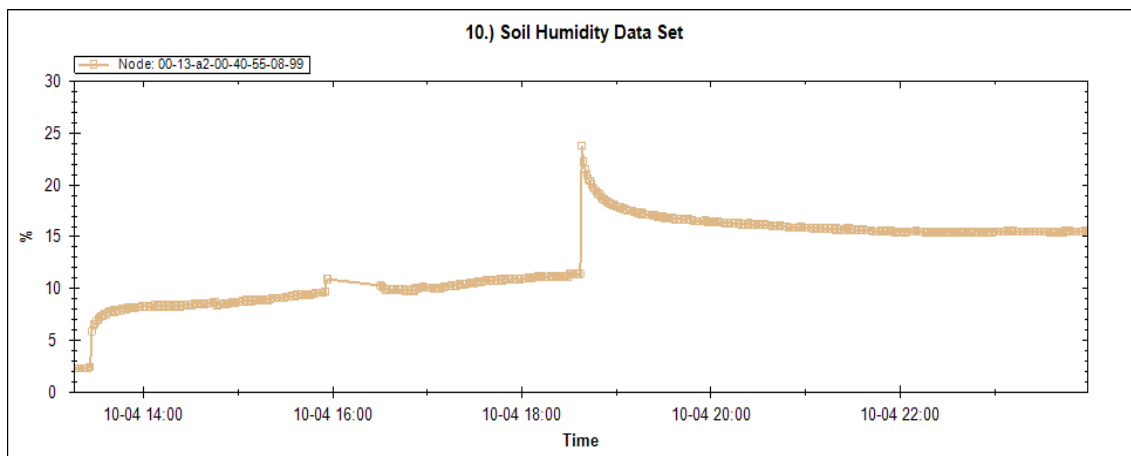
Slika 2.55. Prikaz izmjerene vlažnosti zraka prilikom testiranja



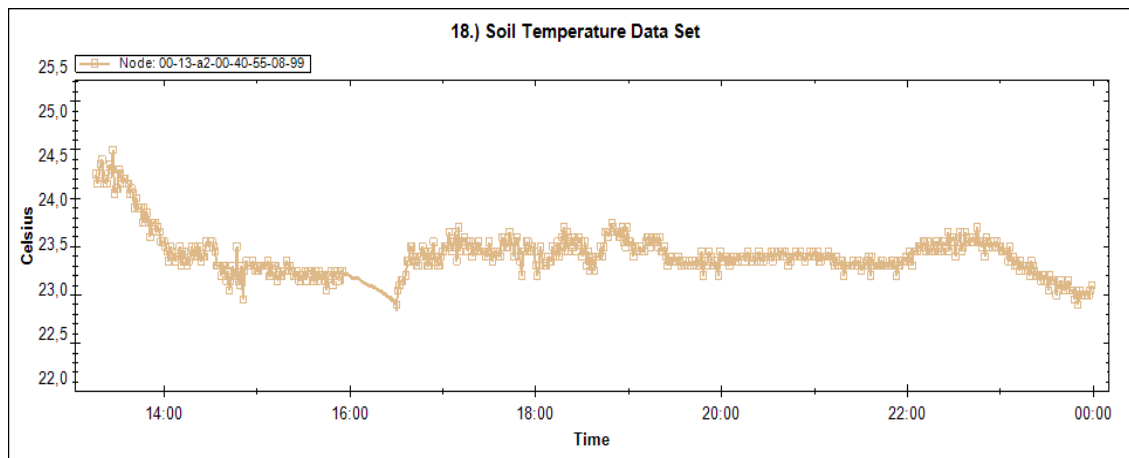
Slika 2.56. Prikaz promjene tlaka zraka prilikom testiranja



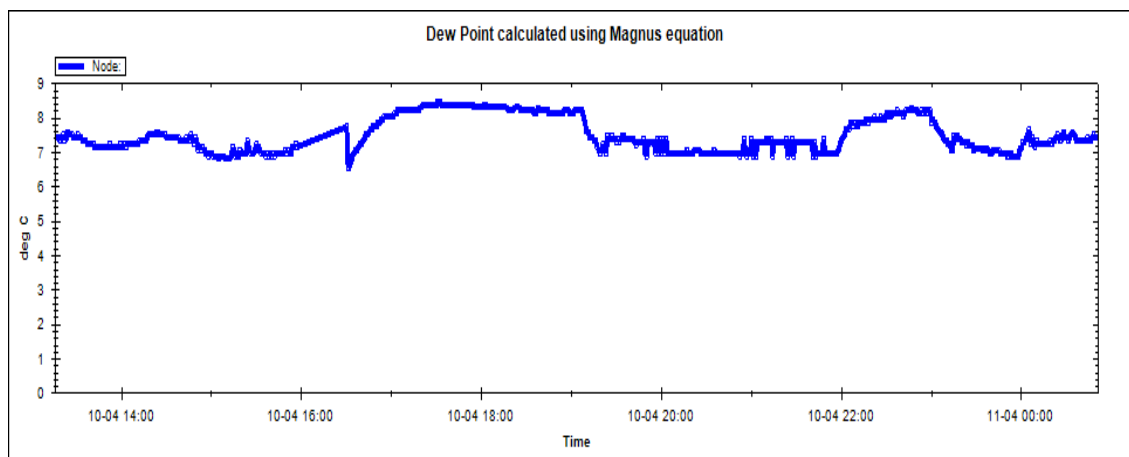
Slika 2.57. Prikaz promjene osvjetljenja prilikom testiranja



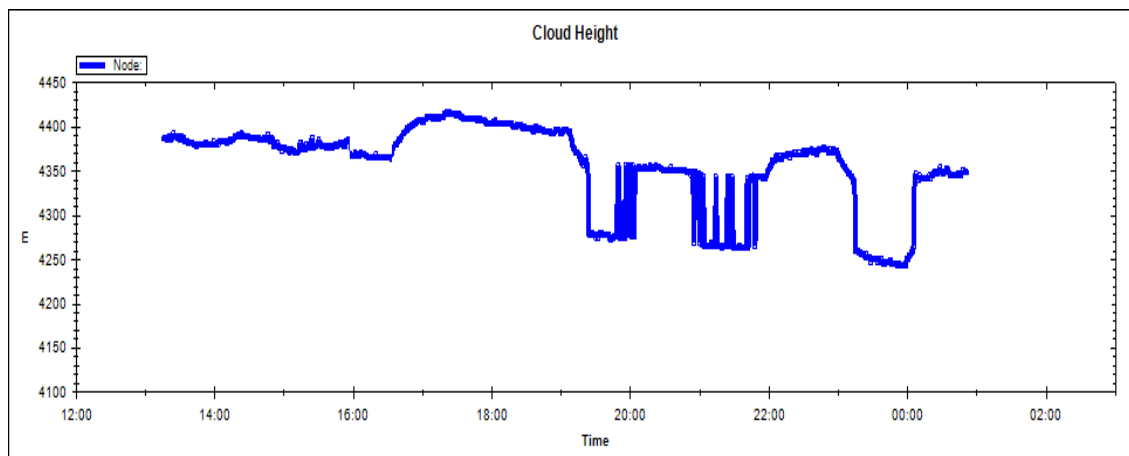
Slika 2.58. Prikaz promjene vlažnosti zemlje prilikom testiranja



Slika 2.59. Prikaz promjene temperature zemlje prilikom testiranja

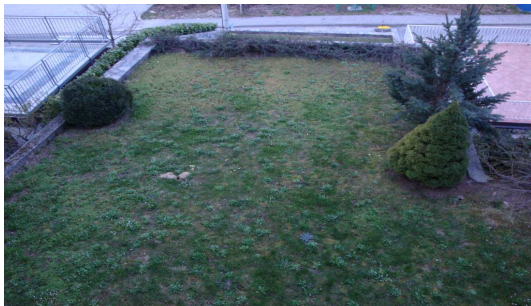


Slika 2.60. Izračunata točka rosišta prema Magnusovom modelu



Slika 2.61. Izračunata visina oblaka iz dobivenih mjerenja

Ovaj eksperiment se provodio na teglici sa zemljom, sa samo jednom izrađenom senzorskom sondom i bez implementiranog upravljanja. Nakon potpune izrade i testiranja upravljačke stanice u planu je provedba eksperimenta na većem uzorku površine. Zelena površina na kojoj se planira testirati cijeli sustav sastoji se od travnjaka površine 50 [m²] podijeljenog na dva dijela. Ove površine prikazane su na Slikama 2.62, 2.63. Oba dijela travnjaka opremljena su sustavom zalijevanja koji se sastoji od cijevi za vodu i prskalica prikazanih na Slici 2.64.



Slika 2.62. Površina za testiranje cijeloga sustava



Slika 2.63. Površina za testiranje cijeloga sustava

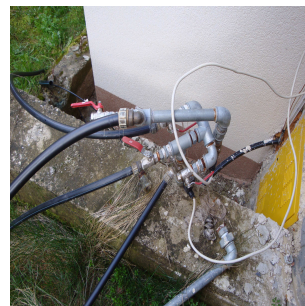
Prskalice su spojene na vodovodnu mrežu odvojenim cijevima preko elektromagnetskih ventila. Korišteni elektromagnetski ventili prikazani su na Slici 2.65 dok je veza dovoda vode prema prskalicama sa vodovodnim sustavom prikazana na Slici 2.66. Otvorenošću ili zatvorenošću ventila se upravlja dovođenjem napona mreže na njihove stezaljke. Iz tog razloga biti će vrlo jednostavno ostvariti upravljanje ovim ventilom koristeći relejni izlaz upravljačke stanice. Ukoliko je samo jedan elektromagnetski ventil otvoren, tlak iz vodovodnog sustava je dovoljan kako bi prskalice radile, te nije potrebno koristiti pumpu za vodu.



Slika 2.64. Korištena prskalica za zalijevanje trave



Slika 2.65. Dva elektromagnetska ventila za upravljanje zalijevanjem



Slika 2.66. Razvodne cijevi prema prskalicama

Kako bi se automatizirala ova površina u planu je izraditi dvije senzorske i jednu upravljačku stanicu. Ova površina predstavlja reprezentativni primjerak za implementaciju ovakvog sustava i kao takva predstavlja izvrstan primjer za testiranje njegovog rada.

3. Mikrokontrolerski sustav

Kao centralni sustav koristi se mikrokontroler *LPC1343* [9] zasnovan na ARM Cortex-M3 arhitekturi specijaliziran za ugradbena rješenja sa malom potrošnjom. Generacija ARM Cortex-M3 zasnovana je na Harvardskoj arhitekturi koja se sastoji od posebnih instrukcijskih, podatkovnih sabirnica te sabirnica za vanjske jedinice. Mikrokontroler se koristi pomoću pločice za razvoj nazvane *LPCXpresso* prikazane na Slici 3.1 sa ugrađenim JTAG debuggerom radi bržeg otklanjanja grešaka. Korištenjem ove nove generacije mikrokontrolera omogućene su brzine rada do 72 [MHz]. Kao osnovne specifikacije ove serije mikrokontrolera treba istaknuti 32-bitne instrukcije, 32 [kB] flash memorije, 8 [kB] podatkovne memorije, podrška za USB sa uključenim driverima, vanjske jedinice za komunikaciju: *UART*, *I²C* i *SPI*, dva 32-bitna i dva 16-bitna timera te do 42 digitalna ulaza i izlaza. Zbog svojih osnovnih karakteristika ovaj mikrokontroler se predstavlja kao izvrsno rješenje za izradu mobilnih senzorskih stanica. Njegova mala potrošnja i mogućnost prilagodbe načina rada kako bi se maksimizirala autonomija rada predstavlja dodatne argumente za izbor ovog mikrokontrolera za sustave koji zahtijevaju dugačko vrijeme autonomije.



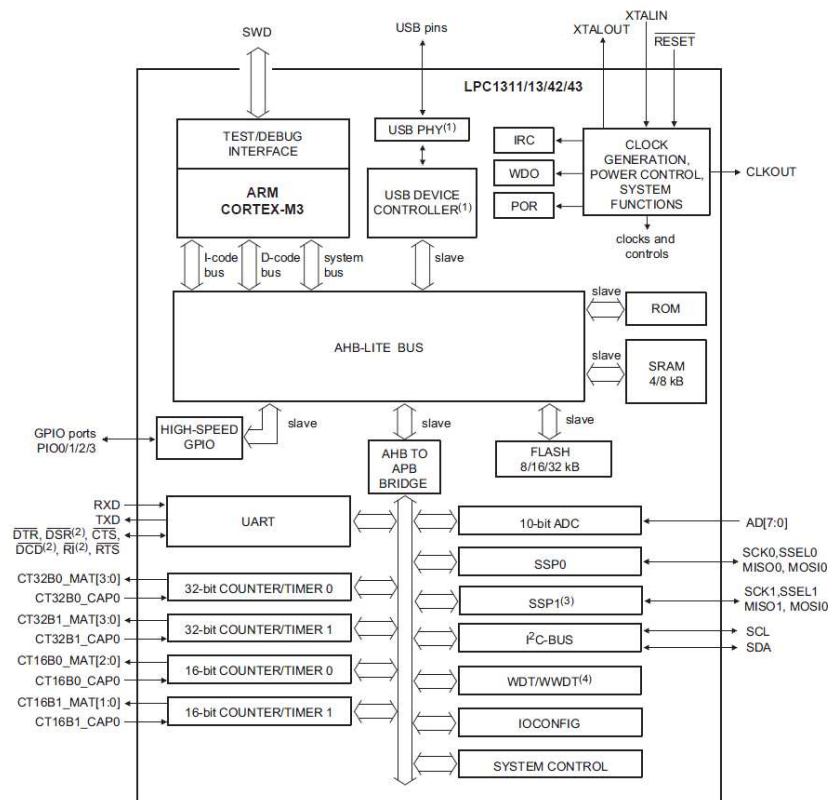
Slika 3.1. Razvojna pločica *LPCXpresso* sa JTAG debuggerom i mikrokontrolerom *LPC1343*

Sada možemo spomenuti ostale karakteristike ovog mikrokontrolera:

- ARM Cortex-M3 procesor radi na frekvencijama do 72 [MHz]
- 32 [kB] flash memorije za spremanje programa

- 8 [kB] radne memorije
- ISP (eng. In System programming) i IAP (eng. In Application Programming) mogućnosti
- Mogućnost dizanja sustava korištenjem UART, ili USB sučelja
- USB driveri oblika MSC (eng. Mass Storage Device) i HID (eng. Human Interface Device) dostupni na samom mikrokontroleru
- Dostupna serijska sučelja:
 - *USB 2.0* sučelje sa maksimalnom brzinom
 - *UART* sučelje sa unutarnjim FIFO registrom
 - *SPI* vanjska jedinica
 - *I²C* vanjska jedinica sa podrškom za *Fast Mode – Plus* režim rada
- Dostupne ostale vanjske jedinice:
 - Do 42 dostupna ulaza/izlaza sa mogućnosti postavljanja unutarnjih pull-up/down otpornika
 - Dostupna 4 timera te dodatni timeri: Watchdog (*WDT*), Windowed Watchdog (*WWDT*) te System tick timer
- Mogućnost povezivanja JTAG debuggera
- Izlazna struja na pinu do maksimalnog iznosa 20 [mA]
- Uključena PMU (eng. Power Management Unit) za smanjenje potrošnje aktiviranjem različitih načina rada (Sleep, Deep-sleep i Deep power-down)
- Ostvarivanje smanjenje potrošnje jednostavnim pozivanjem funkcija iz radne memorije
- Rad na malim naponima od 2 do 3.6 [V]
- 10-bitni analogno digitalni pretvornik multipleksiran na 8 pinova
- Mogućnost generiranja prekida na razinu ili brid ulaznog signala
- Integrirani oscilator sa područjem rada od 1-25 [MHz]
- Mogućnost povećavanja radnog takta koristeći PLL do maksimalne brzine rada od 72 [MHz]
- Podešavanje posebnog PLL skaliranja za potrebe USB vanjske jedinice

Mogućnosti ostvarivanja komunikacija *UART*, *I²C* te *SPI* uz veliki broj ulazno-izlaznih jedinica predstavlja najvažniji kriterij za korištenje ovog procesora. Kako senzorska stanica posjeduje mnoštvo dodatnih vanjskih jedinica potrebno je osigurati mogućnost komunikacije sa svim protokolima. Pojedine karakteristike ovih protokola i teorijska podloga opisane su u Poglavlju 3.1. Da bi se jednostavnije prikazale sve mogućnosti *LPC1343* Cortex-M3 mikrokontrolera, pojednostavljena blokovska shema prikazana je na Slici 3.2. Na shemi je vidljiva organizacija samog mikrokontrolera sa svim dostupnim jedinicama i izlaznim pinovima.



Slika 3.2. Blokovski prikaz mikrokontrolera *LPC1343* baziranog na ARM Cortex-M3 arhitekturi

Radi lakšeg razvoja i pristupa pojedinim pinovima mikrokontrolera koristi se *LPCXpresso* pločica koja se sastoji od pločice sa mikrokontrolerom *LPC1343* koja se naziva *Target* (hrv. meta) i od *JTAG* debuggera koji se naziva *LPCLink*. Korištenjem *JTAG* debuggera programer je u mogućnosti on-line pratiti izvršavanje koda na mikrokontroleru i imati direktan uvid u stanja pojedinih registara i varijabli. Ovime je uvelike skraćeno vrijeme potrebno za razvoj ovog sustava. *JTAG* debugger se spaja sa računalom preko *USB 2.0* sučelja dok je za potrebe debugiranja veza sa mikrokontrolerom ostvarena *SWD* (eng. Serial Wire Debug) sučeljem. Programiranje se vrši iz programskog alata *LPCXpresso IDE* zasnovanog na platformi *Eclipse*. Ovaj programski alat omogućuje jednostavno programiranje u programskom jeziku

C uz optimizaciju koda te jednostavan i efektivan debug control. Detaljna dokumentacija LPCXpresso pločice nalazi se u [10] dok se shema LPCXpresso pločice nalazi u [11]. Kako bi se ubrzao razvojni proces djelomično su korišteni open-source kodovi dostupni na [12].

3.1. Korišteni komunikacijski protokoli

U ovom radu korišteni su mnogi komunikacijski protokoli kako bi se ostvarila veza između perifernih jedinica na senzorskom sustavu i glavnog upravljačkog mikrokontrolera. Razumijevanje načina rada pojedine komunikacije nužno je kako bi se ona implementirala. Stoga u ovom pregledu daje se kratka teorijska podloga za svaku od korištenih komunikacija. Pri izradi ovog rada javila se potreba za implementacijom sve tri od spomenutih komunikacija zbog korištenih vanjskih jedinica. U Tablici 3.1 dan je pregled korištenih vanjskih jedinica (čipova) sa komunikacijama koje koriste. U nastavku opisane su sve komunikacije, teorija prijenosa podataka te njihove prednosti i mane.

U nastavku su opisani sljedeći komunikacijski protokoli: $UART$ 3.1.1, I^2C 3.1.2, SPI 3.1.3 na apstraktnoj i teorijskoj razini dok je u nastavku ovog rada opisana praktična i programska implementacija za svaki korišteni protokol. Ostvarivanje ovih komunikacija znatno je pojednostavljeno korištenjem zasebnih perifernih jedinica dostupnih u korištenom mikrokontroleru $LPC1343$ koje na taj način oslobađaju procesorske resurse. Konfiguriranje perifernih jedinica dostupnih u mikrokontroleru te je ostvarena programska podrška prezentirana u Poglavlju 3.2.4.

Tablica 3.1. Pregled komunikacijskih protokola za komponente korištene u ovom radu

Komponenta	Komunikacijski protokol	Opis
MCP23009	I^2C	Ulazno-izlazno proširenje
BMP085	I^2C	Barometar
PCF8563	I^2C	Real Time Clock
24LC512	I^2C	EEPROM memorija
24LC64	I^2C	EEPROM memorija
ADS1015	I^2C	AD pretvornik
XBee Pro	$UART$	RF tranciever
DHT11	Half duplex $UART$	Senzor vlage zraka
SirfStar II	$UART$	GPS modul
MPL115A1	SPI	Barometar
LMP91050	SPI	AFE PH senzor
LMP91200	SPI	AFE NDIR/Gas senzor
A25L016	SPI	FLASH memorija

3.1.1. Serijska UART komunikacija

UART (eng. Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) komunikacija je vrlo čest oblik serijske komunikacije koji se koristi u ugradbenim sustavima. Ovakav oblik komunikacije je jedan od prvih oblika koji se koristio čak i u telegrafskim sustavima za prijenos Morseovih kodova. Prvo single-chip rješenje potječe još iz davne 1971. godine te se ovakva komunikacija vrlo često koristi i danas. Razlog duge povijesti UART komunikacije je u njezinoj jednostavnosti i brzini prijenosa. Većina današnjih mikrokontrolerskih sustava pa čak i oni najjednostavniji posjeduju periferne jedinice koje pojednostavljuju ostvarivanje komunikacije te se još i danas održava kao standard u embedded rješenjima. Riječ "Universal" označava mogućnost konfiguriranja brzine prijenosa podataka. U tipičnom asinkronom UART prijenosu podataka sudjeluju dva sustava povezanih sabirnicom koja se sastoji od dvije žice od kojih se jedna često naziva *Rx* a druga *Tx*. Tok podataka je vrlo često dvosmjernan odnosno *Full – Duplex* dok postoje rješenja i sa *Half – Duplex* i *Simplex* komunikacijom.

Rx označava pin na UART sučelju koji služi kao ulaz za čitanje podataka odnosno *Receive* (hrv. primati) i konfiguriran je kao open-drain ulaz dok *Tx* pin služi kao izlaz za slanje podataka na drugi sustav odnosno *Transmit* (hrv. slati). Ovaj pin je uvijek konfiguriran kao digitalni izlaz. Kada spominjemo UART komunikaciju bitno je spomenuti i naponske razine koje se koriste za prijenos digitalnih signala. Pod imenom *TTL* (eng. transistor-transistor logic) podrazumijeva se najjednostavniji oblik komunikacije gdje je visoka razina predstavljena naponom napajanja, često 3.3 [V] dok je niska razina predstavljena naponom od 0 [V]. Tako su i razvijene podvrste komunikacije koje koriste naponske razine kao: *RS – 232* ([−15, 15] [V]), *RS – 422* ([−6, 6] [V]) i *RX – 485* ([−7, 12] [V]). U ovom radu korišten je samo *TTL* oblik UART komunikacije stoga se podvrste neće dodatno objašnjavati.

Komunikacija se vrši između dvaju uređaja za razliku od ostalih komunikacija koje ćemo spomenuti. To ujedno predstavlja i prvu manu. Jedna UART periferna jedinica se u pravilu može iskoristiti za komunikaciju sa samo jednim uređajem. Broj potrebnih veza se tako sveden na minimum jer je pin *Rx* za primanje poruke spojen na pin *Tx* za primanje poruke od drugog uređaja. Iz toga slijedi druga riječ "Asynchronous" (hrv. asinkrona) što označava nepostojanje zajedničkog signala koji služi za sinkronizaciju prijenosa bitova između dvaju uređaja, odnosno zajednički clock signal. To znači da uređaj koji prima mora podesiti mjerenje vremena prema trenutku dolaska poruke. Ukoliko mjerenje proteklog vremena prijenosa bita nije dovoljno precizno na oba uređaja, dolazi do pogrešaka koje se nazivaju "Baudrate error" što uzrokuje nepravilno slanje ili čitanje poruke. Stoga je bitno da oba sustava imaju pravilno podešenu brzinu prijenosa (eng. baudrate) koja bi u najgorem slučaju trebala biti 16 puta manja od frekvencije rada f oba uređaja. Asinkrona komunikacija pojednostavljuje implementaciju odnosno smanjuje broj potrebnih veza, no ukoliko nisu zadovoljeni zahtjevi brzine tada dolazi do čestih pogrešaka.

Prijenos poruka se u UART komunikaciji obavlja na sljedeći način. U mirnome stanju oba Tx i Rx trebaju imati visoku razinu. Prijenos i primanje podataka započinje *Start Bit*-om koji se detektira spuštanjem razine Tx signala na nisku razinu. Zatim nakon jednog vremena trajanja bita kreće sukcesivan prijenos podataka u istim vremenskim intervalima:

$$T = \frac{1}{\text{Baudrate}} \quad (3.1)$$

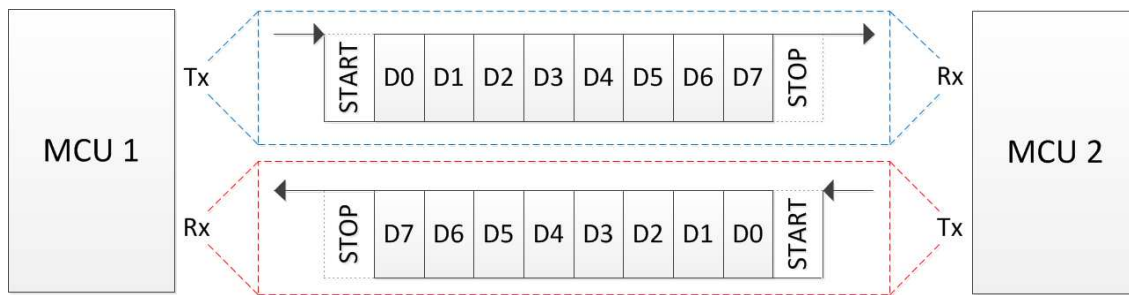
gdje *Baudrate* predstavlja brzinu prijenosa bita. Širina poruke koja se prima je veličine 5 do 8 bita. Brzina prijenosa i duljina poruke moraju biti ispravno konfigurirane u oba uređaja. Nakon prijenosa bitova poruke stanje Tx pina se postavlja na visoku razinu što nazivamo *Stop Bit*. Sada nakon još jednog vremena T može započeti slanje nove poruke sa novim *Start bit*-om. Vidimo da je UART komunikaciju dovoljno definirati preko brzine *Baudrate* i duljine paketa *Data Bits*. Budući je komunikacija dvosmjerna, isto ponašanje se događa na obje linije $Tx_1 \rightarrow Rx_2$ i $Tx_2 \rightarrow Rx_1$. Prilikom primanja poruke uređaj mora detektirati *Start Bit* te nakon jednog i pol vremena prijenosa potrebno je uzorkovati bitove poruke. Primanje se završava nakon prijenosa definiranog broja podataka te detekcijom *Stop Bit*a. U većini slučajeva kod mikrokontrolerskih sustava to uzrokuje generiranje prekida nakon što broj podataka u ulaznom FIFO spremniku dosegne definiranu razinu. Ukoliko *Stop Bit* nije detektiran tada možemo zaključiti da je došlo do pogreške slanja te je potrebno ispravno reagirati.

Tipična UART jedinica sastoji se od:

- Sata (eng. clock) čija je brzina višekratnik brzine prijenosa
- Ulazi i izlazni pomični registri za spremanje *Data Bit*-ova
- Logika za slanje i primanje poruka
- Logika za čitanje i pisanje u registre

Pojednostavljeni prikaz UART komunikacije na fizičkoj razini prikazan je na Slici 3.3. Oznake *MCU* 1 i 2 označavaju prvi i drugi mikrokontrolerski sustav. Na Slici je prikazana razmjena jedne poruke duljine 8 bita u oba smjera.

Kao što možemo vidjeti u Tablici 3.1 postoje tri uređaja koja zahtijevaju UART jedinicu: XBee-Pro modul, GPS modul i senzor vlažnosti zraka DHT11. Kako je potrebna velika brzina prijenosa podataka bežičnim putem kako bi krajnji korisnik što manje čekao na dohvaćanje podataka, brzina prijenosa između XBee modula i mikrokontrolera *LPC1343* postavljena je na $115000 \left[\frac{\text{bit}}{\text{s}}\right]$. Komunikacija sa GPS modulom i čipom *SirfStar II* nije vremenski kritična i konfigurirana je na $4800 \left[\frac{\text{bit}}{\text{s}}\right]$. Iz tog razloga UART periferna jedinica je postavljena da konstantno komunicira velikom brzinom sa XBee modulom. Kako bi se povezao GPS modul potrebno je



Slika 3.3. Prijenos poruka UART komunikacijom

emulirati rad UART-a koristeći ulazno-izlazne pinove mikrokontrolera. Razmjena poruka između ova dva sustava se događa samo na zahtjev mikrokontrolera te se vodi na niskoj brzini i stoga ne oduzima puno mikrokontrolerskih resursa. Metoda emuliranja rada pojedine vanjske jedinice koristeći ulazno-izlazne pinove nadređenog sustava popularno se naziva *Bit banging* te se često koristi u slučajevima kada pojedine vanjske jedinice za komunikaciju ne postoje ili nisu dostupne. Ova metoda zahtjeva precizno mjerenje proteklog vremena i mnogo računalnih resursa ali pri niskim brzinama je izvedivo i jeftino rješenje. Detaljno objašnjenje ostvarivanja komunikacije sa GPS modulom opisano je u Poglavlju 4.4.2.

Posljednji uređaj koji zahtjeva serijsku komunikaciju je senzor vlage *DHT11*. Ova serijska komunikacija nije tipična UART komunikacija i provodi se preko jednog komunikacijskog pina. Oblik i način komunikacije je detaljno opisan u dokumentaciji senzora te je maksimalno pojednostavljen tako da nema potrebe za zasebnom UART perifernom jedinicom. Sam uređaj je zamišljen tako da se povezuje sa jednim ulazno-izlaznim pinom mikrokontrolera preko kojeg se odvija dvosmjerna komunikacija. Detaljan opis komunikacije sa ovim senzorom prikazan je u Poglavlju 4.1.3.

3.1.2. I^2C komunikacija

Komunikacijski protokol I^2C (eng. Inter-Integrated Circuit) je fleksibilan oblik komunikacije razvijen 1982. godine od tvrtke Phillips u svrhu ostvarivanja komunikacije između komponenata na matičnim pločama, ugradbenim sustavima te mobilitelima. Zamišljena je kao jednostavan način povezivanja glavnog sustava (eng. Master) sa mnoštvom perifernih jedinica (eng. Slave) preko dvosmjerne sinkrone komunikacijske linije. Detaljna specifikacija ove komunikacije dana je u [13] no u nastavku rada opisani su bitni koncepti ovog oblika komunikacije. Komunikacija se odvija pomoću dvije open-drain linije SDA (eng. Serial Data) i SCL (eng. Serial Clock) koje su podignute na visoku razinu pomoću dva pull-up otpornika. U samim začecima brzina komunikacije između glavnog uređaja i podređenih uređaja se kretala do 100 [kHz].

Povijesni razvoj I^2C protokola glasi:

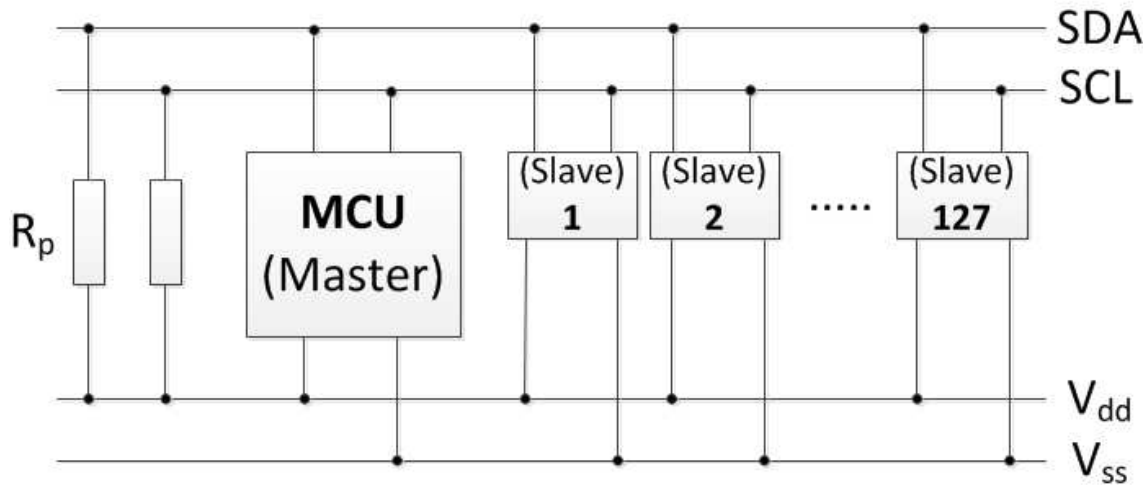
- 1982 - Originalni protokol razvijen od tvrtke Phillips dostiže brzinu 100 [kHz]
- 1992 - Protokol je povećao brzinu prijenosa na 400 [kHz] nazvan *Fast Mode*
- 1998 - Protokol je povećao brzinu prijenosa do 3.5 [MHz] nazvan *High-Speed Mode*
- 2000 - Poboljšanje protokola iz 1998 godine
- 2007 - Protokol je uveo brzinu prijenosa od 1 [MHz] nazvan *Fast-Mode Plus*
- 2012 - Protokol je povećao brzinu prijenosa na 5 [MHz] nazvan *Ultra Fast-Mode Plus* te uveo novi fizički sloj

Iz ovog pregleda vidimo dugačku povijesti I^2C komunikacije. Od datuma 10.08.2006. nije potrebno plaćanje licence za ostvarivanje ovog tipa protokola no i dalje je potrebno plaćanje odobravanja adrese I^2C čvora tvrtci NXP (Phillips).

Svaki podređeni uređaj na I^2C sabirnici razlikuje se jedinstvenom 7-bitnom adresom. To omogućuje spajanje do 128 različitih uređaja na istu liniju. Pritom je potrebno osigurati da su sve adrese uređaja različite da bi se spriječilo pobijanje poruka. Sama 7-bitna adresa podređenog uređaja je vrlo često hardkodirana unutar samog uređaja. U nekim slučajevima omogućena je promjena adrese preko izlaznih pinova na samom uređaju kako bi se omogućilo spajanje više istih tipova uređaja na istu I^2C liniju. To je česti slučaj kod perifernih memorija sa I^2C komunikacijom koje su opisane u nastavku ovog rada.

Sinkrona komunikacija ostvarena je signalom SCL kojeg generira glavni uređaj na sabirnici te je slanje i primanje bitova sinkronizirano sa tim signalom. Samo glavni čvor na sabirnici upravlja sinkronizacijskim satom SCL dok ostali uređaji na sabirnici samo slušaju liniju. Linija SDA koristi se za dvosmjernu komunikaciju

te upravljanje tom linijom započinje glavni uređaj u trenutku slanja poruke, te se kontrola preuzima od strane podređenog uređaja u trenutku odgovora. Uvijek je glavni uređaj taj koji započinje i završava razmjenu podataka te se ni u jednom trenutku ne smije dogoditi da podređeni uređaj sam preuzme kontrolu nad *SDA* i *SCL* linijama. Način spajanja glavnih i podređenih uređaja na *I²C* sabirnicu prikazan je na Slici 3.4.



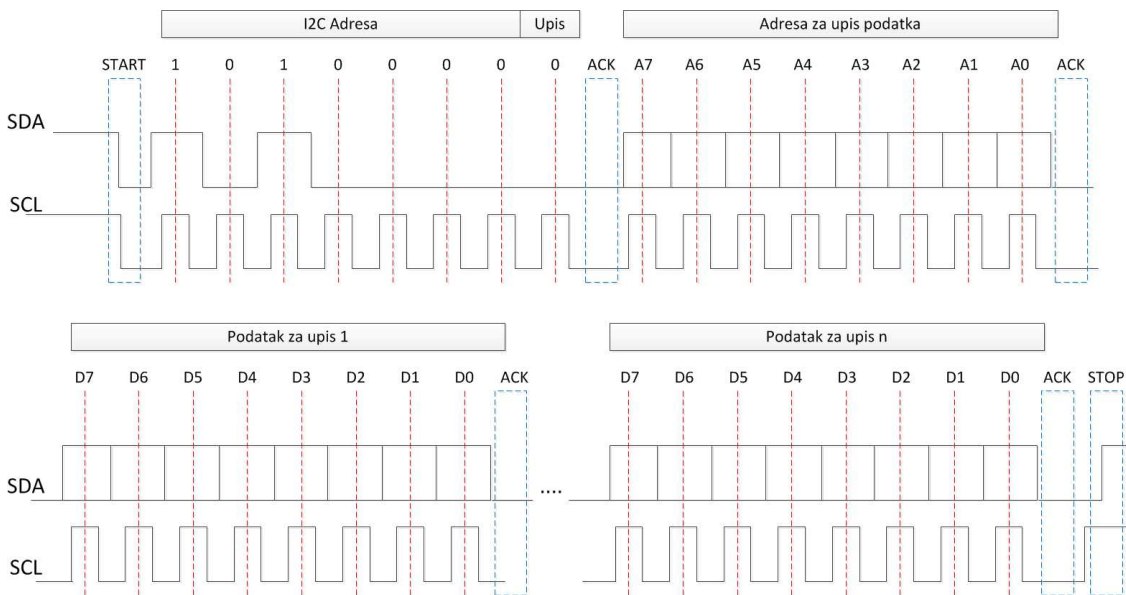
Slika 3.4. Konfiguracija *I²C* sabirnice

Potrebno je osigurati pravilan odabir pull-up otpornika R_p koji tipično iznose 5 [kΩ] za brzine prijenosa od 400 [kHz] ili 10 [kΩ] za brzine prijenosa od 100 [kHz]. U ovom radu svi podređeni uređaji omogućuju maksimalnu brzinu od 400 [kHz] i stoga je odabrana vrijednost otpora $R_p = 4.7$ [kΩ]. Pull-up otpornici se postavljaju samo jednom na cijeloj sabirnici i njihov broj ne ovisi o broju spojenih čvorova, što značajno pojednostavljuje implementaciju. Dodatno fizikalno ograničenje je to da je potrebno osigurati da vrijednost međukapaciteta linija sabirnice ne prelazi 400 [pF] što ograničava duljinu komunikacijske linije na par metara. Ovo ograničenje duljine ne predstavlja problem u sustavu kojeg razmatramo.

Sada će se objasniti koncept slanja podataka na podređene čvorove te koncept primanja podataka sa podređenih čvorova. Gotovo svi uređaji sa *I²C* komunikacijom komuniciraju sa nadređenim uređajima na principu čitanja i pisanja na interne memorijske lokacije. Tako su u dokumentaciji svakog uređaja definirane adrese (odnosno kodovi) za pristup ili upisivanje različitih informacija bitnih za rad tog uređaja. Kao primjer možemo navesti memoriju gdje kodovi predstavljaju memorijske lokacije na samom uređaju na koje možemo čitati ili pisati. Kod analogno digitalnih pretvornika memorijske lokacije predstavljaju mjesta na kojima se nalazi rezultat pretvorbe ili mjesta sa konfiguracijskim bitovima.

Kako bi upisali neku informaciju na podređeni sustav, potrebno je izvršiti sljedeće radnje. Dok je sabirnica slobodna oba signala *SDA* i *SCL* poprimaju vi-

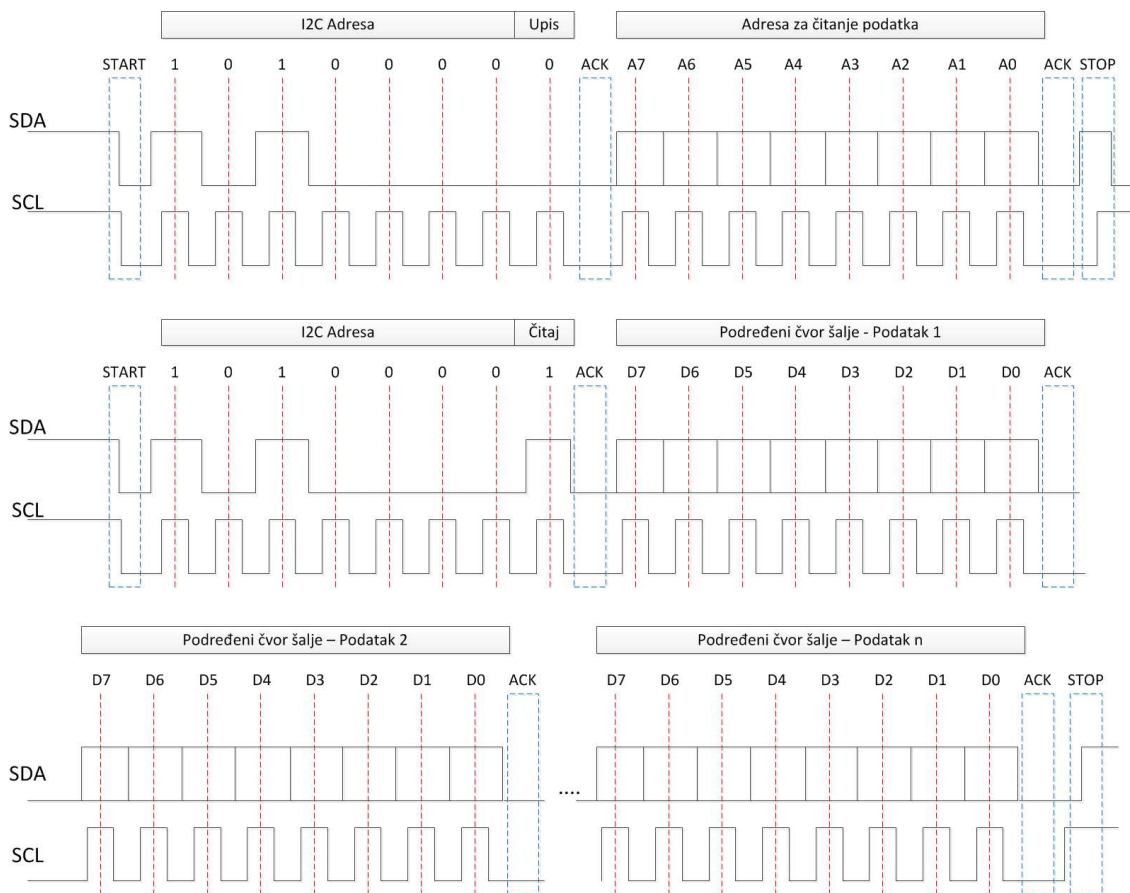
soku razinu. Glavni uređaj na sabirnici započinje slanje na način da postavi *Start Condition* (hrv. početno stanje) tako da postavi signal *SDA* na nisku razinu dok je *SCL* na visokoj razini. To signalizira svim podređenim čvorovima da počnu primati poruku. Zatim glavni uređaj šalje 7-bitnu adresu čvora na koji želi upisati informaciju te kao posljednji bit šalje nisku razinu što govori podređenome čvoru da glavni čvor želi upisati podatak. Svi čvorovi koji ne zadovoljavaju željenu 7-bitnu adresu prestaju čitati stanje na sabirnici dok čvor koji je adresiran odgovara da se nalazi na sabirnici tako da generira *Acknowledge* (hrv. potvrdu) tako da postavlja liniju *SDA* na nisku razinu. Nakon potvrde od podređenog čvora, nadređeni čvor upisuje byte po byte dok nakon byte-a mora slijediti *Acknowledge* od podređenog sustava. Prvi upisani byte najčešće označava memorijsku lokaciju na koju želimo upisati dok ostali byte-ove označavaju podatke koji se sukcesivno upisuju od definirane memorijske lokacije. Potrebno je voditi računa da se kod I^2C komunikacije prvo šalju viši bitovi pa zatim niži. Glavni čvor upisuje proizvoljan broj podataka no potrebno je paziti da se ne bi upisao veći broj podataka nego što podređeni čvor može primiti. Ako nakon bilo kojeg prenesenog byte-a podređeni čvor ne generira *Acknowledge* tada je vjerojatno došlo do greške upisa. Nakon što glavni čvor upiše sve željene podatke generira se *Stop Condition* na način da glavni čvor postavlja *SDA* na visoku razinu dok je *SCL* na visokoj razini. To signalizira svim čvorovima da je prijenos podataka završio. Čvor koji je bio adresiran u tom prijenosu ne odgovara na završetak slanja. Tipični prikaz upisivanja podataka na memorijsku lokaciju podređenog čvora sa adresom 1010000 prikazan je na Slici 3.5.



Slika 3.5. Prikaz stanja I^2C sabirnice pri upisu podatka na podređeni čvor na adresi 1010000

Svaki I^2C podređeni čvor u sebi ima registar za pohranjivanje pokazivača na internu memorijsku lokaciju kojoj nadređeni sustav želi pristupiti. Nakon čitanja ili pisanja svakog podatka ta interna adresa se povećava za jednu memorijsku loka-

ciju. Pri upisu prvog podatka na podređeni čvor prvo se popunjava interni registar. Kako bi se ostvarilo čitanje sa podređenog čvora prvo je potrebno upisati željenu memorijsku lokaciju na isti način kao kod normalnog upisa podatka. Nakon upisa samo jednog byte-a on se upisuje u interni registar pokazivača te je potrebno završiti upisivanje podatka sa *Stop Condition*. Zatim ponovo inicijaliziramo slanje *Start Condition*-om ali ovaj put se u prvi bit upisuje I^2C adresa podređenog čvora i kao posljednji bit upisujemo vrijednost 1. To signalizira podređenom čvoru da glavni čvor želi čitati sa prethodno upisane adrese. Zatim dok glavni čvor ne postavi *Stop Condition*, podređeni čvor šalje podatke sukcesivno sa memorijske lokacije, sinkronizirano sa impulsima *SCL* linije. Nakon svakog primljenog byte-a glavni čvor mora potvrditi primitak generiranjem *Acknowledge* stanja. Tipični prikaz čitanja podatka sa memorijske lokacije podređenog čvora sa adresom 1010000 prikazan je na Slici 3.6.



Slika 3.6. Prikaz stanja I^2C sabirnice pri čitanju podatka sa podređenog čvora na adresi 1010000

Korišteni mikrokontrolerski sustav posjeduje perifernu jedinicu koja znatno pojednostavljuje ostvarivanje I^2C komunikacije. Ova periferna jedinica je opisana u Poglavlju 3.2.4 zajedno da ostvarenom programskom podrškom.

3.1.3. SPI komunikacija

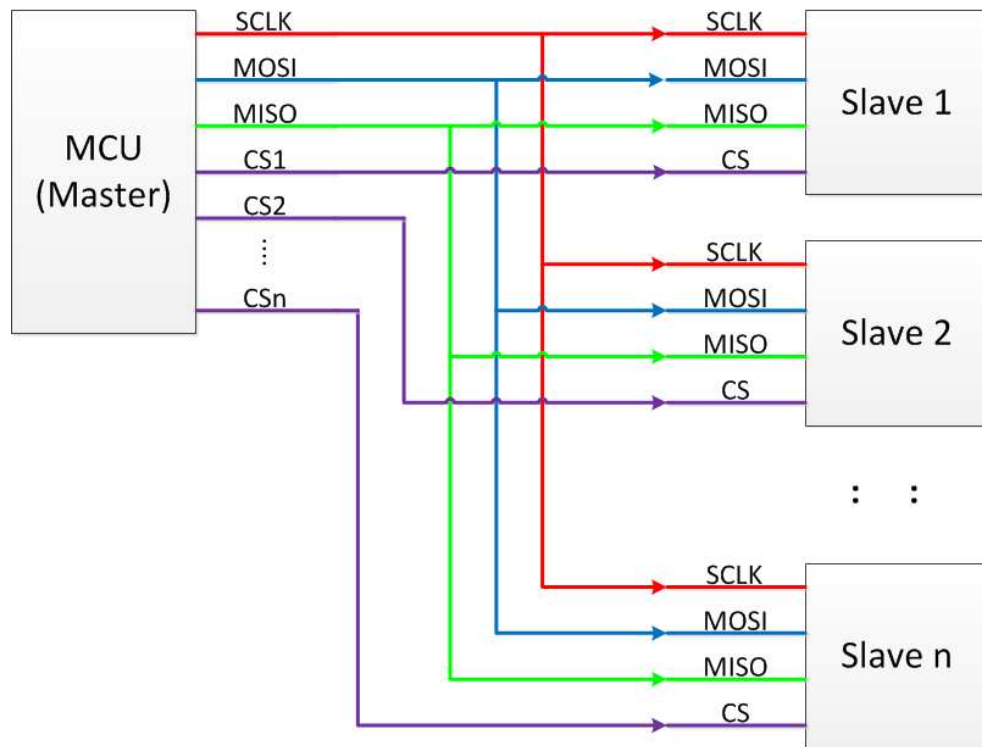
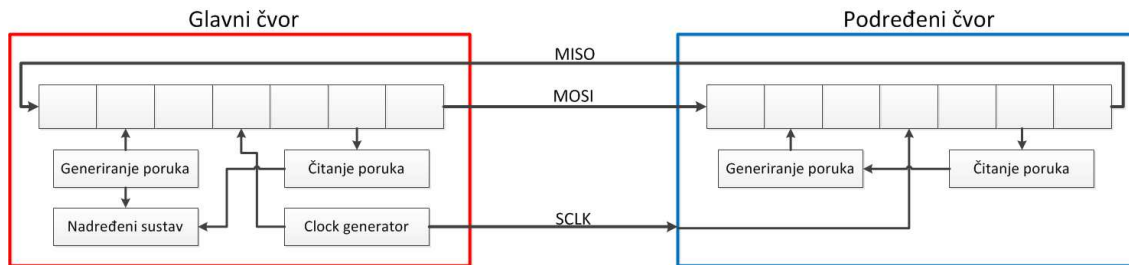
SPI (end. Serial Peripheral Interface) oblik komunikacije je vrlo često rješenje za brzi prijenos podataka u embedded sustavima. To je sinkroni oblik komunikacije razvijen od strane tvrtke Motorola koji omogućuje komunikaciju u Full-duplex modu. Osnovni logički signali koji tvore *SPI* sabirnicu su:

- *SCLK* - (eng. Serial Clock) služi kao signal za ostvarivanje sinkrone komunikacije kojim upravlja glavni čvor
- *MISO* - (eng. Master In Slave Out) podatkovni signal za slanje informacija glavnom čvoru
- *MOSI* - (eng. Master Out Slave In) podatkovni signal za slanje informacija podređenom čvoru

Na *SPI* sabirnici nalazi se jedan glavni čvor i više podređenih. Svaki podređeni čvor posjeduje ulaz zvan *CS* (eng. Chip Select) koji služi kako bi glavni čvor odredio sa kojim podređenim čvorom trenutno komunicira. Nedostatak ovog principa je taj što za svaki dodatan podređeni čvor potrebno dodijeliti dodatan digitalni izlazni signal na glavnom čvoru, koji služi za odabir komuniciranja sa određenim podređenim čvorom. Ovaj nedostatak je moguće izbjeći korištenjem drugih konfiguracija povezivanja o kojima neće biti riječ u ovom radu. Tipično povezivanje jednog glavnog čvora i podređenih čvorova na *SPI* sabirnicu je prikazano na Slici 3.7.

Princip rada *SPI* komunikacije temelji se na korištenju pomičnih registara. Odbir podređenog čvora za komunikaciju sa glavnim čvorom izvodi se postavljanjem signala *CS* na nisku razinu. Tada podređeni čvor prisluškuje sabirnicu. Ako promatramo *SPI* konfiguraciju sa jednim glavnim i jednim podređenim čvorom tada svaki čvor možemo promatrati kao pomični registar tipične duljine 8 bita. Izgled takve komunikacije intuitivno je prikazan na Slici 3.8. Ulaz pomičnog registra podređenog čvora spojen je na izlaz pomičnog registra glavnog čvora. Nakon što glavni čvor upiše podatak u svoj pomični registar tada se pomoću *SCLK* linije na svaki pozitivni brid signala ta vrijednost prenosi u pomični registar podređenog čvora, dok se registar glavnog čvora puni sa registrom podređenog čvora. Nakon što je upisana vrijednost prešla u podređeni čvor, ista se koristi te mijenja kako bi glavni čvor mogao preuzeti novu vrijednost. Tipične brzine komuniciranja preko *SPI* komunikacije kreću se od 1 do 100 [MHz].

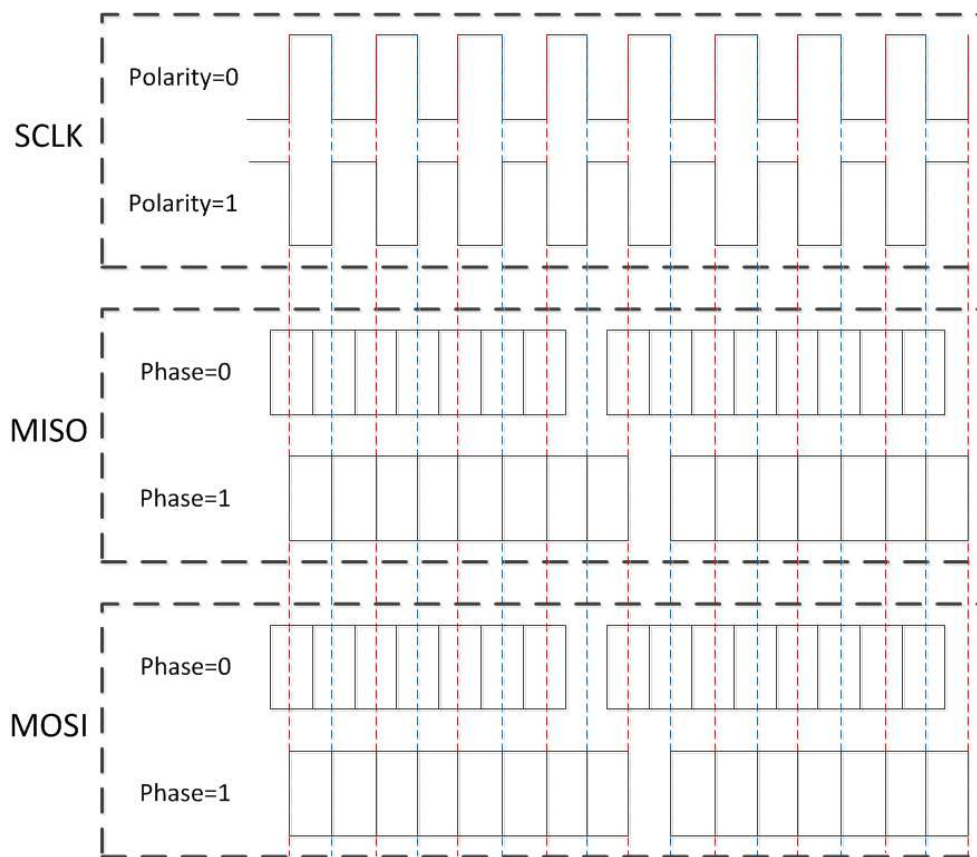
Principijelan način rada *SPI* komunikacije je poprilično jednostavan. Kod implementacije na fizičkom sloju potrebno je voditi računa o dodatnim specifikacijama. Tako je potrebno definirati parametre *Polarity* i *Phase* pri *SPI* konfiguraciji. Parametar *Polarity* (hrv. polaritet) definira polaritet signala *SCLK*. Parametar *Phase* (hrv. faza) definira trenutak uzimanja uzorka signala. Ukoliko je $Phase = 0$ tada se uzorak signala uzima u trenutku pozitivnog brida *SCLK* signala dok se u trenutku negativnog brida odvija pomicanje pomičnog registra. Za obrnuti slučaj $Phase = 1$

Slika 3.7. Standardno povezivanje čvorova na *SPI* sabirniciSlika 3.8. Način rada *SPI* komunikacije

uzorkujemo u trenutku negativnog brida *SCLK* signala dok se pomicanje pomičnog registra odvija na prvi sljedeći pozitivni brid. Pravilan odabir ovih parametara je nužan za funkcioniranje *SPI* komunikacije. Za svaki korišteni podređeni čvor potrebno je znati koji odabir parametara *Polarity* i *Phase* podržavaju. Ovisnost signala *SPI* komunikacije o odabiru parametara *Polarity* i *Phase* prikazana je na Slici 3.9.

Kao prednosti *SPI* komunikacije mogu se istaknuti sljedeće karakteristike:

- Full-duplex komunikacija
- Visoke brzine
- Jednostavna hardwareska realizacija



Slika 3.9. Ovisnost signala *SPI* komunikacije o odabiru parametara *Polarity* i *Phase*

- Jednosmjerni signali omogućuju jednostavno galvansku izolaciju
- Velika zastupljenost *SPI* perifernih jedinica u današnjim integriranim krugovima

dok ako nedostatke možemo nabrojati:

- Potrebno više veza te posebni digitalni izlaz za svaki podređeni čvor za razliku od I^2C komunikacije
- Nepostojanje potvrde primitka poruke
- Nepostojanje provjere greške slanja
- Podržava samo jedan glavni čvor
- Bez formalnog standarda sa mnogo varijacija

Implementacija *SPI* komunikacije je dodatno pojednostavljena korištenjem periferne jedinice mikrokontrolera *LPC1343*. Ova periferna jedinica omogućuje jednostavno slanje i primanje poruka uz maksimalno oslobodjenja mikrokontrolerskih resursa i opisana je u Poglavlju 3.2.4 zajedno sa ostvarenom programskom podrškom.

3.2. Programska podrška za korištene periferne jedinice

U ovom poglavlju ukratko će se opisati korištene periferne jedinice dostupne na mikrokontroleru *LPC1343* kao i napravljena programska podrška. Neke od korištenih perifernih jedinica su:

3.2.1. *GPIO* jedinica

GPIO jedinica služi za podešavanje ulazno-izlaznih pinova mikrokontrolera. Svi ulazno-izlazni pinovi na mikrokontroleru podijeljeni su u 4 PORT skupine od 0 do 3. Svaki pin ima svoj dodijeljeni PORT. Dostupne su mnoge mogućnosti podešavanja kao:

- Definiranje funkcije (*GPIO*, Analogni ulaz, timer ulaz/izlaz itd.)
- Definiranje smjera (ulaz/izlaz)
- Definiranje stanja (visoko/nisko)
- Čitanje stanja pina (visoko/nisko)
- Postavljanje i konfiguriranje prekida (brid, razina)
- Postavljanje pull-up/down otpornika
- Uključivanje histereze ulaznog pina

Principijelna shema rada *GPIO* jedinice prikazana je na Slici 3.10. Bez ulaženja u problematiku izvedbe prikazati će se napisana programska podrška za upravljanje ulazno-izlaznim pinovima na mikrokontroleru.

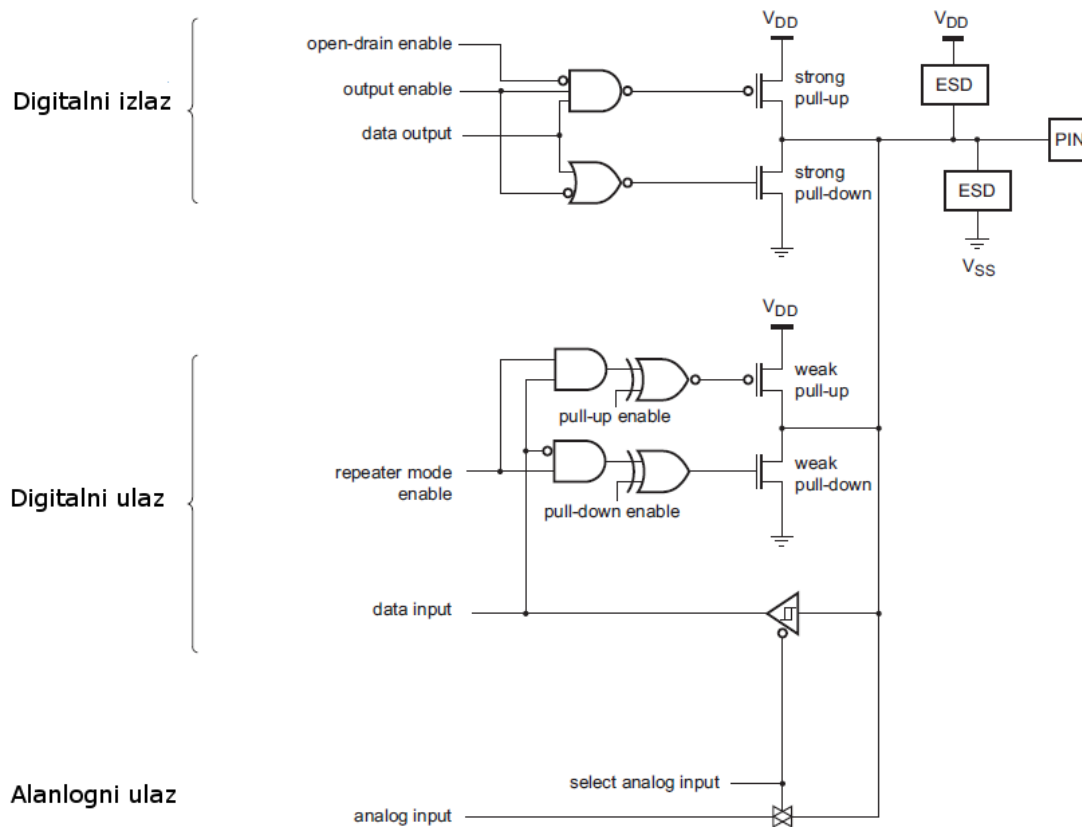
```
void GPIOSetDir( uint32_t portNum, uint32_t bitPosi, uint32_t dir );
```

Funkcija koja definira pin (*bitPosi*) na portu (*portNum*) kao digitalni ulaz (*Dir* = 0) ili digitalni izlaz (*Dir* = 1). Pri tome je potrebno voditi računa da odabrani pin nije prije toga pridjeljen drugoj perifernoj jedinici

```
void GPIOSetValue( uint32_t portNum, uint32_t bitPosi, uint32_t bitVal );
```

Ukoliko je pin definiran sa *portNum* i *bitPosi* konfiguriran kao digitalni izlaz tada je pomoću vrijednosti parametra *bitVal* moguće postaviti njegovo stanje. Ukoliko pin nije konfiguriran kao digitalni izlaz ova funkcije neće imati efekta.

```
uint32_t GPIOCheckValue ( uint32_t portNum, uint32_t bitPosi );
```

Slika 3.10. Shema rada *GPIO* jedinice

Ukoliko je pin definiran sa *portNum* i *bitPosi* konfiguriran kao digitalni ulaz ili izlaz tada je moguće saznati njegovo logičko stanje pomoću izlaza ove funkcije. Ukoliko je na odabranom pinu visoka logička razina, funkcija vraća vrijednost 1 dok u suprotnom slučaju vraća vrijednost 0.

```
uint32_t GPIOSetPullUp ( uint32_t portNum, uint32_t bitPosi );
uint32_t GPIOSetPullDown( uint32_t portNum, uint32_t bitPosi );
uint32_t GPIODisablePull( uint32_t portNum, uint32_t bitPosi );
```

Funkcije za postavljanje ili micanje pull-up ili pull-down otpornika na pin konfiguriran kao digitalni ulaz.

```
void GPIOSetInterrupt ( uint32_t portNum, uint32_t bitPosi, uint32_t sense ←
, uint32_t single, uint32_t event );
void GPIOIntEnable ( uint32_t portNum, uint32_t bitPosi );
void GPIOIntDisable ( uint32_t portNum, uint32_t bitPosi );
void GPIOIntClear ( uint32_t portNum, uint32_t bitPosi );
uint32_t GPIOIntStatus ( uint32_t portNum, uint32_t bitPosi );
```

Funkcija *GPIOSetInterrupt* postavlja generiranje prekida na određeni pin. Parametar *Sense* definira reakciju na stanje (*Sense = 1*) ili brid (*Sense =*

0). Parametar *Single* definira reakciju na samo jedan brid (*Single* = 0) ili na dva brida (*Single* = 1) dok parametar *Event* definira na koju logičku razinu odnosno brid se generira prekid. Ostale funkcije služe sa omogućavanje, onemogućavanje, prihvaćanje i čitanje stanja prekida.

3.2.2. Analogno digitalni pretvornik

Na korištenom mikrokontroleru nalazi se 10 bitni analogno-digitalni pretvornik multipleksiran preko 8 izlaza. Modul omogućuje uzorkovanje u definiranim vremenskim intervalima ili uzorkovanje na zahtjev. Tipično vrijeme potrebno za dobivanje 10 bitne vrijednosti mjerenja iznosi 2.44 [μ s]. Kako bi se pojednostavilo čitanje, za svaki analogni ulaz dodijeljen je poseban registar u kojemu se čuva vrijednost zadnje konverzije na tom kanalu.

Ova periferna jedinica posjeduje mnoge dodatne mogućnosti koje nisu potrebne pri radu senzorske stanice. Kako se za naše potrebe mjerenja izvode na zahtjev senzorskog modula u dugačkim vremenskim razmacima, izrađena programska podrška uključuje funkciju za inicijalizaciju analognog ulaza i funkciju koja vraća rezultat pretvorbe sa proizvoljnog analognog ulaza. Korištene funkcije glase:

```
void ADCInit( uint32_t ADC_Clk );
uint32_t ADCRead( uint8_t channelNum );
```

unutar funkcije *ADCInit* definirano je koji pinovi se koriste kao analogni ulazi, dok sa parametrom *ADC_Clk* definira frekvencija uzorkovanja. Funkcija *ADCRead* vraća 10 bitnu integer vrijednost konverzije na kanalu *channelNum* čija vrijednost mora biti unutar granica 0 do 7.

3.2.3. 16 i 32 bitni timeri

Mikrokontroler posjeduje dva 32 bitna timera i dva 16 bitna timera. Timeri imaju identično ponašanje, a jedina razlika je u veličini registara brojača i registra za skaliranje. Neke od mogućnosti ovih perifernih jedinica su mjerenje vremena, generiranje PWM signala, mjerenje vanjskih impulsa itd. Princip rada timera je brojanje impulsa oscilatora i uspoređivanje sa predpodešenom vrijednosti u tako zvanom *Match* registru. Korisnik može u tom slučaju odabrati zaustavljanje brojača, generiranje prekida ili ponovno brojanje. Kako bi se mogle podesiti veće vrijednosti omogućeno je postavljanje skalirajuće vrijednosti od 16 ili 32 bita kako bi se efektivno povećala vrijednost upisana u *Match* registar U senzorskoj stanici timeri se koriste za generiranje pauze u mili i mikro sekundama, za mjerenje dužih vremenskih perioda u minutama. Zadaće za svaki timer su sljedeće:

- Prvi 32 bitni timer - Ostala potrebna mjerenja vremena (LCD, GPS itd.)
- Drugi 32 bitni timer - Mjerenje vremena za prikupljanje podataka

- Prvi 16 bitni timer - Generiranje pauza u [μs]
- Drugi 16 bitni timer - Generiranje pauza u [ms]

Napisane su sljedeće funkcije za upravljanje radom timera:

- ```
void init_timer16(uint8_t timer_num, uint32_t timerInterval);
void init_timer32(uint8_t timer_num, uint32_t timerInterval);
```

Služe za podešavanje rada 16 i 32 bitnih timera. Broj timera definira se parametrom *timer\_num* = 0, 1 dok se vrijednost koja se upisuje u *Match* registar podešava parametrom *timerInterval*. Dodatna podešenja kao faktor skaliranja i način generiranja prekida podešava se unutar funkcije u ovisnosti o zadaći korištenog timera.

- ```
void enable_timer32(uint8_t timer_num); void enable_timer16(uint8_t ←
timer_num);
void disable_timer32(uint8_t timer_num); void disable_timer16(uint8_t ←
timer_num);
```

Nakon inicijalizacije potrebno je omogućiti rad timera pozivom *enable* funkcija. U ovisnosti o odabranim postavkama 32 bitni timeri krenuti će brojati impulse i pri slaganju trenutnih impulsa sa *Match* registrom pomnoženim sa skalirajućim faktorom generirati će se prekid unutar kojega će se provesti potrebe radnje. Neke radnje su: Gašenje LCD ekrana, slanje GPS podataka korisniku, pokretanje prikupljanja podataka itd. 16 bitni timeri se ne koriste u modu generiranja prekida već samo služe za stvaranje kratkih pauza u intervalima od 1 mili ili mikro sekundu.

- ```
void delay16Ms(uint32_t delayInMs);
void delay16us(uint32_t delayInus);
```

Ove dvije funkcije koriste se za stvaranje pauza u malim vremenskim intervalima. Njihova je funkcija u emulaciji UART komunikacije sa GPS-om ili pri komunikaciji sa LCD ekranom. Pauze je također potrebno generirati nakon dovođenja napajanja na senzore prije pokušaja pristupanja njihovim registrima.

### 3.2.4. *UART*, *I<sup>2</sup>C* i *SSP* periferna jedinica

Osnovne informacije o načinu rada *UART*, *I<sup>2</sup>C* i *SPI* komunikacije su objašnjene u Poglavlju 3.1. Za sva tri načina komunikacije dostupne su periferne jedinice na korištenom mikrokontroleru. U ovom dijelu ukratko će se opisati razvijene funkcije za ostvarivanje komunikacije. Za ostvarivanje slanja i primanja podataka preko *UART* komunikacije napisane su sljedeće funkcije:

- ```
void UARTInit(uint32_t Baudrate);
```

Funkcija služi za inicijalizaciju *UART* komunikacije brzinom prijenosa podataka definiranu parametrom *Baudrate*. Predpostavlja se da se koristi 8 podatkovnih bitova i jedan stop bit bez kontrole prometa. U ovoj funkciji inicijalizira se i generiranje prekida nakon svakog primljenog podatka. Identificiranje primljenih podataka objašnjeno je u sklopu ostvarivanja programske podrške za XBee-PRO modul objašnjene u Poglavlju 6.1.

- ```
void UARTSend(uint8_t *BufferPtr, uint32_t Length);
```

Funkcija šalje poruku preko *UART* jedinice definiranu nizom byte-ova *BufferPtr* duljine *Length*. Podaci se šalju byte po byte tako što se puni *Tx* registar i započinje slanje.

Funkcije za ostvarivanje *I<sup>2</sup>C* komunikacije glase:

- ```
uint32_t i2cInit( uint32_t I2cMode )
```

Funkcija za inicijalizaciju dodjeljuje linijama *SDA* i *SCL* odgovarajuće ulazno-izlazne pinove i definira mikrokontroler kao *Master* odnosno glavni uređaj na *I²C* sabirnici. Također se podešava brzina prijenosa od 400 [kHz]. Postavlja se generiranje prekida unutar kojeg se obrađuju reakcije na različite događaje kao primitak potvrde (*ACK*), ne primitak potvrde (*NACK*), generiranje *STOP* uvjeta itd.

- ```
uint32_t i2cEngine(void)
```

Za realizaciju komunikacije definirana su dva globalna buffera za slanje (*I2CMasterBuffer*) i primanje podataka (*I2CSlaveBuffer*). Također se koriste i globalne varijable *I2CReadLength* i *I2CWriteLength* za definiranje koliko se podataka želi upisati i koliko se podataka želi pročitati. Za ostvarivanje komunikacije potrebno je popuniti *I2CMasterBuffer* sa odgovarajućom adresom podređenog sustava i podacima koji se žele upisati. Nakon upisa broja podataka koji se upisuju i broja podataka koji se žele pročitati,

pokretanjem funkcije *i2cEngine(void)* odvija se kompletna komunikacija od generiranja *START* uvjeta pa do *STOP* uvjeta. Ukoliko je primljen odgovor nakon izvršavanja komunikacije, on se nalazi u varijabli *I2CSlaveBuffer*.

Razmjena poruka *SSP* protokolom ostvarena je pomoću sljedećih funkcija:

- ```
void SSPInit (sspClockPolarity_t polarity , sspClockPhase_t phase);
```

Inicijalizira se periferna jedinica sa postavkama *Polarity* i *Phase* te brzinom prijenosa.

- ```
void SSPSend (uint8_t *buf, uint32_t length);
```

Funkcija šalje poruku preko *SPI* protokola duljine određene parametrom *Length*. Prije slanja poruke potrebno je osigurati da je *CS* pin od modula sa kojim se komunicira postavljen na logičku nulu. Nakon slanja poruke, odgovor se može pročitati koristeći sljedeću funkciju.

- ```
void SSPReceive (uint8_t *buf, uint32_t length);
```

Kao što je objašnjeno u pregledu *SPI* komunikacije, za svaki poslani byte na *MOSI* glavni čvor prima jedan byte na *MISO*. Primanje se izvodi slanjem *Dummy* poruka i izvlačenjem podataka iz pomičnog registra podređenog čvora.

4. Sustav prikupljanja podataka

4.1. Senzori

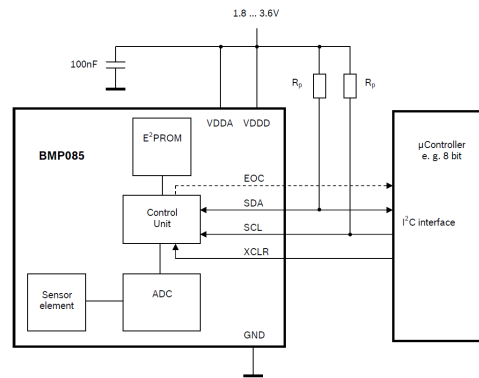
Najbitniji dio senzorske stanice su senzori za prikupljanje podataka. U nastavku opisana su sva korištenja rješenja, teorijska podloga i princip rada.

4.1.1. Senzor tlaka - BMP085

Za potrebe nadzora poljoprivrednih veličina potrebno je kvalitetno mjeriti atmosferski tlak. Ukoliko dobro mjerimo tlak, tada se on može koristiti za stvaranje kratkoročne vremenske prognoze koja je od velike važnosti za kvalitetno upravljanje primjerice zalijevanjem površina. Na osnovi tlaka također je moguće odrediti trenutnu visinu na kojoj se senzorska stanica nalazi. Principi dobivanja ovih veličina prikazani su u Poglavljima 4.3.2 i 4.3.1. Jedno od vrlo popularnih rješenja za brzo i jednostavno mjerenje atmosferskog tlaka predstavlja se senzor *BMP085* [14] razvijen od tvrtke Bosh.

Ovaj senzor predstavlja kompletno rješenje malih dimenzija za mjerenje temperature i tlaka zraka uz kompenzaciju mjerenja. Ovaj senzor prikazan je na Slici 4.1. Mjerenje tlaka zasnovano je na piezo-otporničkoj tehnologiji koja se odlikuje velikom preciznošću i linearnošću. Uz uključen mikroprocesor, analogno-digitalni pretvornik te I^2C komunikaciju, znatno je pojednostavljeno prihvaćanje podataka. Pojednostavljeni blokovski prikaz sa načinom spajanja ovog senzora na nadređeni sustav prikazan je na Slici 4.2. Ovaj senzor sadrži internu EEPROM memoriju u kojoj se nalaze tvornički izmjereni koeficijenti dostupni korisniku, kako bi se dodatna kompenzacija mogla izvršiti na nadređenom sustavu.

Karakteristike senzora *BMP085* prikazane su u Tablici 4.1. Na kućištu senzora dostupna su dva dodatna pina zvana *EOC* i *XCLR*. Pomoću pina *EOC* (eng. End Of Conversion) senzor javlja nadređenom sustavu da je pretvorba tlaka i temperature završila, te da su podaci spremni za preuzimanje. Na taj način moguće je maksimalno ubrzati prikupljanje podataka. Pomoću signala *XCLR* nadređeni sustav može u bilo kojem trenutku narediti ponovno pokretanje senzora ukoliko je došlo do greške ili prestanka komunikacije. Adresa senzora na I^2C sabirnici postavljena je

Slika 4.1. Izgled senzora tlaka *BMP085*Slika 4.2. Shema spajanja *BMP* senzora na mikrokontroler

na vrijednost $0b1110111x$ odnosno $0xEE$ za pisanje te $0xEF$ za čitanje. Komunikacija sa senzorom će se odvijati u *Fast Mode*-u rada na brzini od $400 [kHz]$ zbog kompatibilnosti sa ostalim uređajima sa *I²C* komunikacijom.

Tablica 4.1. Karakteristika senzora tlaka *BMP085*

		Pokazatelji		
		Min.	Tip.	Max.
Radna temp. [$^{\circ}C$]	Normalna preciznost	-40		85
	Maks. preciznost	0		65
Napon [V]		1.62	2.5	3.6
Struja [μA]	Ultra low-power		3	
	Standard		5	
	High resolution		7	
	Ultra high res.		12	
Max. Struja [μA]	Pri pretvorbi		650	1000
Struja mirovanja [μA]	Na $25 [^{\circ}C]$		0.1	
Brzina komunikacije [MHz]	<i>I²C</i>			3.4
Vrijeme pretvorbe temp. [ms]	Standard		3	4.5
	Ultra low-power		3	4.5
	Standard		5	7.5
	High resolution		9	13.5
Vrijeme pretvorbe tlaka [ms]	Ultra high res.		17	25.5
	700 ... 1100 [hPa]	-2.5	± 1	2.5
	300 ... 700 [hPa]	-3	± 1	3
Preciznost tlaka [hPa]	300 ... 1100 [hPa]	-4	± 1.5	4
	Tlak [hPa]		0.01	
	Temp. [$^{\circ}C$]		0.1	
Rezolucija	300 ... 1100 [hPa]	-4	± 1.5	4

Kao zanimljive informacije za BMP senzor predstavljaju se kompenzacijski koeficijenti sa ukupno 176 bita, te rezultati pretvorbe temperature i tlaka čija se veličina kreće od 16 do 19 bita. Memorijske lokacije za pristup informacijama i upravljanje pretvorbom senzora biti će prikazane na slici tijekom radnji za prikupljanje podataka sa senzora. Prikupljanje podataka započinje čitanjem 11 kompenzacijskih koeficijenata: $AC1$, $AC2$, $AC3$, $AC4$, $AC5$, $AC6$, $B1$, $B2$, MB , MC , MD od kojih svaki sadrži 16 bita. Vrijednosti ovih koeficijenata su konstantne i potrebno ih je samo jednom pročitati i spremiti u memoriju nadređenog sustava. Koeficijente nije potrebno svaki put čitati, već ih je samo potrebno koristiti u svakom novom mjerenju. Kada nadređeni sustav želi saznati trenutnu temperaturu i tlak šalje se poruka za pretvorbu i čitanje temperature. Zatim se šalje poruka za pretvorbu i čitanje tlaka gdje korisnik može odabrati preciznost. Senzor omogućuje preciznosti prikazane u Tablici 4.2. Nakon dohvaćanja svih zanimljivih podataka sa senzora potrebno je izvršiti proračun za dobivanje kompenziranih vrijednosti temperature i tlaka.

Tablica 4.2. Odabir preciznosti mjerenja tlaka

Preciznost	I^2C kod	Vr. pretvorbe [ms]	Broj uzoraka	Šum [hPa]	oss
Ultra low-power	0x34+oss«6	4.5	1	0.06	0
Standard	0x34+oss«6	7.5	2	0.05	1
High	0x34+oss«6	13.5	4	0.04	2
Ultra high	0x34+oss«6	25.5	8	0.03	3

Postupak dobivanja kalibriranih vrijednosti temperature i tlaka provodi se prema sljedećim jednadžbama:

$$X1 = \frac{(UT - AC6) \cdot AC5}{2^{15}} \quad (4.1)$$

$$X2 = \frac{MC \cdot 2^{11}}{X1 + MD} \quad (4.2)$$

$$T = \frac{B5 + 8}{2^4} \quad (4.3)$$

gdje su UT nekompenzirana vrijednost temperature a $AC6$, $AC5$, MC , MD kompenzacijski koeficijenti pročitani iz memorije senzora. Dijeljenjem dobivenog parametra UT sa koeficijentom 10 dobiva se trenutna temperatura u $^{\circ}C$. Postupak

dobivanja kompenzirane vrijednosti tlaka je malo kompliciraniji i glasi:

$$B6 = B5 - 4000 \quad (4.4)$$

$$X1 = \frac{B2 \cdot B6^2}{2^{11} \cdot 2^{12}} \quad (4.5)$$

$$X2 = \frac{AC2 \cdot B6}{2^{11}} \quad (4.6)$$

$$X3 = X1 + X2 \quad (4.7)$$

$$B3 = \frac{(AC1 \cdot 4 + X3) \ll oss + 2}{4} \quad (4.8)$$

gdje parametar *oss* predstavlja odabranu opciju preciznosti koji je prikazan u Tablici 4.2.

$$X1 = \frac{AC3 \cdot B6}{2^{13}} \quad (4.9)$$

$$X2 = \frac{B1 \cdot B6^2}{2^{16} \cdot 2^{12}} \quad (4.10)$$

$$X3 = \frac{X1 + X2 + 2}{2^2} \quad (4.11)$$

$$B4 = AC4 \frac{X3 + 32768}{2^{16}} \quad (4.12)$$

$$B7 = (UP - B3) \cdot (5000 \gg\gg oss) \quad (4.13)$$

$$p1 = \frac{2 \cdot B7}{B4} \quad (4.14)$$

$$X1 = \frac{p1^2}{2^{16}} \quad (4.15)$$

$$X1 = \frac{3038 \cdot X1}{2^{16}} \quad (4.16)$$

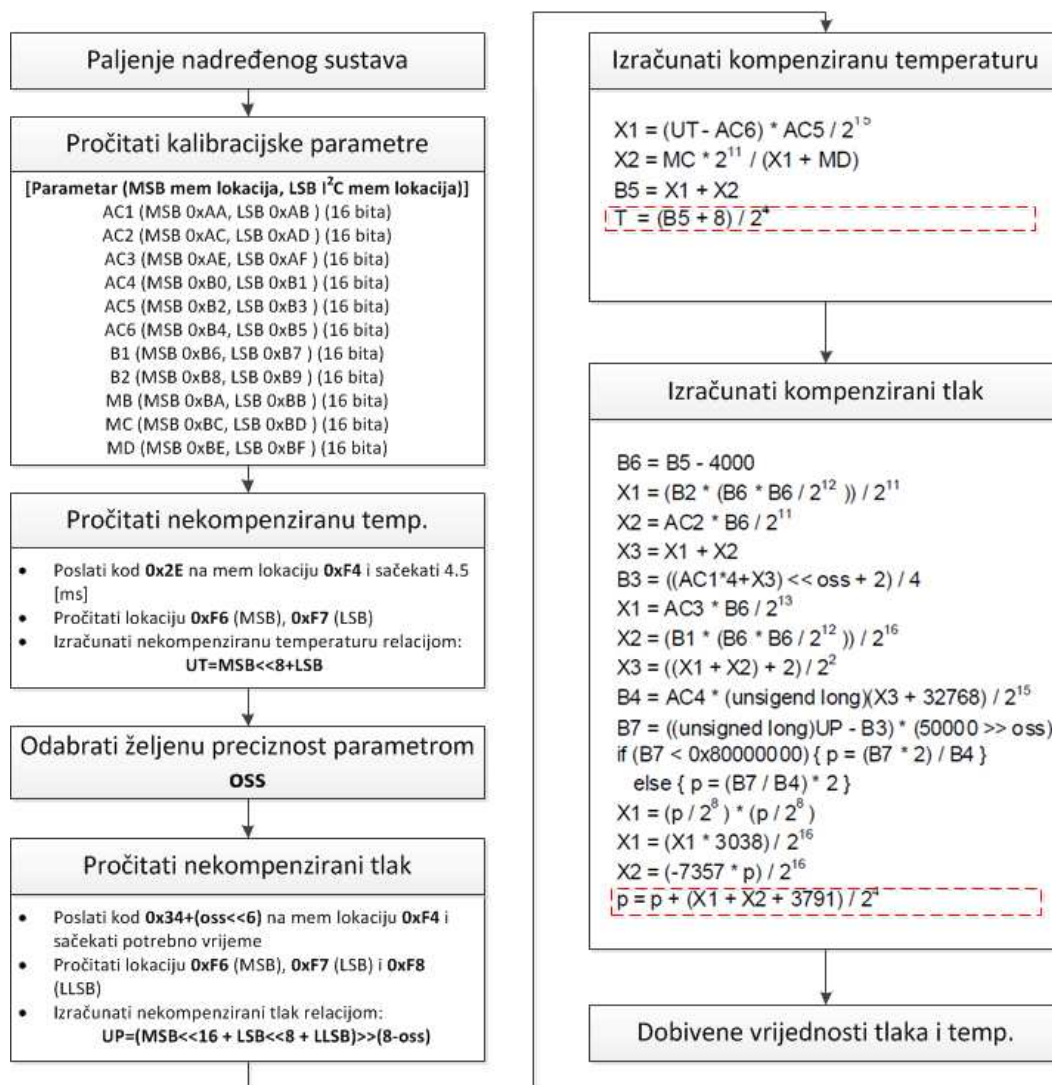
$$X2 = \frac{-7357 \cdot p1}{2^{16}} \quad (4.17)$$

U konačnici kompenzirana vrijednost tlaka u jedinici [*Pa*] dobiva se relacijom:

$$p = p1 + \frac{X1 + X2 + 3791}{2^4} \quad (4.18)$$

Kompletan tok radnji potreban za dobivanje kompenziranih vrijednosti temperature i tlaka prilagođen obradi na mikrokontroleru prikazan je na Slici 4.3.

Za potrebe dobivanja mjerenja sa senzora napisane su sljedeće funkcije za mikrokontroler *LPC1343*. Prije pokretanja mikrokontrolera izvodi se funkcija:

Slika 4.3. Tijek radnji za dobivanje mjerenja senzora *BMP085*

```
BMPSensorCoefficients CalculateCoefficientsBMP ();
```

koja u strukturu *BMPSensorCoefficients* sprema kalibracijske koeficijente za *BMP* senzor. Prije poziva ove funkcije potrebno je inicijalizirati *I²C* komunikaciju i dovesti napajanje na senzor. Druga funkcija za primanje podataka sa senzora glasi:

```
SensorReturn ReturnReadingsFromBMP(BMPSensorCoefficients Coefficients);
```

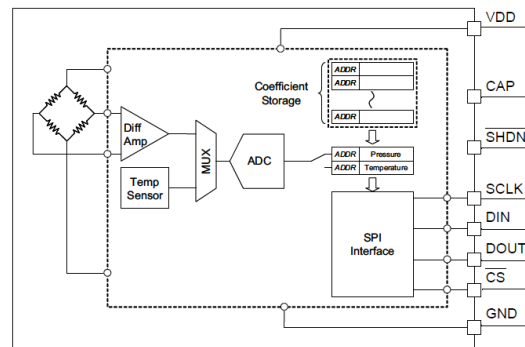
koja prima prethodno dobivenu strukturu kalibracijskih podataka te vraća kalibrirane vrijednosti temperature i tlaka zraka u strukturi *SensorReturn*. Sve potrebne informacije o pozicijama pinova mikrokontrolera spojenih na senzor te korištena *I²C* adresa, su dostupne u header datoteci programskog koda kako bi se eventualne izmjene lakše provodile.

4.1.2. Senzor tlaka - MPL115A1

Prije opisan senzor tlaka zraka *BMP085* je visoko precizan senzor sa iznimno visokom rezolucijom. Na raspolaganju je bio samo jedan senzor *BMP085* stoga su izabrana još dva senzora niže preciznosti kako bi se koristili na vanjskim senzorskim sondama. Značenje senzorskih sondi je opisano u uvodu. Iz tog razloga odabrani su jednostavniji i manji digitalni senzori tlaka zraka i temperature *MPL115A1* [15] prikazan na Slici 4.4. Ovi senzori su low-cost, small-size rješenja i kao takvi su idealno rješenje za korištenje na senzorskim sondama. Senzor se sastoji od upravljačkog kruga se *SPI* komunikacijom, sensorom tlaka i temperature, internom memorijom te analogno-digitalnim pretvornikom sa diferencijalnim operacijskim pojačalom. Pojednostavljena blokovska shema prikazana je na Slici 4.5.



Slika 4.4. Izgled senzora tlaka *MPL115A1*



Slika 4.5. Blokovska shema senzora *MPL115A1*

Dostupni pinovi na kućištu senzora kao i njihove funkcije glase:

1. *Vdd* - Napon napajanja senzora od 2.3 do 5.5 [V]
2. *CAP* - Spajanje vanjskog kondenzatora za filtriranje vrijednosti 1 [μF]
3. *GND* - Spajanje na zemlju
4. *SHDN* - Digitalni pin za gašenje rada senzora
5. *CS* - *Chip Select* pin *SPI* protokola
6. *DOUT* - *MISO* pin *SPI* protokola
7. *DIN* - *MOSI* pin *SPI* protokola
8. *SCLK* - *SCLK* pin *SPI* protokola

Senzor posjeduje *SHDN* pin koji se u ovom slučaju ne koristi te je fiksiran na visoku razinu. Ušteda energije će se provoditi tako da će se regulirati dovod napajanja cijeloj sondi samo onda kada se vrši mjerenje. Ostale karakteristike ovog senzora prikazane su u Tablici 4.3.

Tablica 4.3. Karakteristike senzora *MPL115A1*

Parametar	Min.	Tip.	Max.
Napon [V]	2.375	3.3	5.5
Struja - Ugašeno [μA]			1
Struja - Mjerenje [μA]		5	
Struja - Čekanje [μA]		3.5	10
Raspon [kPa]	50		115
Rezolucija [kPa]		0.15	
Preciznost [kPa]			± 1
Vr. mjerenja [ms]		1.6	3
Vr. pokretanja [ms]		3	5

Senzor *MPL* radi na sličnome principu kao i prije objašnjeni senzor *BMP*. Unutar memorije nalazi se 8 kompenzacijskih koeficijenata od 16 bita svaki. Ti koeficijenti se ne mijenjaju i dovoljno je da ih nadređeni sustav pročita i spremi u memoriju samo jednom. Pri izračunu kompenzirane vrijednosti tlaka zraka koriste se 10-bitne vrijednosti temperature i tlaka sa analogno-digitalnog pretvornika, kao i dobiveni kompenzacijski koeficijenti. Čitanje i pisanje na senzor provodi se pomoću *SPI* komunikacijskog protokola te razmjenom kodnih riječi. Kako bi nadređeni sustav pročitao sadržaj memorijske lokacije na senzoru potrebno je poslati sljedeću kodnu riječ oblika: 1XXXXXX0 gdje XXXXXX označava 6 bitnu adresu koja se želi pročitati. Pisanje na memorijske lokacije se izvodi kodnom riječi: 0XXXXXX0. Sve adrese su prikazane u Tablici 4.4.

Tablica 4.4. Memorijske lokacije senzora *MPL115A1* sa potrebnim vrijednostima

Adresa	Ime parametra	Opis parametra
0x00	PadcMSB	10-bit ADC vrijednost tlaka viši byte
0x01	PadcLSB	10-bit ADC vrijednost tlaka niži byte
0x02	TadcMSB	10-bit ADC vrijednost temp. viši byte
0x03	TadcLSB	10-bit ADC vrijednost temp. niži byte
0x04	a0MSB	a_0 viši byte
0x05	a0LSB	a_0 niži byte
0x06	b1MSB	b_1 viši byte
0x07	b1LSB	b_1 niži byte
0x08	b2MSB	b_2 viši byte
0x09	b2LSB	b_2 niži byte
0x0A	c12MSB	c_{12} viši byte
0x0B	c12LSB	c_{12} niži byte
0x12	CONVERT	Počni pretvorbu tlaka i temp.

Kako bi se dobile kompenzirane veličine apsolutnog atmosferskog tlaka koristimo

se sljedećim relacijama:

$$X1 = c_{12} \cdot T_{adc} \quad (4.19)$$

$$A1 = b_1 + X1 \quad (4.20)$$

$$X2 = A1 \cdot P_{adc} \quad (4.21)$$

$$Y1 = a_0 + X2 \quad (4.22)$$

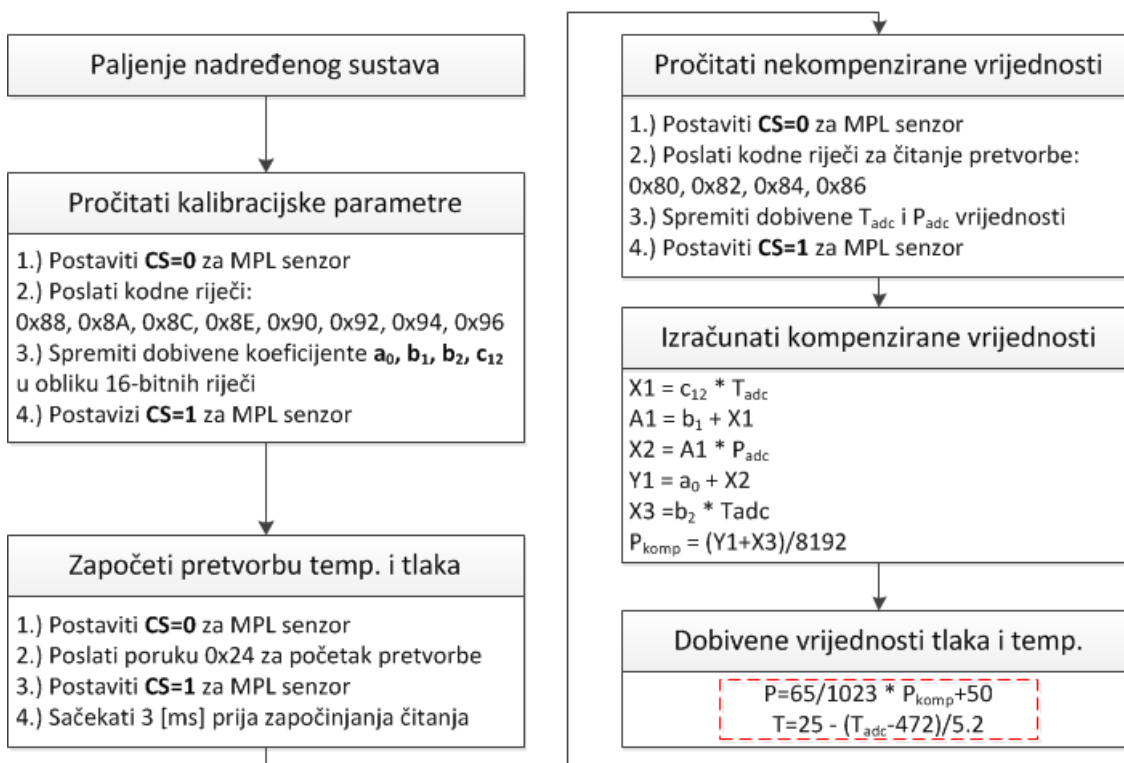
$$X3 = b_2 \cdot T_{adc} \quad (4.23)$$

$$P_{komp} = \frac{Y1 + X3}{8192} \quad (4.24)$$

$$P = \frac{65}{1023} \cdot P_{komp} + 50 \quad (4.25)$$

$$T = 25 - \frac{T_{adc} - 472}{5.2} \quad (4.26)$$

Vidimo kako je proračun puno jednostavniji od senzora *BMP* ali negativna strana je gubitak rezolucije od čak dodatnih 8 bit-ova. Kompletan dijagram tijeka dobivanja mjerenja sa senzora *MPL115A1* prikazan je na Slici 4.6.



Slika 4.6. Tijek radnji za dobivanje mjerenja senzora *MPL115A1*

Za potrebe dobivanja mjerenja sa senzora napisane su sljedeće funkcije za mikrokontroler *LPC1343*. Prije pokretanja mikrokontrolera izvodi se funkcija:

```
MPLSensorCoefficients CalculateCoefficientsMPL ();
```

koja u strukturu *MPLSensorCoefficients* sprema kalibracijske koeficijente za *MPL* senzor. Prije poziva ove funkcije potrebno je inicijalizirati *SPI* komunikaciju i dovesti napajanje na senzor. Druga funkcija za primanje podataka sa senzora glasi:

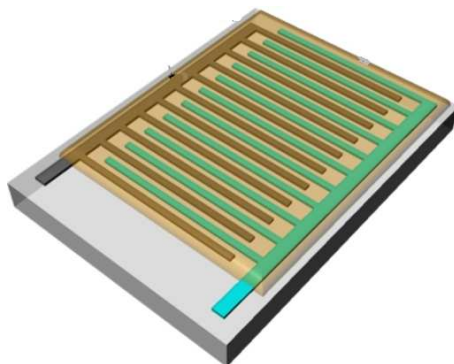
```
SensorReturn ReturnReadingsFromMPL (MPLSensorCoefficients Coefficients);
```

koja prima prethodno dobivenu strukturu kalibracijskih podataka te vraća kalibrirane vrijednosti temperature i tlaka zraka u strukturi *SensorReturn*. Sve potrebne informacije o pozicijama *CS* pina za senzor su dostupne u header datoteci programskog koda kako bi se eventualne izmjene lakše provodile.

4.1.3. Senzor vlažnosti zraka - *DHT11*

Kao bitnu veličinu za potrebe nadziranja poljoprivrednih zemljišta predstavlja se relativna vlažnost zraka. U mnogim radovima [16], [17], [18] prikazana je veza uspješnosti pojedine kulture u ovisnosti o relativnoj vlažnosti. Iz tog razloga potrebno je odabrati senzor koji omogućuje pouzdano i jednostavno mjerenje vlažnosti zraka. Općenito senzori relativne vlažnosti koriste industrijski dokazane, temperaturno ovisne polimere (eng. Thermoset polymer), troslojnu kapacitetnu konstrukciju, platinske elektrode, te silikonski sloj koji služi za kondicioniranje izlaznog signala.

Postoji nekoliko načina mjerenja vlažnosti zraka koje su opisane u [19]. Jedna od metoda mjerenja vlažnosti zraka je korištenje otporničkih pretvornika vlage. Takav način mjerenja realizira se korištenjem higroskopskih materijala kao litijev klorid - *LiCl*, polistiren ili aluminijev oksid *Al₂O₃*. Takvi materijali imaju sposobnost upijanja vlage iz zraka pri čemu bitno mijenjaju svoj električni otpor. Kako bi se registrirao postotak vlage u zraku izrađuju se vodljive površine od higroskopskog materijala koje imaju izgled prikazan na Slici 4.7.



Slika 4.7. Aktivna površina za detekciju vlažnosti zraka

Takva pločica izrađena je od aluminijske. Zatim se na pločicu nanosi se aluminijski oksid preko kojeg se postavlja tanki sloj visoko vodljivog materijala. Pri prisustvu vlage u zraku, vodena para se upija u higroskopni materijal (u ovom slučaju Al_2O_3), te se otpor smanjuje sa većom koncentracijom vlage u zraku. Promjenu otpora je moguće izmjeriti koristeći analogno-digitalni pretvornik dok se aktivna površina nalazi u mosnom spoju. Kako bi se izbjegla pojava elektrolize pri djelovanju vlage te oksidacija korištenih materijala, poželjno je provoditi mjerenje koristeći izmjeničnu struju, kako bi se povećalo trajanje senzora.

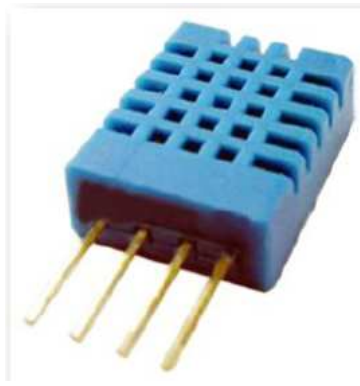
Kao jedno gotovo, jednostavno i jeftino rješenje koje radi na prije opisanom principu mjerenja vlage promjenom otpora aktivne površine, predstavlja se senzor *DHT11* [20] prikazan na Slici 4.8. Ovaj senzor predstavlja kompletno rješenje za jednostavno mjerenje vlažnosti zraka uz mjerenje temperature u svrhu kompenzacije mjerenja vlažnosti. Ovaj senzor sastoji se od 8-bitnog mikrokontrolera sa analogno-digitalnim pretvornikom te pločice sa polimerskim slojem za mjerenje promjene vlažnosti, te analogno-otporničkog senzora temperature. Velika prednost ovog senzora je ta, što se unutarnji mikrokontroler brine za prikupljanje podataka te njihovu obradu koja uključuje:

- Mjerenje promjene otpora senzora vlage
- Mjerenje promjene otpora senzora temperature
- Proračun kompenzacije mjerenja vlage u ovisnosti o trenutnoj temperaturi
- Pretvorba vrijednosti vlage i temperature u jedinice $^{\circ}C$ i [%]
- Ostvarivanje komunikacije sa nadređenim sustavom i ostvarivanje prijenosa podataka na zahtjev

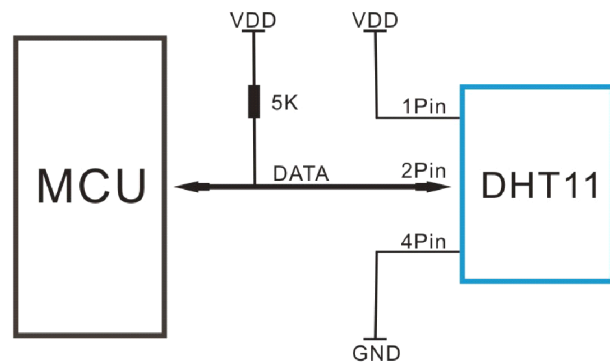
Senzor *DHT11* sa nadređenim sustavom komunicira preko vrlo jednostavne serijske single-wire komunikacije. Način spajanja sa nadređenim sustavom prikazan je na Slici 4.9. Dvosmjerna komunikacija se ostvaruje preko jedne žice te je koristeći pull-up otpornik od $5 [k\Omega]$ osigurano da u trenutku kada su pinovi na oba uređaja konfigurirani kao open drain ulazi, tada je stanje podatkovne linije na visokoj razini. U Tablici 4.5 prikazane su specifikacije korištenog senzora. Komunikacijski protokol sa *DHT11* senzorom je opisan u nastavku.

Jedna razmjena podataka sastoji se od zahtjeva nadređenog sustava i odgovor senzora vlage i u prosjeku traje oko $4 [ms]$. Senzor odgovara sa ukupno 40 bitova podataka u skupinama po 8 bita:

1. 8 bitna cjelobrojna vrijednost vlažnosti
2. 8 bitna decimalna vrijednost vlažnosti
3. 8 bitna cjelobrojna vrijednost temperature



Slika 4.8. Izgled senzora vlage DHT 11



Slika 4.9. Shema spajanja DHT senzora na mikrokontroler

Tablica 4.5. Karakteristika senzora vlage *DHT11*

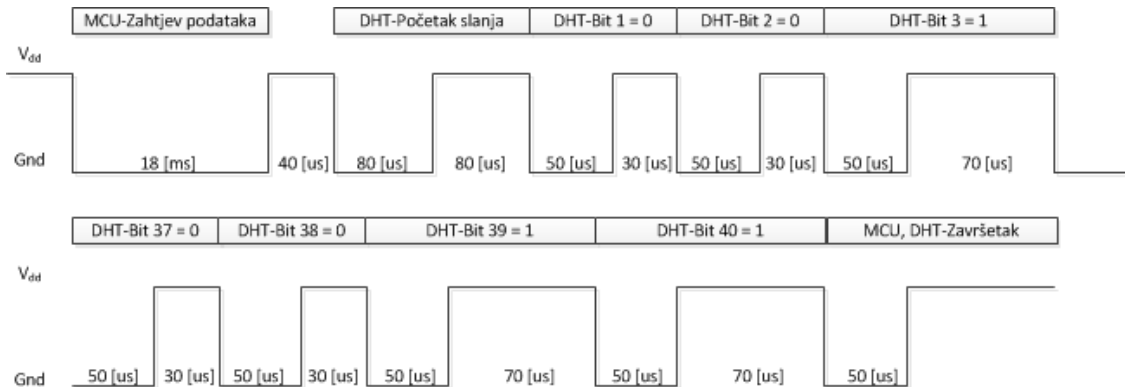
		Pokazatelji			
		Uvjet	Min.	Tip	Max.
Općenito	Napajanje [V]		3	5	5.5
	Potrošnja [mA]	Srednja	0.2	0.5	1
	Vrijeme uzorkovanja [s]		1		
Vlažnost	Rezolucija			1%	
	Ponovljivost			±1%	
	Preciznost	25°C		±4%	
	Raspon mjerenja	25°C	20%		90%
	Brzina odziva [s]	63% na 25°C	6	10	15
	Dugotrajna stabilnost			±1 $\frac{\%}{godinu}$	
Temp.	Histereza			±1%	
	Rezolucija		1°C	1°C	1°C
	Ponovljivost			±1°C	
	Preciznost		±1°C		±2°C
	Raspon mjerenja		0°C		50°C
	Brzina odziva [s]	63%	6		30

4. 8 bitna decimalna vrijednost temperature

5. Zaštita u obliku checksum-a ($CS = \text{bit1} + \text{bit2} + \text{bit3} + \text{bit4}$)

Senzor *DHT11* posjeduje 8 bitne analogno-digitalne pretvornike za mjerenje vlažnosti i temperature, stoga su primljene decimalne vrijednosti redovito jednake nula. Komunikacija započinje kada nadređeni sustav preuzima sabirnicu i postavlja ju na nisku razinu. Nisku razinu potrebno je držati najmanje 18 [ms] kako bi senzor detektirao zahtjev. Zatim nadređeni sustav prekonfigurira izlaz u ulaz kako bi senzor mogao preuzeti sabirnicu. U trenutku preuzimanja sabirnice, zbog spojenog pull-up otpornika, sabirnica poprima visoku razinu. Preuzimanje traje u prosjeku 30 [μs].

Zatim senzor postavlja sabirnicu na nisku razinu u trajanju od 80 $[\mu s]$ te ponovno postavlja visoku razinu 80 $[\mu s]$. Ta radnja signalizira nadređenom sustavu početak slanja podataka od 40 bita. Svaki bit započinje kada senzor drži sabirnicu na niskoj razini 50 $[\mu s]$. Nakon toga potrebno je mjeriti trajanje visoke razine. Ukoliko je visoka razina trajala 28 $[\mu s]$ tada se radi o logičkoj nuli, dok ako je visoka razina trajala 70 $[\mu s]$ tada se radi o logičkoj jedinici. Nakon prijenosa svih 40 bitova slanje se završava niskom razinom od 50 $[\mu s]$ te oslobađanjem sabirnice. Intuitivan prikaz razmjene informacija sa senzorom prikazan je na Slici 4.10. Dodatne informacije o senzoru *DHT11* dostupne su u [21].



Slika 4.10. Primjer zahtjeva za podacima nadređenog sustava *MCU* i primanje informacija sa senzora *DHT*

Ovaj protokol je implementiran na mikrokontroleru korištenjem mjerenja vremena u mikro i mili sekundama pomoću 16-bitnih timera 0 i 1 te uz pomoć funkcija za upravljanje GPIO jedinicom. Napisana je funkcija za dobivanje mjerenja temperature, i trenutne vlažnosti sa *DHT11* senzora. Funkcija nema ulaze dok je izlaz struktura nazvana *SensorReturn* u kojoj se nakon poziva funkcije nalaze tražene vrijednosti. Omogućena je detekcija greške u slučaju ne primanja odgovora od senzora i dojava greške se također zapisuje u izlaznu strukturu *SensorReturn*. Definicija funkcije glasi:

```
SensorReturn ReturnReadingsFromDHT ( ) ;
```

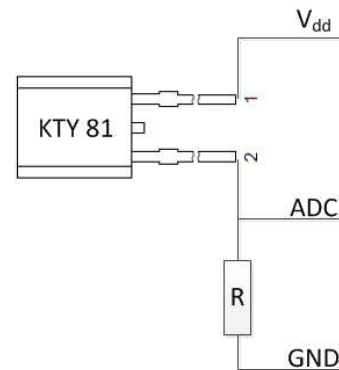
Cijela komunikacija je vrlo jednostavno realizirana pomoću samo jedne funkcije, dok je lokacija pina na koji je spojen senzor definirana u header datotekama kako bi se omogućila jednostavna izmjena.

4.1.4. Senzor temperature - KTY 81

Kako bi se mjerila temperatura tla korišten je analogni senzor temperature *KTY81* [22]. Detekcija promjene otpora senzora registrira se pomoću 10 bitnog analognog-digitalnog pretvornika na mikrokontroleru. Provedena je analiza i teorijska podloga za korištenje ovog senzora sa mikrokontrolerom i stoga će se provedena analiza opisati u ovome radu. Silikonski temperaturni senzor *KTY81* prikazan na Slici 4.11 proizvod je tvrtke NXP kao rješenje za mjerenje temperature u sustavima automatskog upravljanja. Njegova karakteristika je dana u dokumentaciji te ima relativno linearno ponašanje u rasponu najčešćih temperatura. Mjerenje promjene otpora senzora realizirano je pomoću serijskog spoja senzora i otpornika poznate vrijednosti te digitalno-analognog pretvornika na mikrokontroleru *LPC1343*. Kako bi se dobilo što kvalitetnije mjerenje nastojalo se slijediti preporuke dostupne u [23].



Slika 4.11. Izgled senzora temperature KTY 81



Slika 4.12. Shema spajanja KTY 81 senzora

Mikrokontroler nema mogućnost proizvoljnog definiranja granice mjerenja napona. To predstavlja dodatan problem u maksimizaciji rezolucije mjerenja promjene otpora u zanimljivom području temperatura. Iz tog razloga provedena je analiza kvalitete mjerenja temperature koristeći ovaj senzor, u programskom alatu Matlab. Analogno-digitalni pretvornik mjeri vrijednosti od napona uzemljenja do napona napajanja mikrokontrolera odnosno 3.3 [V]. Kako je na senzorskom sustavu dostupan napon od 5 [V], napon V_{dd} je upravo postavljen na taj iznos. Time smo efektivno povećali razolučivost mjerenja. Pri tome je potrebno osigurati da napon na poznatom otporniku R u najgorem očekivanom slučaju ne prijeđe vrijednost od 3.3 [V]. To se može osigurati tako da definiramo maksimalnu i minimalnu granicu temperature koju možemo očekivati.

Otpor senzora raste sa porastom temperature te će napon na AD kanalu biti najveći za slučaj kada je otpor senzora najmanji, odnosno kada je temperatura minimalna. Ako definiramo da je minimalna temperatura koju možemo očekivati jednaka -20 [°C] (što predstavlja siguran zaključak za podneblje) tada odabirom otpora $R = 1000$ [Ω] osiguravamo da napon na AD kanalu neće prijeći 3.0 [V].

Prema tome dobivanje trenutnog otpora senzora R_s na osnovi 10 bitne vrijednosti AD pretvornika A_{adc} dobivamo prema relaciji:

$$R_s = \frac{V_{dd} - \frac{3.3A_{adc}}{1024}}{\frac{3.3A_{adc}}{1024}} R \quad (4.27)$$

odnosno:

$$R_s = 1000 \frac{5120 - 3.3A_{adc}}{3.3A_{adc}} \quad (4.28)$$

Veza između trenutnog otpora senzora i temperature dana je u dokumentaciji senzora sa tipičnim te minimalnim i maksimalnim granicama. Vidljivo je da je senzor najtočniji unutar granica -20 do 50 $^{\circ}C$. Vrijednosti iz dokumentacije senzora prikazane su u Tablici 4.6. Kako bi se izvršila analiza, prethodno spomenuti podaci

Tablica 4.6. Otporno-temperaturna karakteristika senzora vlage
KTY81

Temp [$^{\circ}C$]	Min	Tip	Max	Greška	-	Temp [$^{\circ}C$]	Min	Tip	Max	Greška
-55	480	495	510	± 3.02		40	1120	1134	1148	± 1.64
-50	505	520	535	± 2.92		50	1204	1221	1238	± 1.91
-40	558	573	588	± 2.74		60	1291	1312	1332	± 2.19
-30	615	630	645	± 2.55		70	1382	1406	1430	± 2.49
-20	676	690	705	± 2.35		80	1477	1505	1533	± 2.8
-10	741	755	769	± 2.14		90	1574	1607	1639	± 3.12
0	810	823	836	± 1.91		100	1676	1713	1750	± 3.46
10	883	895	907	± 1.67		110	1780	1823	1865	± 3.83
20	960	971	982	± 1.41		120	1886	1934	1982	± 4.33
25	1000	1010	1020	± 1.27		125	1938	1989	2041	± 4.66
30	1039	1050	1062	± 1.39		130	1989	2044	2098	± 5.07

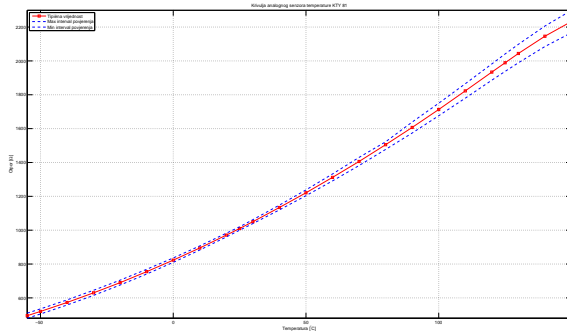
su prebačeni u Matlab. Dobivena karakteristika senzora temperature sa intervalima povjerenja prikazana je na Slici 4.13. Vidljivo je da krivulja doista ima približno linearnu karakteristiku na području interesantnih temperatura. Kako bi bilo vrlo nepraktično zasebno interpolirati krivulje kroz sve poznate točke, u svrhu izvođenja proračuna na mikrokontroleru nađena je linearna krivulja koja prema metodi najmanjih kvadrata ima najbolje slaganje sa stvarnom krivuljom. Usporedni prikaz stvarne krivulje te linearne aproksimacije prikazan je na Slici 4.14.

Dobivena krivulja ima sljedeću jednadžbu:

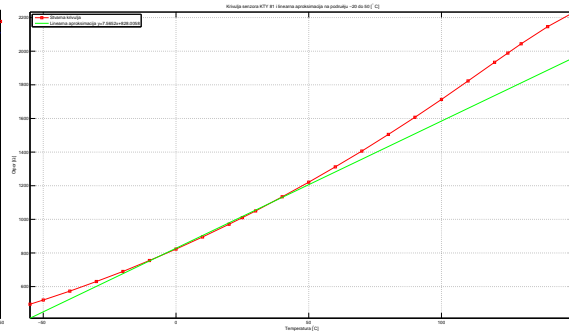
$$R_s = 7.5652T + 828.0058 \quad (4.29)$$

Inverz potreban za pravilno pretvaranje AD vrijednosti u temperaturu glasi:

$$T = \frac{R_s - 828.0058}{7.5652} \quad (4.30)$$



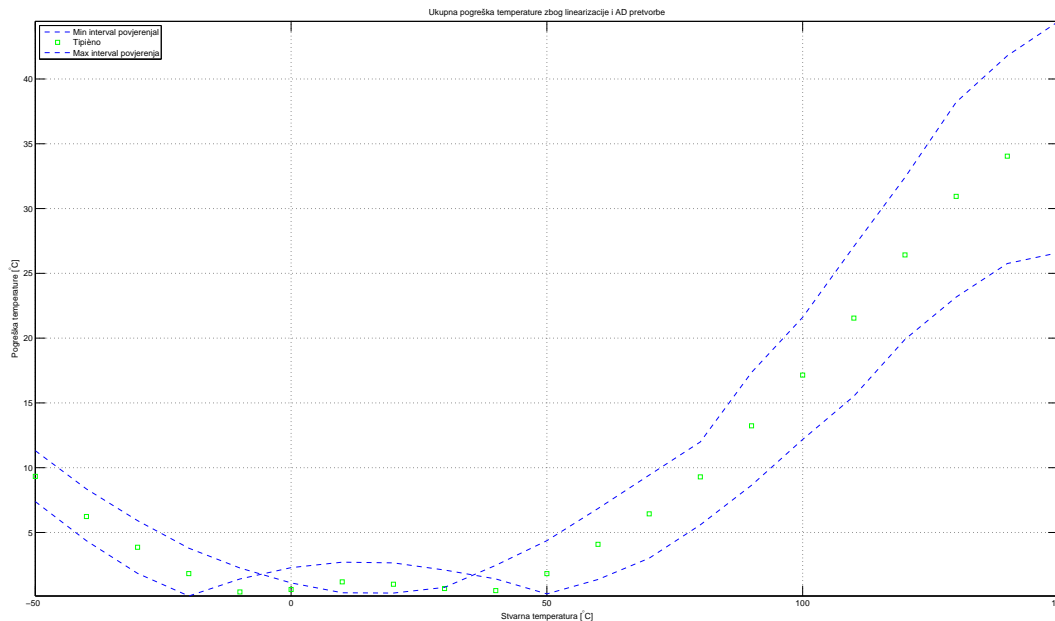
Slika 4.13. Krivulja analognog senzora temperature KTY 81



Slika 4.14. Krivulja senzora KTY 81 i linearna aproksimacija na području -20 do 50 [°C]

$$T = \frac{1}{7.5652} \cdot \frac{1024V_{dd}R}{3.3A_{adc}} - R + 828.0058 \quad (4.31)$$

Provedena je analiza utjecaja AD pretvorbe i linearizacije krivulje na konačnu pogrešku mjerenja. Utjecaj linearizacije i analognog digitalne pretvorbe na pogrešku temperature vidljiva je na Slici 4.15. Jasno je vidljivo da je pogreška minimalna i gotovo je jednaka neodređenosti samog senzora na temperaturama između -20 i 50 [°C]. Ukupna pogreška u tom intervalu ne prelazi 2 [°C] te time potvrđujemo uspješnost dizajna. Izvan intervala pogreška drastično raste no te temperature nisu za očekivati u normalnom režimu rada. Za mjerenje vrijednosti temperature koristeći senzor *KTY81* izrađene su potrebne funkcije za mikrokontroler *LPC1343*.



Slika 4.15. Ukupna pogreška mjerenja temperature zbog linearizacije i AD pretvorbe senzora KTY 81

4.1.5. Senzor osvjetljenja - BPW 40

Dodatna bitna veličina za promatranje je osvjetljenje površine sunčevom, odnosno vidljivom svjetlošću. Opće poznata stvar je ovisnost uspješnosti neke kulture o vremenu osvjetljenosti i stoga je istu bitno promatrati. Kao mjera intenziteta svjetlosti koristi se SI jedinica *lux*. *Lux* se može definirati kao lumen po metru kvadratnom. Mjera *lumen* govori o količini vidljive svjetlosti dok *lux* govori o intenzitetu svjetlosti koja djeluje na određenu površinu. Kako bi se ove veličine jasnije razumjele, prikazane su tipične situacije te njihov intenzitet svjetlosti:

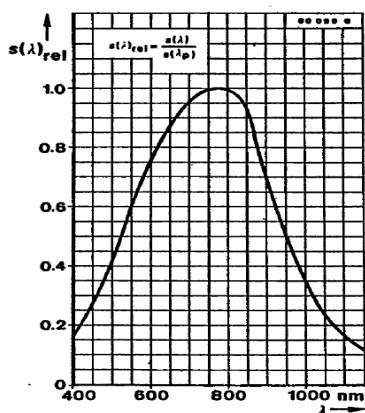
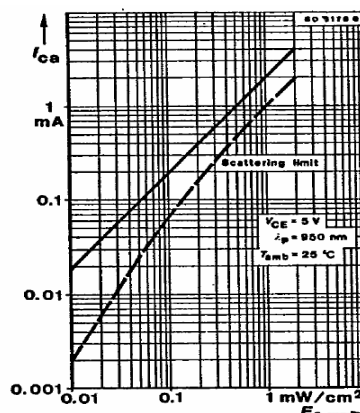
1. 0.002 lux → Jaka mjesečina i zvjezdano noćno nebo
2. 0.27-1.0 lux → Puni mjesec i čisto noćno nebo
3. 3.4 lux → Sumrak
4. 50 lux → Prosječno osvjetljena dnevna soba
5. 80 lux → Prosječno osvjetljeni radni prostor
6. 320-500 lux → Dobro osvjetljeni ured
7. 400 lux → Kasna zora
8. 10000-25000 lux → Dan bez oblaka
9. 32000-130000 lux → Direktna sunčeva svjetlost

Kako bi mjerili intenzitet svjetlosti na senzorskoj stanici nameće se nekoliko popularnih rješenja. Kao low-cost rješenja često su korišteni foto-otpornici ili fotodiode. Primjer foto-otpornika je element *LDR07* prikazan na Slici 4.16 dok kao fotodiodu možemo navesti senzor *BPW40* prikazan na Slici 4.17. Ukoliko se koristi foto-otpornik potrebno je provoditi sličan postupak mjerenja promjene otpora kao kod mjerenja temperature sa *KTY* senzorom. Tu se ponovno javljaju već prije spomenuti problemi rezolucije mjerenja te pojava nelinearnosti zbog naponskog djelila. Ovaj problem se može izbjeći koristeći foto-diodu *BPW40* [24]. Prema karakteristikama fotodiode možemo primijetiti da je najosjetljivija na području valnih duljina od 600 do 900 [nm]. Spektralna osjetljivost same diode dostupna je u [24] te je prikazana na Slici 4.18.

To područje pokriva veliki dio vidljivog dijela spektra i stoga je ova dioda odličan izbor za naše potrebe. Ukoliko fotodiodu spojimo u seriju sa otpornikom R te na serijski spoj dovodimo napon, propuštena struja kroz fotodiodu će se mijenjati linearno sa osvjetljenjem. Pri tome je potrebno osigurati da fotodioda radi u području zapiranja. Promatranjem trenutnog napona na otporniku R možemo mjeriti struju te dobiti vezu trenutnog napona na otporniku i osvjetljenja fotodiode. Ova veza je dostupna iz dokumentacije fotodiode te ona iznosi približno $0.5 \left[\frac{\mu A cm^2}{mW} \right]$ za srednju valnu duljinu od $\lambda = 950$ [nm]. Krivulja promjene struje I_{CE} prikazana je

Slika 4.16. Fotootpornik *LDR07*Slika 4.17. Fotodiode *BPW40*

na Slici 4.19. Vidimo kako mjerna jedinica na ordinati glasi $[\frac{mW}{cm^2}]$ što predstavlja veličinu intenziteta zračenja na površinu. Pretvorba između ove dvije jedinice nije jednoznačna te ovisi o spektralnom sastavu same svjetlosti. Ukoliko se pretpostavi da fotodiodu osvjetljava monokromatska vidljiva svjetlost valne duljine $550 [nm]$ tada vrijedi relacija $1 [lux] = 1.464 \cdot 10^{-4} [\frac{mW}{cm^2}]$ odnosno $1 [\frac{mW}{cm^2}] = 6830 [lux]$. Nakon dobivanja veze promjene struje I_{CE} o osvjetljenju, mjerenje stvarnog osvjetljenja se vrlo jednostavno izvodi.

Slika 4.18. Spektralna osjetljivost fotodiode *BPW40*Slika 4.19. Promjena struje fotodiode *BPW40* u ovisnosti o intenzitetu svjetlosti

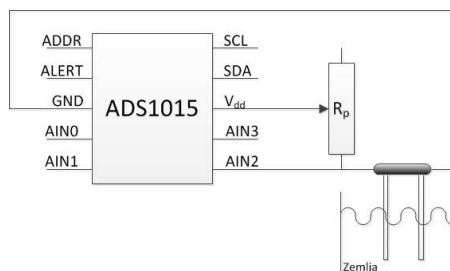
Odabir otpornika R bitan je za podešavanje područja mjerenja osvjetljenja jer o njegovom iznosu ovisi maksimalni iznos osvjetljenja koji će se moći mjeriti. Tada bez obzira na povećanje osvjetljenja neće doći do porasta struje, te će napon na otporniku biti maksimalan. Smanjenjem vrijednosti otpora R omogućujemo veći raspon mjerenja osvjetljenja ali povećavamo potrošnju. Iznos otpora R podešen je tako da se pokrije dovoljno široko područje prepoznavanja osvjetljenosti. Funkcija napisana za mikrokontroler *LPC1343* je vrlo jednostavna linearna relacija koja dohvaća trenutni napon na AD pretvorniku na koji je spojena dioda te vraća trenutnu osvjetljenost u jedinici *lux*. Pin na koji je spojena fotodiode je definiran u header datoteci.

4.1.6. Senzor vlažnosti tla na senzorskoj sondi

Senzori vlažnosti tla se koriste na senzorskim sondama dok je jedan izlaz dostupan i na samoj senzorskoj stanici. Razlog je taj što su senzorske sonde zamišljene da se postavljaju na tlo i zabadaju u zemlju kako bi se pravilo mjerila vlažnost i pH vrijednost. Glavna senzorska stanica je zamišljena na montiranje na više mjesto kako bi imala direktan pristup sunčevoj energiji, da bi se mjerilo osvjetljenje i da bi korisnik mogao pristupati podacima na licu mjesta preko LCD ekrana. Mjerenje vlažnosti tla provodi se na vrlo jednostavnom principu promjene otpora tla sa količinom vlage u njemu. Senzorska sonda za mjerenje vlažnosti tla sastoji se od dvije elektrode koje se zabadaju u zemlju na točno definiranoj međusobnoj udaljenosti od 1 [cm]. Primjer jednog sličnog izrađenog senzora dan je u [25]. Izgled elektroda prikazan je na Slici 4.20. Promjena otpora registrira se preko 12 bitnog analogno-digitalnog pretvornika *ADS1015* opisanog u Poglavlju 4.2.1 koji se nalazi na senzorskoj sondi dok se promjena otpora sonde za mjerenje vlažnosti tla spojene direktno na senzorsku stanicu mjeri pomoću 10 bitnog analogno-digitalnog pretvornika na mikrokontroleru.



Slika 4.20. Sonde za detekciju vlage tla



Slika 4.21. Način povezivanja sonde za mjerenje vlažnosti tla

Promjena otpora između elektroda ovisi o trenutnoj vlažnosti zemlje. AD pretvornik *ADS1050* posjeduje mogućnost podešavanja pojačanja za svaki od 4 kanala koja posjeduje. Zbog malih padova napona na senzorskoj sondi, pojačanje AD pretvornika postavljeno je na iznos od 2. Time se dobila visoka rezolucija mjerenja. Mjerenje vlažnosti tla u slučaju ove senzorske stanice se ne prikazuje u standardiziranoj jedinici već je podešavanje osjetljivosti omogućeno pomoću potencijometra montiranog na sondi. Stoga dobivena vrijednost vlažnosti tla ima subjektivan karakter te se može promatrati u obliku postotaka. Iznos od 100 [%] bi značilo "Jako vlažno" dok bi iznos od 0 [%] značilo "Jako suho". Ovakva informacija o vlazi zemlje je u većini slučajeva dovoljno dobra za korisnike koji poznaju problematiku. Konceptualni način spajanja dvaju elektroda na AD pretvornik *ADS1015* prikazan je na Slici 4.21.

4.1.7. Senzor i *AFE* rješenje za mjerenje pH vrijednosti - LMP01200

Veoma bitan podatak pri uzgoju određenih kultura je vrijednost kiselosti tla na kojemu se kultura uzgaja. Određene kulture biljaka bolje uspjevaju na podlogama sa točno određenom kiselošću kao što je opisano u [26], [27]. Za većinu kultura najbolja uspješnost javlja se u rasponu kiselosti tla od 5.5 do 7.0 pH. Pored primjena u poljoprivredi, kvalitetno mjerenje kiselosti odnosno popularnije *pH* vrijednosti jako je bitno u industrijskim procesima, farmaceutici te nadzoru okoliša. Otopina može posjedovati lužnato, kiselo ili neutralno svojstvo. PH vrijednost iskazuje količinu vodikovih iona H^+ koji se nalaze u promatranoj otopini u logaritamskom mjerilu. Ukoliko otopina posjeduje veliku koncentraciju vodikovih iona to je njezina kiselost veća. PH vrijednost se prikazuje vrijednostima u rasponu 0 do 14. Srednja vrijednost od 7 pH definira neutralnu točku između kiselosti i lužnatosti. Čista voda posjeduje svojstvo neutralnosti na 25 [°C] jer je koncentracija molekula OH^+ jednaka koncentraciji molekula OH^- . Vrijednosti pH unutar vrijednosti [0, 7] definiraju kiselu otopinu, dok vrijednosti u rasponu <7, 14] definiraju lužnatu otopinu. Neke kulture najbolje uspjevaju na tlu sa točno određenom kiselošću kao što je to prikazano u [27]. Ovdje možemo spomenuti neke primjere:

- pH 4.5 - 5.0 borovnica, brusnica, orhideja, azaleja
- pH 5.0 - 5.5 peršin, krumpir, slatki krumpir, kukuruz, proso, rotkvica
- pH 5.5 - 6.0 grah, prokulica, mrkva, kikiriki, jaglac
- pH 6.0 - 6.5 brokula, kupus, cvjetača, krastavac, grašak, bundeva, rajčice, repa
- pH 6.5 - 7.0 šparoga, celer, zelena salata, dinje, luk, pastrnjak, špinat,
- pH 7.1 - 8.0 lila

Vrlo je očito kako je održavanje potrebne vrijednosti kiselosti tla jako bitno za uspjeh određene kulture. Ukoliko korisnik primjeti odstupanje od definirane pH vrijednosti, senzorski sustav obavještava kako je potrebno poduzeti određene mjere. Jedna metoda povećanja kiselosti tla je korištenje limunske kiseline [28] koja velikom brzinom povećava pH vrijednost. Neke od metoda za smanjivanje pH vrijednosti su korištenje željeznih ili aluminijevih sulfata, te ostataka organskih tvari. Mjerenje pH vrijednosti tla može se provoditi na više načina kao: promatranjem teksture i boje tla, promatranjem vegetacije tla, korištenje jednokratnih indikatora kiselosti, korištenje elektroničkih sondi za mjerenje pH vrijednosti. Kao jedino izvedivo rješenje za korištenje na senzorskoj stanici predstavlja se korištenje električnih pH sondi za mjerenje kiselosti. Princip rada pH sondi objašnjen je u [29], [30] te će se zbog preglednosti spomenuti u nastavku. Mjerenje kiselosti provodi se uspoređivanjem potencijala promatrane otopine sa nepoznatom pH vrijednosti sa otopinom poznate referentne vrijednosti. PH metri pri tom pretvaraju razliku u naponu [V] između polu-ćelije s referentnom tekućinom i senzorske polu-ćelije u pH vrijednosti. Današnje elektrode najčešće su kombinacije takvih dviju polu-ćelija. Referentne polu-ćelije

sadrže vodič, (najčešće je to srebro presvučeno s srebrenim kloridom) koji je uronjen u otopinu s poznatim $[H^+]$. Potencijal između unutarnjeg vodiča i otopine s poznatim $[H^+]$ je konstantan, što daje stabilan referentni potencijal.

Senzorska polu-ćelija (mjerna polu-ćelija) napravljena je od nevodljivog staklenog (ili epoxy) cilindra zabrtvljene s vodljivom staklenom membranom. Kao i referentna polu-ćelija tako i senzorska polu-ćelija sadrži vodič koji je uronjen u puferiranu elektrolitnu otopinu, što osigurava konstantni napon na unutarnjoj strani staklene membrane i na vodiču. Kada se pH elektroda uroni u otopinu čija se pH vrijednost želi izmjeriti, stvara se potencijal na površini staklene membrane. Ako je nepoznata otopina neutralna, zbroj konstantnog napona unutarnje površine membrane i vodiča otprilike odgovara naponu na vanjskoj strani membrane i referentne polu-ćelije. To rezultira ukupnom razlikom potencijala od 0 [mV] i pH vrijednošću od 7. U kiseloj ili alkalnoj otopini napon vanjske površine membrane mijenja se proporcionalno promjeni koncentracije $[H^+]$. PH meter mjeri tu promjenu u potencijalu i određuje $[H^+]$ nepoznate otopine prema Nernstovoj jednažbi:

$$E = E^\circ + \frac{2.3RT}{nF} \log \frac{\text{nepoznati}[H^+]}{\text{poznati}[H^+]} \quad (4.32)$$

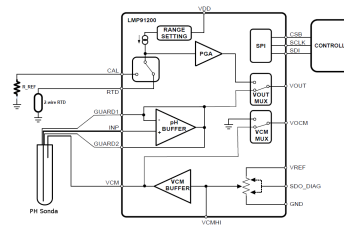
pri čemu je:

- E = ukupna razlika potencijala [mV]
- E° = referentni potencijal
- R = konstanta plina
- T = temperatura u Kelvinima
- n = broj elektrona
- F = Faradayeva konstanta
- H^+ = koncentracija iona vodika

Kako bi se pojednostavilo prikupljanje podataka sa pH sonde korišteno je single-chip rješenje LMP91200 [31] tvrtke Texas Instruments za mjerenje kiselosti otopina koji je prikazan na Slici 4.22. Ovakva rješenja nazivaju se *AFE* (end. Analog Front End) te se pomoću njih ostvaruju sve potrebe prilagodbe signala između različitih tipa senzora i analogno-digitalnog pretvornika na nadređenom sustavu. Ovo omogućuje jednostavnu integraciju senzorske sonde razvojnom inženjeru, jer je pomoću digitalne konfiguracije samog *AFE* čipa riješena sva prilagodba signala. Tvrtka Texas Instruments razvila je *AFE* rješenja za različite tipove senzora kao: pH senzore, senzore za detekciju plinova itd. Spomenuto rješenje je prilagođeno za senzore sa dvije elektrode i omogućuje svu funkcionalnost za registriranje promjene napona na sondi. Također omogućuje spajanje vanjskih analognih temperaturnih senzora te je time omogućena kompenzacija mjerenja kiselosti. Sva konfiguracija



Slika 4.22. AFE rješenje za mjerenje pH vrijednosti LMP91200



Slika 4.23. Povezivanje LMP91200 sa pH sondom i nadređenim sustavom

izvodi se preko *SPI* protokola. Pojednostavljena blokovska shema sa svim spojevima na senzore prikazana je na Slici 4.23.

Svi parametri i pojačanja vidljiva na Slici 4.23 su dostupna za podešavanje. Neke od dostupnih postavki su odabir mjerenja temperature na analognom izlazu, odabir temperaturne sonde ili preciznog otpornika za kompenzaciju pH mjerenja, te odabir stimulacijske struje za temperaturni senzor. Kvalitetno mjerenje temperature je iznimno bitno za dobivanje točnog mjerenja kiselosti tla, kao što je vidljivo u jednadžbi 4.32. LMP91200 omogućuje mjerenja temperature sa različitom preciznošću. Na ovoj senzorskoj stanici neće se koristiti mjerenje temperature pomoću analognog senzora, već će se zbog gotovog rješenja koristiti mjerenje sa senzora *KTY81*.

Izlaz pH sonde nalazi se unutar granica od ± 415 [mV] pri promjeni pH vrijednosti od 0 do 14 pri 25 [°C]. Kako se ne koristi diferencijalno mjerenje napona između izlaza senzora V_{out} i izlaza V_{ocm} potrebno je osigurati da izlazni napon V_{out} bude uvijek pozitivnog iznosa, odnosno da ima *bias*. Moguće je konfigurirati AFE da izlazni signal ima pomak za određeni faktor od napona dovedenog na pin V_{ref} . Ukoliko se na V_{ref} dovede 3.3 [V] te se koristi skaliranje faktorom $\frac{1}{8}$, tada će izlaz senzora u slučaju pH 0 iznositi približno 0 [V] te u slučaju pH 14 iznositi približno 0.83 [V]. Za neutralni pH izlaz bi trebao iznositi točno $\frac{V_{ref}}{8}$ odnosno 4.123 [V]. Izlaz LMP91200 AFE senzora je spojen na analogno-digitalni pretvornik ADS1015 koji koristi pojačanje iznosa 4 što omogućuje rezoluciju od 12 bita na području ± 1024 [mV]. Time se dobila iznimna preciznost mjerenja za područje svih pH vrijednosti. Izrađena je programska podrška za konfiguriranje LMP91200 te čitanje sa analogno-digitalnog pretvornika ADS1015. Napisane su sljedeće dvije funkcije za LPC1343 mikrokontroler:

```
void ConfigurePHAFE(uint8_t ProbeNumber);
float ReturnPHReadings(uint8_t ProbeNumber);
```

Ulazni parametar $uint8_t$ *ProbeNumber* zahtjeva broj sonde kojoj se želi pristupiti. Potrebno je osigurati da je prije pokretanja ovih funkcija sonda spojena i pod naponom. Funkcija *ReturnPHReadings(...)* vraća trenutnu pH vrijednost tla u decimalnom floating point zapisu.

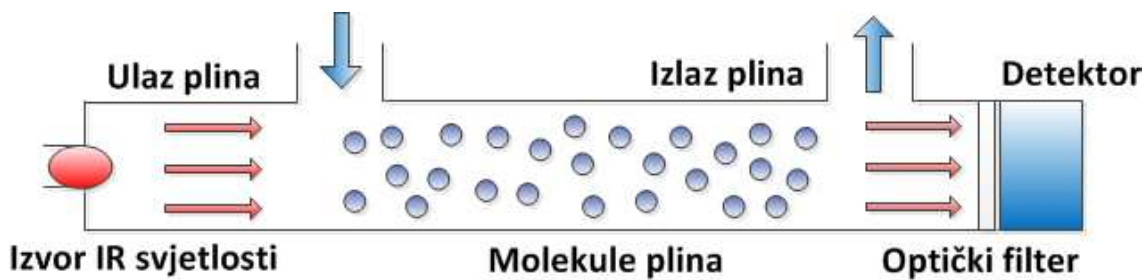
4.1.8. Senzor i *AFE* rješenje za mjerenje koncentracije CO_2 - *LMP91050*

Kvaliteta zraka je jako bitna veličina za mjerenje u poljoprivredne svrhe. Veliku važnost za rast biljaka predstavlja koncentracija plina CO_2 u zraku. Poznato je kako biljke koriste plin CO_2 kako bi vršile postupak fotosinteze. Rađena su mnoga istraživanja o utjecaju koncentracije plina CO_2 na rast biljaka. Prilikom istraživanja utjecaja koncentracije plina CO_2 na rast soje [32] uočeno je da su jedinke uzgajane u većim koncentracijama plina CO_2 , brže rasle, povećale površinu listova te povećali udio suhe tvari u listovima za čak 66 [%]. Dodatni primjeri dostupni su u radovima [33], [34].

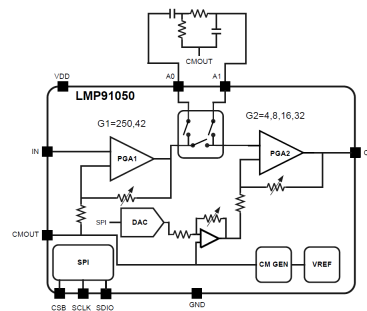
Rezultati ovih istraživanja daju opravdan razlog za potrebu kvalitetnog mjerenja i upravljanja razinom plina CO_2 . Kao popularan način mjerenja koncentracije određenog plina u zraku koristi se metoda *NDIR* detekcije (eng. Non-Dispersive Infra-Red). Princip rada *NDIR* senzora je korištenje činjenice da većina molekula mogu apsorbirati infracrvenu svjetlost. Količina infracrvene svjetlosti koja se apsorbira pri prolasku kroz određeni plin je proporcionalna koncentraciji molekula koje apsorbiraju određenu valnu duljinu svjetlosti. Pri prolasku svjetlosti kroz plin dolazi do stvaranja kinetičke energije koja ubrzava molekule i grije plin. Ovaj princip može se koristiti za detekciju koncentracije određenih molekula u plinu zbog činjenice da različite molekule apsorbiraju svjetlost različite valne duljine. Tako na primjer molekula CO_2 ima sposobnost apsorpcije na valnoj duljini od 4.26 [μm] koja se nalazi u dijelu infracrvnog spektra. Detaljnije informacije o ovom tipu senzora dostupne su u [35].

Pojednostavljeni prikaz *NDIR* senzora prikazan je na Slici 4.24. Plin koji se promatra prolazi kroz komoru senzora te je obasjan infracrvenom svjetlošću. Sa druge strane senzora nalazi se optički filter koji propušta samo svjetlost valne duljine koju želimo promatrati. U slučaju detekcije koncentracije molekula CO_2 filter ima pojasni propust valne duljine 4.26 [μm]. Svjetlost koja prolazi filter detektira se optičkim detektorom na kraju senzora. Kao drugi princip detekcije koncentracije određenih molekula u plinu predstavlja se *DIR* (eng. Dispersive Infra Red) senzor. Jedina bitna razlika je što se kod *DIR* senzora prvo svjetlost filtrira optičkom prizmom na željenu valnu duljinu te se ne koristi filter prije detektora svjetlosti. Takvi senzori su uglavnom većih dimenzija i ne predstavljaju dovoljno jednostavno rješenje za potrebe senzorske stanice.

Za potrebe mjerenja koncentracije CO_2 u zraku korišten je senzor *MG811* [36] prikazan na Slici 4.25 te *AFE* rješenje za povezivanje senzora sa AD pretvornikom, *LMP91050* [37] tvrtke Texas Instruments. Dodatne informacije o senzoru *MG811* dostupne su u [38]. Pojednostavljeni blokovski prikaz *AFE* rješenja prikazan je na Slici 4.26. Princip rada CO_2 senzora je prethodno opisan. Kako bi se signal sa senzora prilagodio za čitanje AD pretvornika, potrebno je isti dovoljno pojačati. Za tu svrhu koristi se *LMP91050* koji u sebi sadrži dva *PG* pojačala (eng. Programmable Gain Amplifier), 8 bitni digitalno-analogni pretvornik, te izlazom za analogno

Slika 4.24. Princip rada *NDIR* senzora

filtriranje signala. Ovime je omogućeno kondicioniranje signala kako bi se maksimalno iskoristila preciznost AD pretvornika spojenog na mikrokontroler. Moguće je odabrati različita pojačanja *PGA* jedinica, te offset pomoću DA pretvornika. Sva podešenja izvode se uz pomoć *SPI* protokola. Na *LMP91050* rješenju implementiran je jednosmjerni oblik *SPI* protokola, koji ne omogućuje čitanje na standardan način. Čitanje je ipak moguće ostvariti, no to u našem slučaju nije potrebno. Senzor se povezuje između pinova *CMOUT* i *IN* dok se AD pretvornik spaja na pin *OUT*.

Slika 4.25. Senzor za detekciju CO_2 , *MG811*Slika 4.26. *AFE* rješenje za mjerenje prisutnosti plinova *LMP91050*

Ostvarena je programska podrška za čitanje stanja *MG811* senzora na mikrokontroleru *LPC1343* pomoću sljedeće dvije funkcije :

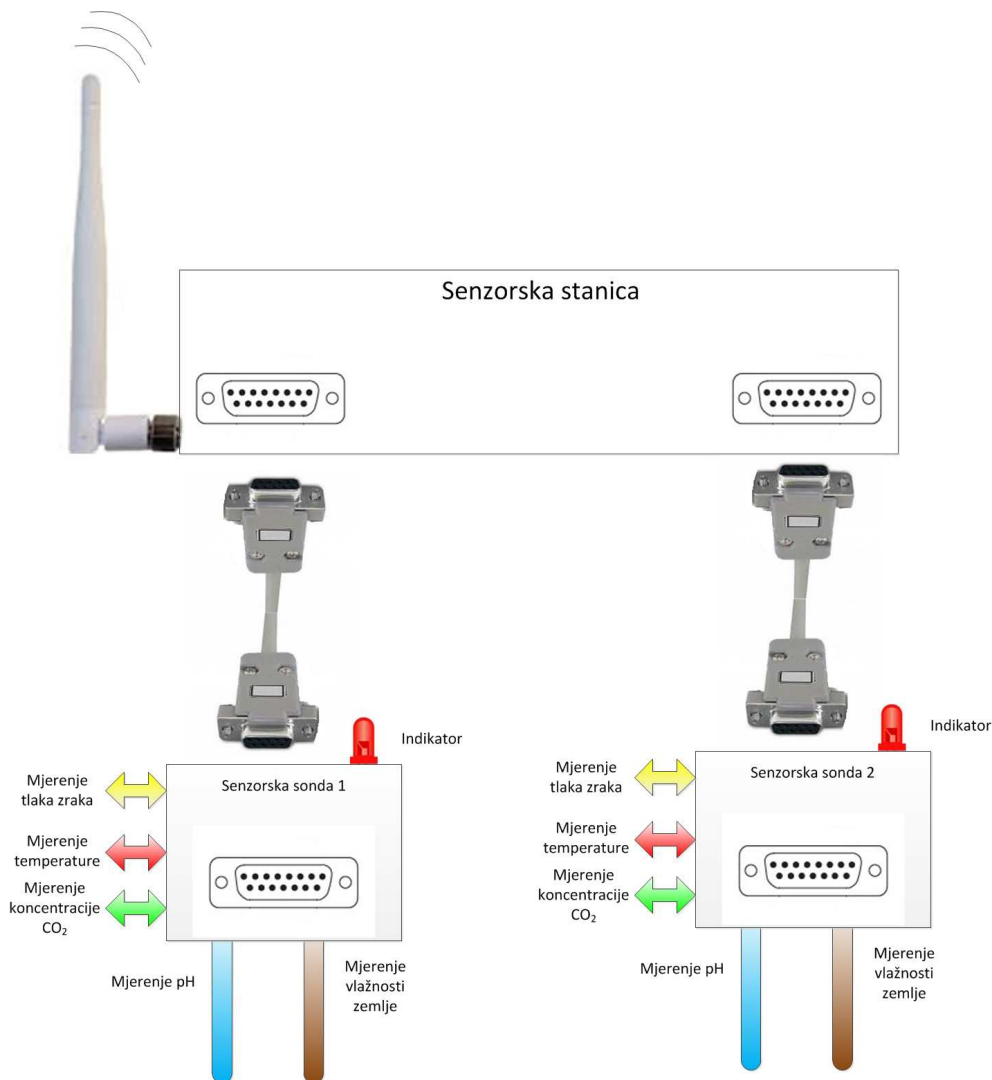
```
void ConfigureCO2AFE(uint8_t ProbeNumber);
```

```
uint32_t ReturnCO2Readings(uint8_t ProbeNumber);
```

Ulazni parametar *uint8_t ProbeNumber* zahtjeva broj sonde kojoj se želi pristupiti. Potrebno je osigurati da je prije pokretanja ovih funkcija sonda spojena i pod naponom. Funkcija *ReturnCO2Readings(...)* vraća trenutnu koncentraciju CO_2 u jedinici [*ppm*] (eng. Parts Per Million) kao vrlo čest zapis koncentracije.

4.2. Opis senzorskih sonda

Senzorska stanica ima mogućnost spajanja do dvije senzorske sonde. Izlazi za spajanje senzorskih sonda su pripremljeni sa svim komunikacijskim signalima, napajanjem i ostalim vezama, kako bi se sustav u budućnosti jednostavno mogao nadograđivati. Trenutno je izrađen jedan oblik senzorske sonde koja na sebi sadrži mogućnost mjerenja pH vrijednosti, vlažnosti tla, tlaka zraka, temperature i koncentracije CO_2 . U nastavku je ukratko opisana realizacije ovog oblika senzorske sonde. Sonda je zamišljena kako bi se postavila na zanimljivu lokaciju pri tlu. Povezivanje sonde sa senzorskom stanicom izvodi se pomoću 15 pinskog konektora. Na Slici 4.27 prikazana je idejna shema povezivanja sonde. Maksimalna duljina kabla između senzorske stanice i sonde iznosi približno 1 [m] zbog uvjeta međukapaciteta I^2C komunikacije pri dugim linijama.



Slika 4.27. Prikaz senzorskih sonda

Vodilo se računa da se maksimalno pojednostavi povezivanje sondi za krajnjeg korisnika. Sustav je podešen tako da se automatski prepozna kada je sonda spojena i da se mjerenja prikupljaju bez ikakve dodatne konfiguracije. Nakon što je sonda spojena korisnik je obaviješten paljenjem indikatora na samoj sondi. Indikator služi i za obavještanje korisnika da je sonda trenutno u uporabi, odnosno da se u tom trenutku prikupljaju podaci sa sonde. Na senzorsku stanicu mogu se spojiti maksimalno dvije sonde. Sustav pri pripajanju i odvajanju automatski prepozna koje su sonde spojene.

Spajanje sonde se detektira tako što nakon priključivanja konektora se poseban signal kratko spaja sa uzemljenjem. Taj signal je preko pull-up otpornika spojen na ulazni pin mikrokontrolera. Postavljen je prekid na pozitivni i negativni brid tog pina i na taj način vrlo lako detektiramo kada je sonda spojena i kada je odvojena. Svaka sonda ima zasebni pin za detekciju spojen na mikrokontroler. Korišteni čipovi na senzorskoj jedinici su:

- Analogno digitalni pretvornik *ADS1015*
- Digitalni barometar *MPL115A1*
- *AFE* rješenje za mjerenje pH vrijednosti - *LMP91200*
- *AFE* rješenje za mjerenje koncentracije CO_2 - *LMP91050*

Sva rješenja koriste *SPI* komunikaciju osim analogno-digitalnog pretvornika. AD pretvornik *ADS1015* koristi *I²C* komunikaciju. Kako je moguće spojiti dvije sonde potrebno je osigurati da dva AD pretvornika imaju različitu adresu. *ADS1015* posjeduje jedan pin za definiranje *I²C* adrese. U slučaju povezivanja sonde na lijevi priključak AD pretvorniku se *ADDR* pin postavlja na logičku jedinicu, dok se u slučaju povezivanja na desni priključak postavlja na logičku nulu. Slanjem dodatnog signala preko kabla koji definira *I²C* adresu je osigurano da povezivanje bilo koje sonde na bilo koji priključak ne uzrokuje koliziju adresa.

Signali koje je potrebno poslati prema senzorskoj sondi su:

- *SDA* - *I²C* komunikacija
- *SCL* - *I²C* komunikacija
- *MOSI* - *SPI* komunikacija
- *MISO* - *SPI* komunikacija
- *SCLK* - *SPI* komunikacija
- *CS1* - *Chip Select* za *MPL115A1*
- *CS2* - *Chip Select* za *LMP91200*

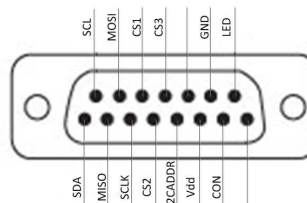
- *CS3* - *Chip Select* za *LMP91050*
- *I2CADDR* - Signal koji određuje *I²C* adresu AD pretvorniku
- *Vdd* - Napajanje senzorske sonde od 3.3 [V]
- *GND* - Uzemljenje senzorske sonde
- *LED* - Signal za paljenje LED indikatora
- *CON* - Signal koji se povezuje sa uzemljenjem pri spajanju sonde

Zbog nedovoljnog broja digitalnih izlaza mikrokontrolera za potrebe upravljanja senzorskim sondama bilo je potrebno naći adekvatno proširenje. Dodatni izlazi najviše su potrebni radi slanja signala na spojene senzorske sonde. Svaka od njih sadrži po tri čipa sa *SPI* komunikacijom. Za svaki čip potrebno je imati *CS* signal kako bi se moglo komunicirati i stoga je potrebno imati 6 slobodnih izlaznih pinova. Sonde se napajaju iz zasebnog regulatora sa *Enable* pinom. Na taj način moguće je gasiti senzorske sonde u trenucima kada se ne vrši prikupljanje mjerenja, kako bi se uštedila energija. To je ukupno 7 potrebnih pinova za upravljanje dvjema sondama. Za potrebu dobivanja dodatnih digitalnih izlaza za upravljanje *CS* i *LED* pinovima koristi se *IO Expander MCP23009* koji posjeduje 8 dodatnih IO pinova i *I²C* komunikaciju.

Povezivanje se ostvaruje pomoću 15 pinskog konektora prikazanog na Slici 4.28. Na Slici 4.29 je također prikazan raspored svih signala na konektoru.



Slika 4.28. Korišteni konektor za senzorsku sondu



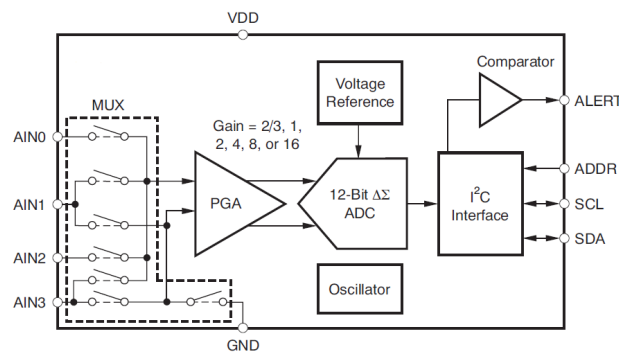
Slika 4.29. Raspored signala na konektoru za senzorsku sondu

4.2.1. Analogno digitalni pretvornik *ADS1015*

ADS1015 [39] je veoma mali, 12 bitni $\Delta\Sigma$ analogno-digitalni pretvornik sa vrlo malom potrošnjom. Jednostavna konfiguracija omogućuje brzu integraciju u postojeći sustav. Korišteni AD pretvornik posjeduje četiri single-ended ulazna kanala ili dva diferencijalna ulaza. Velika prednost je u postojanju programirljivog pojačala ulaznog signala koje omogućuje mjerenje sa punom preciznošću u granicama od ± 256 [mV]. Sva konfiguracija obavlja se pomoću I^2C komunikacije na brzini od 400 [kHz]. Moguće I^2C adrese glase:

- ADDR=GND I^2C Adresa=1001000x
- ADDR=Vdd I^2C Adresa=1001001x

Funkcijska blokovska shema prikazana je na Slici 4.30. Od dodatnih mogućnosti može se istaknuti postojanje komparatora i *ALERT* pina. Pomoću njega je moguće postaviti gornju i donju granicu pri kojoj će se generirati upozorenje (eng. Alert) ukoliko vrijednost na odabranom kanalu izađe iz definiranih granica. Ova mogućnost neće se koristiti. *ADS1015* posjeduje 2 registra od 16 bita dostupna korisniku preko



Slika 4.30. Funkcijska blokovska shema za *ADS1015*

kojih se izvode sve operacije za konfiguriranje i čitanje konverzija. Dostupna su još dva registra za podešavanje gornje i donje granice komparatora, ali se neće detaljno opisivati. 16 bitni registar *Conversion* dostupan na internoj adresi 0x00 sadrži vrijednost zadnje pretvorbe u zapisu drugog komplementa. Konfiguracija, odabir kanala, zahtjev za pretvorbom itd. podešava se promjenom *Config* registra na internoj adresi 0x01. Izgled i sadržaj registara prikazan je na Slici 4.31. Funkcije pojedinih bitova *Config* registra glase:

- [15] *OS* - Upisivanjem 1 započinje se konverzija. Nakon vremena konverzije rezultat je dostupan u *Conversion* registru. Ovaj bit se sam postavlja u 0 nakon konverzije
- [14, 13, 12] *MUX* - Podešavanje izlaznog muxa za odabir kanala koji će biti spojeni na diferencijalne ulaze $\Delta\Sigma$ AD pretvornika. Na ovaj način moguće je postaviti sve kombinacije kanala i odabrati diferencijalno ili single-ended mjerenje kao što je prikazano u Tablici 4.7.

Conversion register - Vrijednost zadnje pretvorbe

BIT	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
IME	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	0	0	0	0

Config register - Podešavanje rada

BIT	15	14	13	12	11	10	9	8
IME	OS	MUX2	MUX1	MUX0	PGA2	PGA1	PGA0	MODE
BIT	7	6	5	4	3	2	1	0
IME	DR2	DR1	DR0	COMP_MODE	COMP_POL	COMP_LAT	COMP_QUE1	COMP_QUE0

Slika 4.31. *ADS1015* registri dostupni korisniku

- [11, 10, 9] *PGA* - Podešavanje pojačanja na način $\frac{2}{3} \rightarrow 000$, $1 \rightarrow 001$, ... , $16 \rightarrow 101$
- [8] *MODE* - Odabir 0 uzastopno uzorkovanje, odabir 1 uzorkovanje na zahtjev
- [7, 6, 5] *DR* - Odabir brzine uzorkovanja. $000 \rightarrow 128 \left[\frac{\text{uzoraka}}{s} \right]$ do $111 \rightarrow 3300 \left[\frac{\text{uzoraka}}{s} \right]$
- [4,...,0] - Postavke komparatora

Tablica 4.7. Odabir kanala preko *MUX* bitova konfiguracijskog registra

<i>MUX</i>	Kanal +	Kanal -	<i>MUX</i>	Kanal +	Kanal -
000	AIN0	AIN1	100	AIN0	GND
001	AIN0	AIN3	101	AIN1	GND
010	AIN1	AIN3	110	AIN2	GND
011	AIN2	AIN3	111	AIN3	GND

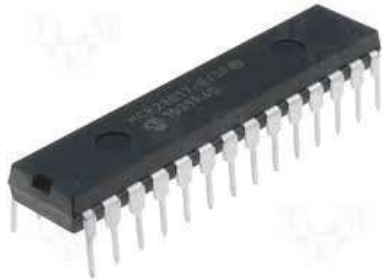
Uzorkovanje kanala provodi se tako da se prvo podese izlazni kanali preko multipleksora, zatim se postavi odgovarajuće pojačanje *PGA* i upiše 1 u bit 15 *Config* registra. Nakon proteklog vremena uzorkovanja rezultat se čita iz *Conversion* registra. Napisana je sljedeća funkcija za dobivanje mjerenja sa *ADS1015* koja glasi:

```
float SensorProbeADCRead(uint8_t ProbeNumber, uint8_t ChannelNumber);
```

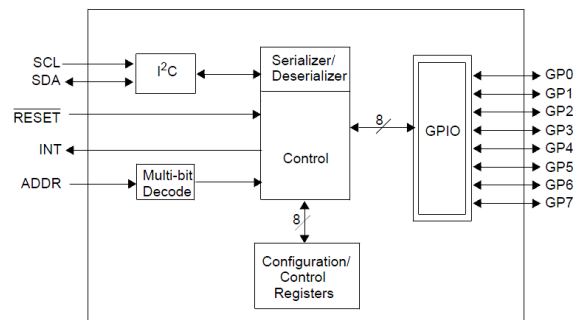
U ovisnosti o odabiru *ProbeNumber* = 1, 2 pristupa se drugoj *I²C* adresi, dok odabirom *ChannelNumber* provodi se odgovarajuća konfiguracija pojačanja i postavke multipleksora te čita se mjerenje. Rezultat se vraća u floating point zapisu koji predstavlja izmjereni napon na kanalu skaliran na 3.3 [V] bez obzira na postavke pojačanja.

4.2.2. Ulazno-izlazno proširenje *MCP23009*

Ulazno-izlazno proširenje *MCP23009* [40] koristi se na senzorskoj stanici pretežito za upravljanje *CS* signalima za obje spojene sonde. Koristi se izvedba u DIP18 kućištu prikazana na Slici 4.32. Proširenje *MCP23009* napaja se sa 3.3 [V] i posjeduje 8 ulazno-izlaznih pinova. Svi pinovi u našem slučaju se koriste kao izlazni. Ukoliko se neki pinovi postave kao ulazni, moguće je postaviti prekide koji se dojavljuju nadređenom sustavu preko signala *INT*. Konfiguriranje je omogućeno koristeći *I²C* komunikaciju. Na kućištu je dostupan jedan ulaz za specificiranje *I²C* adrese. Pomoću samo jednog ulaza moguće je specificirati do 8 različitih adresa. *MCP23009* u sebi posjeduje dekodeer naponskih razina, te je moguće postavljanjem razina između 0 i 3.3 [V] definirati posljednje 3 vrijednosti *I²C* adrese. Kako senzorska stanica ima samo jedan *MCP23009* njegov *ADDR* pin je radi jednostavnosti spojen na uzemljenje, i time je definirana *I²C* adresa: 0100000x. Ova modul omogućuje brzinu komunikacije do 3.4 [MHz] ali će se koristiti pri brzini 400 [kHz] radi kompatibilnosti sa ostalim uređajima. Prema specifikacijama svaki izlazni pin može dati do 20 [mA] struje što je i više nego dovoljno za potrebe upravljanja *CS* pinovima. Blokova shema proširenja *MCP23009* prikazana je na Slici 4.33.



Slika 4.32. Korišteno proširenje *MCP23009* u DIP 18 kućištu



Slika 4.33. Blokova shema IO proširenja *MCP23009*

MCP23009 posjeduje 11 registara za upravljanje ulazno-izlaznim pinovima. Imena i opisi registara kojima se može pristupiti glase:

- [0x0] *IODIR* - Podešavanje smjera svakog pina, (Ulaz=1), (Izlaz=0)
- [0x1] *IPOLE* - Postavljanjem logičke jedinice definira invertiranje logike za taj pin
- [0x2] *GPITEN* - Omogućavanje prekida za određeni pin
- [0x3] *DEFVAL* - Ukoliko je omogućeno ostalim registrima trenutno stanje ulaznog pina se uspoređuje sa ovim registrom i ukoliko je potrebno generira se prekid. Ova funkcionalnost se omogućuje registrima *GPITEN* i *INTCON*
- [0x4] *INTCON* - Ukoliko je za određeni pin postavljena logička nula tada se prekid generira kada je vrijednost ulaza različita od vrijednosti upisane na

odgovarajuću lokaciju u *DEFVAL* registru. Ako je postavljena logička nula za određeni pin, tada se trenutna vrijednost uspoređuje sa prijašnjom vrijednosti te ukoliko je došlo do promjene generira se prekid

- [0x5] *IOCON* - Podešavanje opcija kao polaritet *INT* pina, način prihvaćanja prekida itd.
- [0x6] *GPPU* - Postavljanjem logičke jedinice na određeni bit znači postavljanje pull-up otpornika na odgovarajući pin
- [0x7] *INTF* - U ovom registru moguće je vidjeti koji pin je generirao prekid. Čitanjem ovog registra automatski se prihvaća prekid i omogućuje generiranje novog
- [0x8] *INTSAP* - Vrijednost ovog registra preslikava stanja pinova u onom trenutku kada se prekid dogodio. Stanje registra se ne mijenja sve dok se primitak prekida ne potvrdi
- [0x9] *GPIO* - Omogućuje čitanje stanja pinova dok upisivanjem se mijenja registar *OLAT* koji utječe na pinove koji su konfigurirani kao digitalni izlazi
- [0xA] *OLAT* - Nebitan je korisniku a služi za promjenu stanja pin konfiguriranog kao digitalni izlaz

Iako će se svi pinovi koristiti kao digitalni izlazi napisana je programska podrška koja omogućava postavljanje prekida i čitanje stanja određenih pinova. Međutim opisati će se samo programska podrška za upravljanje izlazima. Negativna strana *MCP23009* proširenja je ta što se digitalni izlazi ne mogu postaviti na visoku razinu bez korištenja pull-up otpornika. Ukoliko je pin konfiguriran kao digitalni izlaz i postavljen na visoku razinu, izlaz će plivati (eng. float) i neće poprimiti visoku razinu. Stoga je programskom podrškom potrebno osigurati da svakom pinu konfiguriranom kao digitalnom izlazu bude postavljen pull-up otpornik. Biti će prezentirane samo neke napisane funkcije za *LPC1343*:

- ```
void PIOExpSetDir (uint8_t bitPosi, uint8_t value);
```

Postavljanje pina određenog parametrom *bitPosi* kao digitalni izlaz ukoliko *Value = 1*. Paralelno se i osposobljava pull-up otpornik na definiranom pinu kako bi se pravilno mogla postaviti visoka razina.

- ```
void PIOExpSetValue ( uint8_t bitPosi, uint8_t value );
```

Služi za postavljanje naponske razine pina konfiguriranog kao digitalni izlaz pomoću parametra *Value = 0, 1*.

4.2.3. Programska podrška za dobivanje mjerenja sa senzorske sonde

U trenutku kada je potrebno prikupljati senzorske podatke prvo se provjerava koje su sonde spojene. Definirane su dvije globalne varijable čija se vrijednost osvježava ukoliko se detektira pripajanje i odpajanje sonde. U slučaju pripajanja lijeve sonde provjerava se komunikacija sa svim uređajima na sondi. Ukoliko je komunikacija uspjela, postavlja se globalna varijabla *Probe1CON* = 1, dok u slučaju detektiranja odpajanja varijabla se odmah postavlja na *Probe1CON* = 0. Ista logika vrijedi i za drugu sondu. U trenutku potrebe za čitanjem mjerenja provjerava se koja sonda je spojena. Zatim se dovodi napajanje na obje sonde i pali se LED indikator. Nakon kratkog vremena ponovno se konfiguriraju sve jedinice na spojenim sondama, jer je posljednja konfiguracija zaboravljena nakon prekida napajanja. Nakon čitanja podataka sa senzora *MPL115A1* i AD pretvornika *ADS1015* na spojenim sondama gasi se napajanje.

Ovaj postupak traje približno 2 [s] i jako je bitno da se sonde ne odpajaju za to vrijeme. Napisana je funkcija koja vraća strukturu *ProbeReadings* sa svim podacima sa sonde. Ti podaci sadrže 12 bitne rezultate AD pretvorbe sa sva 4 kanala *ADS1015* i 10 bitne vrijednosti temperature i tlaka pročitane sa senzora *MPL115A1*. Funkcija za dobivanje svih mjerenja glasi:

```
ProbeReadings ReturnProbeReading (uint8_t ProbeNum);
```

Ukoliko se funkcija pozove za sondu koja nije spojena funkcija će vratiti sve vrijednost *ReadingsOK* = 0 a ukoliko su mjerenja dostupna, vrijediti će *ReadingsOK* = 1. Primljena struktura ima sljedeći oblik:

```
typedef struct
{
    uint8_t ReadingsOK;
    uint16_t PhChannel;
    uint16_t GasChannel;
    uint16_t MoistureChannel;
    uint16_t TempChannel;
    uint16_t PresChannel;
}ProbeReadings;
```

4.3. Proračun dodatnih podataka

Dodatne informacije koje se mogu dobiti iz izmjerenih vrijednosti sa senzorske stanice su:

- Proračun trenutne visine
- Proračun prognoze vremena
- Proračun točke rosišta
- Proračun evapotranspiracije
- Proračun visine i temperature oblaka
- Proračun vjerojatnosti pojave bolesti biljaka

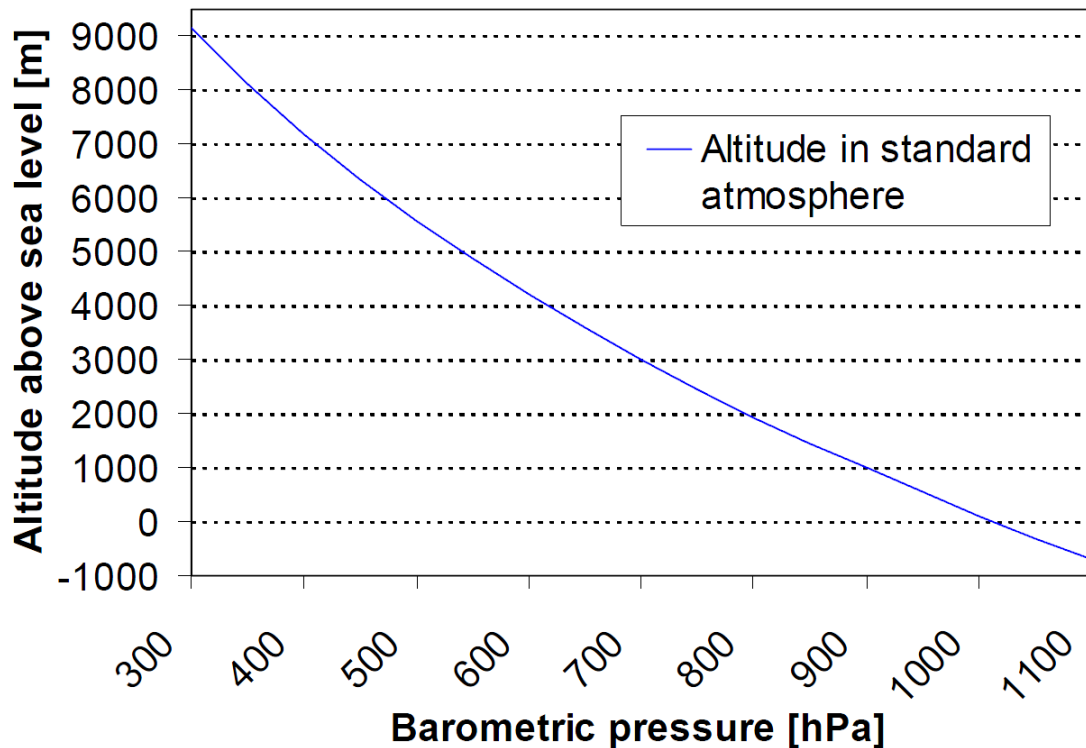
U nastavku je objašnjena kratka teorijska podloga za svaki podatak, te način proračuna istog. Proračun ovih vrijednosti dostupan je konačnom korisniku preko daljinskog pristupa u korisničkoj aplikaciji. Računanje ponekih vrijednosti u nastavku zahtjeva računalne resurse koji nisu dostupni na senzorskoj stanici i stoga se proračuni obavljaju na računalu nakon preuzimanja vremena.

4.3.1. Proračun trenutne visine

Poznato je kako tlak zraka pada sa porastom visine. Iz tog zaključka moguće je izračunati trenutnu visinu senzorske stanice pomoću mjerenja tlaka zraka uporabom senzora *BMP085*. Preciznost senzora je iznimno visoka (19 bita) i prema dokumentaciji omogućuje mjerenje visine do preciznosti od čak 0.25 [m]. Proračun visine senzorskog modula provodi se pomoću barometarske formule dostupne u [14] koja glasi:

$$H_{stanice} = 44300 \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0.19} \right] \quad (4.33)$$

gdje su: p trenutni tlak u [hPa] i p_0 tlak na razini mora u [hPa]. Za vrijednost tlaka na razini mora uzima se $p_0 = 1013.25$ [hPa]. Na Slici 4.34 prikazan je profil pada visine sa porastom mjerenog tlaka dostupan u [14].



Slika 4.34. Profil ovisnosti visine o mjerenom tlaku

4.3.2. Proračun prognoze vremena

Pomoću mjerenja sa senzorske stanice može se proračunati kratkoročna vremenska prognoza. Najbitniji podatak za proračun vremenske prognoze biti će mjerenje tlaka zraka. Promjena tlaka zraka je u direktnoj vezi sa promjenom vremenskih prilika. Nizak tlak u pravilu znači pogoršanje vremena, dok se visoki tlak interpretirati kao poboljšanje vremena. To se može intuitivno objasniti mjerenjem količine vodene pare u zraku. Ukoliko u zraku ima mnogo vodene pare, njegova masa će se smanjiti zbog razlike u molekularnoj masi vode ($H_2O \rightarrow (18)$) i zraka ($O_2 \rightarrow (32)$, $N_2 \rightarrow (28)$). To znači da ukoliko ima mnogo vodene pare u zraku tada će tlak zraka padati. Visoke brzine vjetra dolaze sa smanjenjem tlaka zraka jer tok zraka iz područja višeg tlaka zraka u područje nižeg tlaka zraka stvara brzinu vjetra. Ukoliko se senzorska stanica nalazi u području nižeg tlaka zraka tada je za očekivati veću brzinu vjetra.

Za potrebe predviđanja vremena u senzorskoj stanici koristi se vrlo jednostavan algoritam opisan u [41]. Algoritam se izvodi na lokalnoj razini, no rezultatima je moguće pristupiti i preko daljinskog pristupa. Proračun na lokalnoj razini je vrlo bitan kako bi korisnik mogao podesiti upravljanje zalijevanjem u skladu sa predviđenom vremenskom prognozom. Ukoliko je potrebno zalijevati promatranu kulturu korisno je znati postoji li mogućnost pojave oborina u bližoj budućnosti.

Podešavanje ovih mogućnosti dostupno je krajnjem korisniku i opisano je u uvodu. U ovom poglavlju opisati će se samo algoritam proračuna vremenske prognoze.

Proračun vremenske prognoze moguće je izvoditi između dva vremena uzorkovanja. Dostupna su podešenja da stanica koristi do 6 posljednjih mjerenja. Broj korištenih uzoraka ovisi o postavljenom vremenu $T_{collect}$. Zaključivanje o vremenu provodi se iz promjene tlaka zraka između dva vremena uzorkovanja prema Tablici 4.8. Ukoliko se koristi više uzoraka zaključivanje se provodi prema srednjoj vrijednosti derivacije tlaka zraka u vremenu. Ovaj algoritam je dovoljno jednostavan za

Tablica 4.8. Zaključivanje o promjeni vremena na osnovi mjerenja promjene tlaka

Uvjet	Zaključak
$\frac{dP}{dt} > 0.25[\frac{kPa}{h}]$	Brz porast tlaka, nestabilno vrijeme
$0.05[\frac{kPa}{h}] > \frac{dP}{dt} > 0.25[\frac{kPa}{h}]$	Umjeren porast tlaka, stabilno suho vrijeme
$-0.05[\frac{kPa}{h}] > \frac{dP}{dt} > 0.05[\frac{kPa}{h}]$	Stabilno vrijeme
$-0.25[\frac{kPa}{h}] > \frac{dP}{dt} > -0.05[\frac{kPa}{h}]$	Umjeren pad tlaka, mogućnost kiše
$\frac{dP}{dt} < -0.25[\frac{kPa}{h}]$	Brz pad tlaka, oluja i kiša

proračun na senzorskoj stanici. Međutim algoritam je moguće poboljšati uzimajući u obzir relativnu vlažnost zraka i osvjetljenje. Ukoliko su zadovoljeni uvjeti pada tlaka zraka i relativne vlažnosti zraka $Hum > 90$ [%] tada je moguće sa većom vjerojatnošću zaključiti pojavu kiše. Ukoliko dodatno zaključimo da je osvjetljenje malog intenziteta, što može značiti naoblaku tada sa još većom vjerojatnošću možemo predvidjeti kišu. Uključenje ovih opcija omogućeno je korisniku preko postavki na korisničkom sučelju. Postavke se spremaju u memoriju modula i koriste se pri odlučivanju o trenutku zalijevanja.

4.3.3. Proračun točke rosišta i visine oblaka

Točka rosišta [42] (eng. Dew Point) označava temperaturu ispod koje se vodena para u zraku kondenzira u tekućinu odnosno rosu. Ovu temperaturu moguće je proračunati koristeći trenutnu temperaturu T_{zraka} [$^{\circ}C$] i vlagu zraka Hum [%]. Za intuitivno shvaćanje može se reći da je točka rosišta bliža stvarnoj temperaturi što je relativna vlažnost zraka veća. Poznajući informaciju o točki rosišta moguće je estimirati visinu oblaka, i vjerojatnost zamrzavanja. Relacija između apsolutne vlažnosti zraka i točke rosišta također određuje brzinu korozije i vjerojatnost pojave plijesni. Očito je kako je ova informacija jako bitna.

Kao relacija za određivanje točke rosišta najčešće se koristi Magnusova formula koja je određena relacijama:

$$\gamma(T_{zraka}, Hum) = \ln\left(\frac{Hum}{100}\right) + \frac{bT_{zraka}}{c + T_{zraka}} \quad (4.34)$$

$$T_{rosista} = \frac{c\gamma(T_{zraka}, Hum)}{b - \gamma(T_{zraka}, Hum)} \quad (4.35)$$

gdje su konstante $a = 6.112$, $b = 17.67$, $c = 243.5$ [$^{\circ}C$]. Ova relacija prikazana je u radu [43]. Pri proračunu točke rosišta uzima se pretpostavka da se tlak zraka neće promijeniti. Za potrebe prezentacije točke rosišta korisniku na lokalnoj razini koristi se jednostavna aproksimacije formule 4.35 koja glasi:

$$T_{rosista} = T_{zraka} - \frac{100 - Hum[\%]}{5} \quad (4.36)$$

Također jedan koristan podatak koji se da aproksimirati iz dobivene točke rosišta je visina oblaka H_{oblaka} . Ovakav proračun se često koristi u avijaciji. Dodatne potrebne informacije su trenutna visina $H_{stanice}$ stanice koja se dobiva relativnog tlaka zraka i trenutna temperatura T_{zraka} koja se dobiva sa istog senzora. Konačnu visinu oblaka računamo prema relaciji:

$$H_{oblaka}[m] = 1000 \frac{T_{zraka} - T_{rosista}}{4.5} + H_{stanice} \quad (4.37)$$

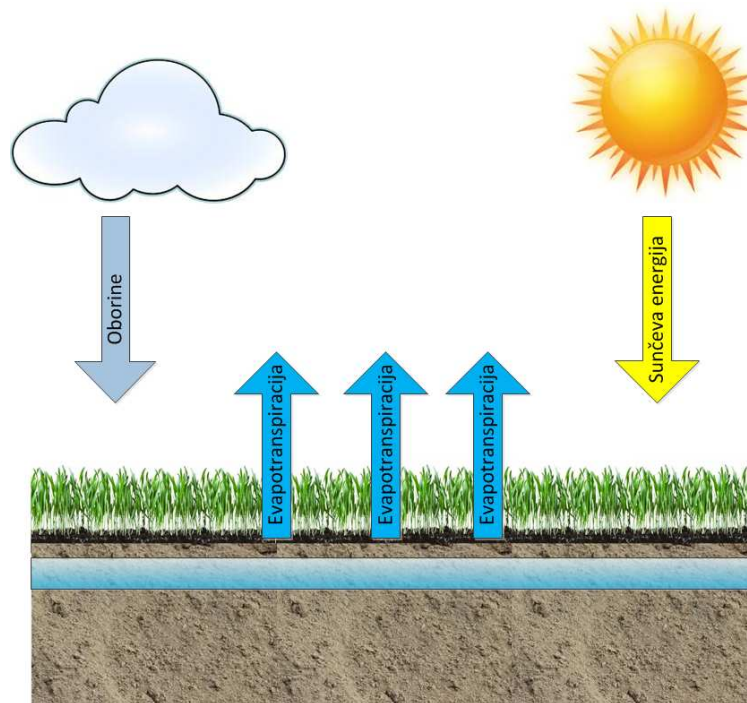
Ukoliko se pretpostavi da temperatura pada za 9.84 [$^{\circ}C$] svakih 1000 [m] tada se temperatura oblaka dobiva prema relaciji:

$$T_{oblaka}[^{\circ}C] = -0.00984H_{oblaka} + T_{zraka} \quad (4.38)$$

4.3.4. Proračun evapotranspiracije

Evapotranspiracija jednaka je sumi evaporacije vode iz biljaka i tla u atmosferu kao što je to prikazano na Slici 4.35. Evapotranspiracija je vrlo bitan dio ciklusa kruženja vode u prirodi. Ona ovisi o uzgajanoj kulturi, solarnom zračenju, vlažnosti, temperaturi i brzini vjetra te se mjeri u jedinicama $[\frac{mm}{h}]$. Do danas postoje mnogo različitih modela koji dobro opisuju ovu pojavu te su djelomično opisani u [44]. Neki od njih glase:

- Penmanova jednadžba
- Penman-Monteithova jednadžba
- Priestley-Taylorova jednadžba
- Blaney-Criddeleova jednažba itd.



Slika 4.35. Prikaz evapotranspiracije

Najčešće korištena je Penman-Monteithova jednadžba prikazana u radu [45] zbog preporuke Organizacije za Hranu i Agrikulturu Ujedinjenih Naroda (eng. FAO). Iz tog razloga koristiti će se u ovom radu. Iako ovaj model uzima u obzir sve prije spomenute parametre, točnost rezultata se ne može usporediti sa direktnim mjerenjem ulaznog i izlaznog protoka vode. Kao i svi modeli, točnost Penman-Monteithovog modela jako ovisi o parametrima specifičnim za uzgajanu kulturu kao, otpornost i vodljivost biljke. Postoje "rupe" u znanju prilikom određivanja ovih parametara te se uglavnom koriste logične pretpostavke.

Proračun količine evapotranspiracije najčešće se izvodi u definiranim vremenskim razmacima kao mjesecima, danima ili satima. Penman-Monteithova jednadžba u osnovnom obliku glasi:

$$ET_0 = \left(\frac{\Delta(R_n - G) + K_t \rho_a c_p \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \right) / \lambda \quad (4.39)$$

gdje su parametri:

- ET_0 - Vrijednost evapotranspiracije u jedinici $[\frac{mm}{t}]$
- R_n - Solarno zračenje u jedinici $[\frac{MJ}{m^2t}]$
- G - Distribucija solarne energije po promatranj površini u jedinici $[\frac{MJ}{m^2t}]$
- e_s - Tlak zasićene vodene pare u zraku $[kPa]$
- e_a - Tlak vodene pare u zraku $[kPa]$
- ρ_a - Srednja gustoća zraka pri konstantnom tlaku $[\frac{kg}{m^3}]$
- c_p - Specifična toplina zraka $[\frac{MJ}{kg^\circ C}]$
- Δ - Odnos tlaka zasićene vodene pare i temperature $[\frac{kPa}{^\circ C}]$
- γ - Psihometrijska konstanta (eng. Psychometric constant) $[\frac{kPa}{^\circ C}]$
- r_s - Otpornost tla $[\frac{s}{m}]$
- r_a - Otpornost zraka $[\frac{s}{m}]$
- λ - Toplina isparavanja $[\frac{MJ}{kg}]$
- K_t - Vrijednost za pretvorbu jedinica

Jedinica $[t]$ u prethodnim parametrima označava jedinicu vremena intervala u kojemu se izračunava količina evapotranspiracije. Proračun parametra aerodinamičkog otpora r_a provodi se prema relaciji:

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z_W - d}{z_{om}} \right] \ln \left[\frac{z_h - d}{z_{oh}} \right]}{k^2 u_z} \quad (4.40)$$

gdje su:

- z_W - Visina mjerenja brzine vjetra $[m]$
- z_h - Visina mjerenja vlažnosti i temperature $[m]$
- d - 0.67 $[m]$

- z_{om} - 0.123 [m]
- z_{oh} - 0.0123 [m]
- k - von Karmanova konstanta 0.41
- h - Srednja visina promatrane vegetacije [m]

U senzorskoj stanici ne provodi se mjerenje vjetera i stoga je potrebno estimirati njegovu brzinu. Prema podacima za europsku regiju, srednja brzina vjetera mjerena na visini od $z_W = 2$ [m] iznosi približno $2 \left[\frac{m}{s}\right]$. Visina mjerenja temperature i vlažnosti z_h ovisi o mjestu postavljanja senzorske stanice i stoga će se ovaj parametar zahtijevati od korisnika, isto kao i srednja visina vegetacije h .

Vrijednost parametra otpornosti tla vrlo često se određuje na temelju iskustva. Prema preporuci iz rada [45] u našem proračunu koristi se vrijednost $r_s = 70 \left[\frac{s}{m}\right]$. Toplina isparavanja λ dobiva se iz srednje vrijednosti temperature unutar promatranog vremenskog razdoblja. U korisničkoj aplikaciji koristi se proračun u intervalima od 1 sat. Parametar λ prema tome dobiva se iz srednje temperature svakog sata prema relaciji:

$$\lambda = 2.501 - 2.361 \cdot 10^{-3} T_{srednje} \quad (4.41)$$

u jedinici $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$. Psihometrijska konstanta (eng. Psychometric constant) γ izražena je u jedinicama $\left[\frac{kPa}{^\circ C}\right]$ i dobiva se iz tlaka zraka P u [kPa] i izračunate topline isparavanja λ u $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$ prema relaciji:

$$\gamma = 0.00163 \frac{P}{\lambda} \quad (4.42)$$

Zatim parametar Δ odnosno odnos tlaka zasićene vodene pare i temperature u jedinici $\left[\frac{kPa}{^\circ C}\right]$ dobivamo iz srednje temperature zraka prema relaciji:

$$\Delta = \frac{2504}{(T_{srednje} + 237.5)^2} e^{\frac{17-27T_{srednje}}{T_{srednje}+237.2}} \quad (4.43)$$

Parametri e_s i e_a dobivaju se iz mjerenja temperature i točke rosišta iz Poglavlja 4.3.3 prema relaciji:

$$e_s = \frac{1}{2} \cdot \left[0.6108 e^{\frac{17.27T_{max}}{T_{max}+237.3}} + 0.6108 e^{\frac{17.27T_{min}}{T_{min}+237.3}} \right] \quad (4.44)$$

$$e_a = 0.6108 e^{\frac{17.27T_{rosista}}{T_{rosista}+237.3}} \quad (4.45)$$

Solarno zračenje R_n u jedinici $\left[\frac{MJ}{m^2t}\right]$ dobiva se iz odnosa ulaznog zračenja malih valnih duljina R_{ns} i izlaznog zračenja velikih valnih duljina R_{nl} :

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (4.46)$$

$$R_n = (1 - \alpha) R_s - \sigma (T_{srednja}^4 + 273.5) (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) (1.35 \cdot 0.5 - 0.35) \quad (4.47)$$

gdje su vrijednosti:

- α - približno iznosi 0.23
- R_s - vrijednost solarnog zračenja koje mjeri senzorska stanica u jedinicama $\left[\frac{mW}{cm^2}\right]$ podijeljena sa promatranim periodom. Jedinicu je potrebno skalirati u $\left[\frac{MJ}{m^2t}\right]$.
- e_a - Izračunata vrijednost tlaka vodene pare u zraku u $[kPa]$
- $T_{srednja}$ - Srednja vrijednost temperature u $[^\circ C]$ mjerena u istom vremenskom rasponu kao i solarno zračenje R_s

Posljednja potrebna vrijednost je distribucija solarne energije po promatranoj površini G u jedinici $\left[\frac{MJ}{m^2t}\right]$ gdje t označava vremensku jedinicu. Vrijednost ovisi o dobivenom parametru R_n . Ukoliko vrijedi $R_n > 0$ odnosno pri mjerenju za vrijeme dana tada se koristi relacija:

$$G = 0.4e^{-0.5 \cdot 23.8} R_n \quad (4.48)$$

a za vrijeme noći odnosno $R_n < 0$ vrijedi relacija:

$$G = 1.8e^{-0.5 \cdot 23.8} R_n \quad (4.49)$$

Ovim relacijama mogu se dobiti svi potrebni parametri za izračun vrijednosti evapotranspiracije ET_0 unutar proizvoljnog vremenskog raspona. Pri proračunu za potrebe prezentacije korisniku koristiti će se proračun u vremenskim razmacima od 1 sat. Proračun će biti omogućen samo u slučaju ako je postavljeno vrijeme uzorkovanja $T_{collect} < 30 [min]$. Za proračun je potrebno preuzeti sljedeće podatke:

- Temperatura
- Osvjetljenost
- Vlažnost zraka
- Tlak zraka
- Nadmorska visina senzorske stanice

dok je na korisniku zadatak da se unesu sljedeći parametri:

- u_z - Pretpostavljena brzina vjetra
- z_W - Visina na kojoj je zadana pretpostavljena brzina vjetra
- z_h - Visina na kojoj se mjeri temperatura i vlaga zraka
- h - Prosječna visina promatrane vegetacije

Implementirani algoritam vraća vrijednost evapotranspiracije u jedinicama $\left[\frac{mm}{h}\right]$ i grafički prikazuje rezultate.

4.3.5. Proračun vjerojatnosti izbivanja bolesti biljaka

Zanimljiv podatak za poljoprivrednike je vjerojatnost pojave bolesti određenih kultura. Razvijeni su mnogi modeli predikcije pojave bolesti od kojih mnogi zahtijevaju mjerenja koja nisu dostupna na senzorskoj stanici i koriste se parametrima koji su podložni slobodnoj procjeni. Pregled nekih modela dostupan je u [46]. Kao jedan od popularnih i kompletnih generičkih modela za predikciju bolesti kultura predstavlja se u radu [6]. Model je napravljen prvenstveno za prognozu pojave patogena određenih kultura za koje nisu dostupni epidemiološki podaci. Većina modela zahtijevaju mnogo epidemioloških informacija. Ovakav model koristi informacije o graničnim temperaturama i potrebnim trajanjima vlažnosti. Model koristi ovisnost minimalne i optimalne duljine trajanja vlažnosti koja pogoduje razvijanju patogena.

Parametar minimalne duljine trajanja vlažnosti W_{min} je broj sati potreban za stvaranje 20 [%] vjerojatnosti razvijanja patogena na određenoj kulturi pri poznatoj temperaturi. Slaganje modela je provjereno kroz 53 studije i iznosi 83 [%]. Prednost ovakvog modela je njegova jednostavnost i korištenje parametara koji imaju poznato fizikalno značenje. Kao takav model predstavlja se kao idealno rješenje za naše potrebe. Prednosti ovog modela je prepoznala i "Američka Agencija za Agrikulturološko Zdravlje i Inspekciju" te se koristi za stvaranje karti vjerojatnosti rizika razvijanja patogena.

Kritična granica duljine vlažnosti W , dobiva se iz minimalne duljine vlažnosti W_{min} na način:

$$W = \frac{W_{min}}{f(T_{zraka})} < W_{max} \quad (4.50)$$

Parametri W_{min} i W_{max} definirani su za 53 patogena. Funkcija $f(T_{zraka})$ definirana je pomoću trenutne temperature T_{zraka} i eksperimentalno dobivenih podataka: Minimalna pogodna temperatura za razvoj patogena T_{min} , optimalna temperatura za razvoj patogena T i maksimalna temperatura za razvoj patogena T_{max} . Funkcija $f(T_{zraka})$ definirana je relacijom:

$$f(T_{zraka}) = \frac{T_{max} - T_{zraka}}{T_{max} - T_{opt}} \left[\frac{T_{zraka} - T_{min}}{T_{opt} - T_{min}} \right]^{\frac{T_{opt} - T_{min}}{T_{max} - T_{opt}}} \quad (4.51)$$

gdje je T_{zraka} srednja temperatura za vrijeme perioda vlažnosti. Sva tri parametra T_{min} , T_{opt} , T_{max} imaju jasno biološko značenje. Funkcija f objedinjuje prednosti eksponencijalnog odziva na niskim temperaturama, pozitivan linearan odziv na srednjim temperaturama, kvadratni odziv na optimalnim temperaturama i negativan odziv na niskim temperaturama. Izvedeno je mnogo postupaka validacije ovog modela sa drugim poznatim kompliciranijim modelima kao "Wang i Engel" modelom te je dobiveno gotovo identično slaganje. Detekcija perioda vlažnosti u našem slučaju izvodi se tako da se mjeri vrijeme kada je srednja vrijednost između relativne vlažnosti zraka Hum [%] i relativne vlažnosti tla Hum_s [%] veća od granične vlažnosti $Hum_g = 90$ [%].

Ukoliko se promatranje provodi u intervalima od jednog dana ili jednog sata tada je potrebno uzeti u obzir i utjecaj prekida vlažnosti. Pretpostavimo situaciju da traje period vlažnosti W_1 i zatim određeno vrijeme nastupi period suhoće D . Ukoliko nastupi novi period vlažnosti W_2 tada je potrebno ponovno uzeti u obzir prošli period vlažnosti W_1 ukoliko je vrijeme suhoće D manje od definirane granice suhog perioda D_{50} na način:

$$D < D_{50} \rightarrow W = W_1 + W_2 \quad (4.52)$$

$$D > D_{50} \rightarrow W = W_2 \quad (4.53)$$

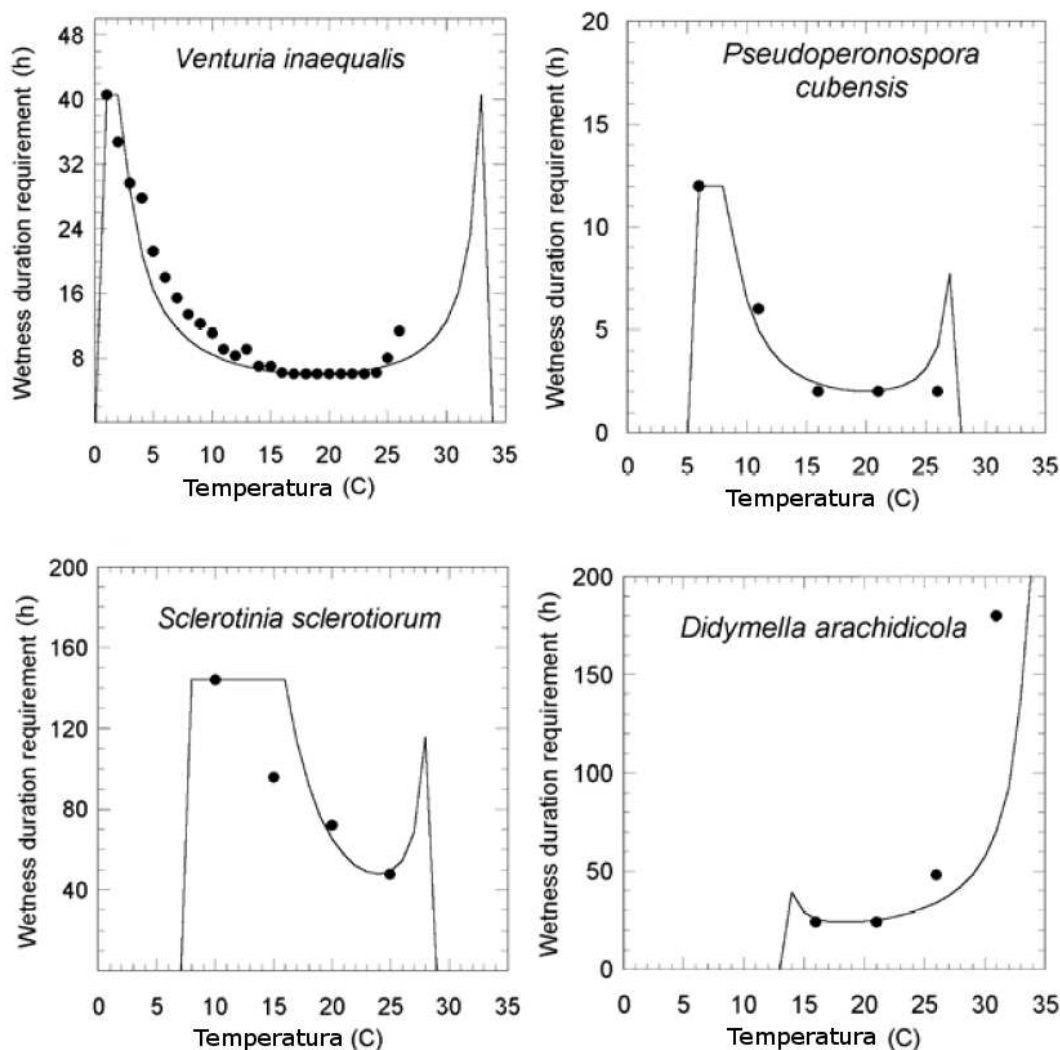
Vrijeme D_{50} je definirano kao duljina suhog perioda sa relativnom vlažnosti $Hum_g = 90$ [%] u kojemu će se dogoditi smanjenje bolesti u vrijednosti od 50 [%] u usporedbi sa ponašanjem u periodu vlažnosti. Potrebni parametri za 53 različita patogena prikazana su u Tablici 4.9.

Tablica 4.9. Parametri modela za različite patogene

Patogen	Domaćin	T_{min}	T_{max}	T_{opt}	W_{min}	W_{max}	Točnost [%]
Albugo occidentalis	Spinat	6	28	16	3	12	87
Alternaria brassicae	Uljana repica	2.6	35	18	6	22	96
Alternaria cucumerina	Dinja	12	25	19	8	24	98
Alternaria mali	Jabuka	1	35	23	5	40	88
Alternaria porri	Luk	1	35	23	8	24	100
Alternaria sp.	Mineola tangelo	9.4	35	25	8	16	90
Ascochyta rabiei	Slanutak	1	35	25	12	48	10
Bipolaris oryzae	Riža	8	35	27.5	10	24	78
Botryosphaeria dothidea	Jabuka	8	35	28	8	19	95
Botryosphaeria obtuse	Jabuka	1	35	26	5	40	97
Botrytis cinerea	Grožđe	10	35	20	4	10	94
Botrytis cinerea	Jagoda cvijet	5	35	25	8	18	13
Botrytis cinerea	Grožđe cvijet	1	34	25	1	12	99
Botrytis squamosa	Luk	1	28	18	15	24	50
Bremia lactucae	Salata	1	25	15	4	10	98
Cercospora arachidicola	Kikiriki	13.3	35	24	24	48	72
Cercospora carotae	Mrkva	11	32	24	28	96	98
Cercosporidium personatum	Kikiriki	8	35	20	16	33	33
Coccomyces hiemalis	Prunus sp.	4	30	18	5	30	96
Colletotrichum acutatum	Jagoda	7	35	27.5	6	36	93
Colletotrichum orbiculare	Lubenica	7	30	24	2	16	69
Didymella arachidicola	Kikiriki	13.3	35	18.5	24	21	-10
Diplocarpon earlianum	Jagoda	2.9	35	22.5	12	18	53
Guignardia bidwellii	Grožđe	7	35	27	6	24	90
Gymnosporangium	Jabuka	1	35	21	2	24	99
Leptosphaeria maculans	Uljana repica	2.6	35	18.5	7	18	81
Melampsora medusae	Topola	12	28	20.5	5	12	96
Monilinia fruticola	Prunus fruit	10	35	20	10	16	96
Mycosphaerella pinodes	Grašak	1.4	35	20	6	72	00
Phakopsora pachyrhizi	Soja	10	28	23	8	12	86
Phytophthora cactorum	Jabuka	1	35	25	2	5	97
Phytophthora cactorum	Jagoda	6	35	20.5	1	3	85
Phytophthora infestans	Krumpir	1	28	15	6	12	53
Plasmopara viticola	Grožđe	1	30	20	2	14	99
Pseudoperonospora cubensis	Krastavac	1	28	20	2	12	98
Puccinia arachidis	Kikiriki	5	35	25	5	25	82
Puccinia menthae	Pepermint	5	35	15	6	12	87
Puccinia psidii	Eukaliptus	1	30	21.5	6	24	98
Puccinia recondita	Pšenica	2.6	30	25	5	16	61
Puccinia striiformis	Pšenica	2.6	18	8.5	5	8	99
Pyrenopeziza brassicae	Uljana repica	2.6	24	16	6	24	90
Pyrenophora teres	Ječam	2.6	35	23	3	6	95
Pyrenophora teres	Ječam	2.6	35	18	5	48	100
Rhynchosporium secalis	Ječam	2.6	30	22.5	12	48	98
Rhynchosporium secalis	Ječam	2.6	30	22.5	6	19	94
Sclerotinia sclerotiorum	Grah	1	30	25	48	144	88
Septoria glycines	Soja	10	35	25	6	18	83
Venturia inaequalis	Jabuka	1	35	20	6	40.5	65
Venturia pirina	Kruška	1	35	22	10	25	98
Venturia pirina	Kruška	1	35	20	10	30	99
Wilsonomyces carpophilus	Badem	5	35	25	12	48	92

Proračun vjerojatnosti razvijanja bolesti provodi se u korisničkom sučelju nakon što korisnik odabere za koje patogene i koju kulturu izvodi proračun. Nakon preuzimanja dovoljne količine podataka temperature, vlažnosti zraka i vlažnosti zemlje

algoritam računa vremena vlažnosti nakon svakog trenutka uzorkovanja i bilježi trenutnu temperaturu. Zatim se prikazuje vjerojatnost pojave ukoliko je duljina vlažnosti $W_{izracunato}$ veće od $W_{min}/f(T_{srednje})$, gdje se srednja vrijednost temperature računa od trenutka zadovoljenja kriterija vlažnosti. Vjerojatnost se skalira tako da ukoliko vrijedi $W_{izracunato} = \frac{W_{min}}{f(T_{srednje})}$ tada je vjerojatnost razvijanja patogena jednaka 20[%] dok ukoliko vrijedi $W_{izracunato} = \frac{W_{max}}{f(T_{srednje})}$ tada je vjerojatnost razvijanja patogena jednaka 100[%]. Na Slici 4.36 prikazane su ovisnosti duljine trajanja vlažnosti W o trenutnoj temperaturi za neke patogene. Prikazani su rezultati promatranog generičkog modela (linija) i eksperimentalno utvrđenih rezultata (točke). Iz prikazanih slika vidljivo je jako dobro slaganje eksperimentalnih rezultata sa modelom. Korisniku je također omogućeno unošenje novih patogena i definiranje parametara prema opisanom generičkom modelu. Kako bi se u potpunosti razumio i implementirao ovaj proračun, konzultiran je rad [47].



Slika 4.36. Profili ovisnosti uvjeta duljine vlažnosti o temperaturi

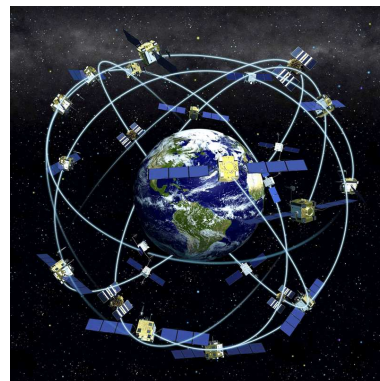
4.4. GPS sustav lociranja modula - SirfStar II

Senzorski modul je izrađen sa idejom što lakše integracije sustava. Od korisnika se nakon kupnje jedino očekuje, postavljanje i paljenje. Iz tog razloga ugrađena je mogućnost samolociranja senzorskog modula. Na osnovi svoje pozicije senzorski modul može zatražiti podatke specifične za područje na kojem se nalazi bez intervencije korisnika. U napisanom programu krajnji korisnik na vrlo jednostavan način može zahtijevati globalne pozicije svih modula koji su u dometu. Nakon zahtjeva podataka i nakon što moduli uhvate dovoljno kvalitetan satelitski signal, njihove pozicije prikažu se u korisničkom sučelju zajedno sa svojim kodovima i svrhom. Korisnik na taj način vrlo jednostavno može preuzimati podatke od svih senzorskih stanica i pri tome znati točnu lokaciju modula na poljoprivrednoj površini.

Za dobivanje pozicije zaslužan ne GPS modul zasnovan na čipu tvrtke *Sirf Technology* zvanom *SirfStar II* [48] prikazanom na Slici 4.37. GPS (eng. Global Positioning System) je sustav koji omogućava pouzdano pozicioniranje širom svijeta na osnovi informacija dobivenih iz satelita. Krajnji korisnik može precizno odrediti svoju poziciju preko geografske širine, duljine i visine. Korištenje GPS sustava ima dugačku prošlost i danas ga koriste milijuni korisnika. GPS sateliti na Slici 4.38 odašilju poruke prema Zemlji koje se sastoje od točnog vremena dobivenog iz vrlo preciznog atomskog sata, orbitalnu informaciju i približne pozicije ostalih satelita. Korisnički sustav na površini Zemlje na osnovi informacija sa više satelita zaključuje o trenutnoj poziciji. Zaključak se donosi na osnovi udaljenosti od svakog satelita tako što se uspoređuju primljena vremena. Kako bi se dobila što točnija informacija, poželjno je koristiti informacije sa što više satelita. Detaljnije informacije o GPS-u dane su u [49].



Slika 4.37. Korišteni čip za dobivanje lokacije *SirfStar II*



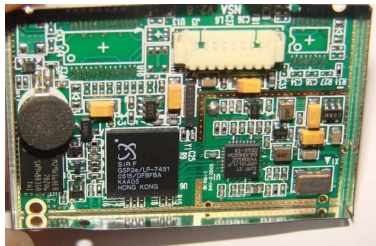
Slika 4.38. GPS sateliti u zemljinoj orbiti

U orbiti se od ožujka 2008. nalazi 31 aktivno emitirajući satelit. Bez dubljeg ulazanja u problematiku GPS pozicioniranja koja je samo po sebi veoma kompleksna, prezentirati će se način dobivanja lokacije senzorskog modula. Većina komercijalno dostupnih GPS prijemnika ima standardiziran i dobro dokumentiran način prezen-

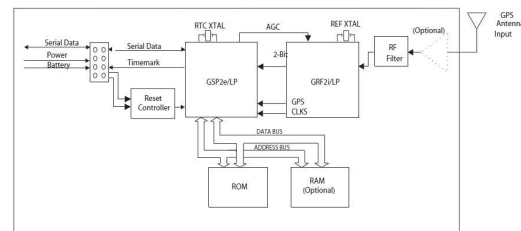
tacije podataka korisniku. Korišteni sustav zasnovan je na prije spomenutom čipu i prikazan je na Slici 4.39. Ovaj modul sadrži svu periferiju potrebnu za rad *SirfStar* čipa kao: antenu, memoriju, elektronički sat te pojačalo i filter GPS signala. Blok dijagram korištenog modula prikazan je na Slici 4.40. Modul posjeduje malo baterijsko napajanje kako bi se kratkotrajno sačuvala informacije o GPS satelitima i omogućio topli start (eng. warm start). Neke od karakteristika korištenog modula prikazane su u Tablici 4.10.

Tablica 4.10. Karakteristike korištenog GPS modula

Napajanje	3-5 [V]
Potrošnja	380 [mW]
Broj satelitskih kanala	12
Preciznost pozicije	± 2 [m]
Preciznost akceleracije	± 0.1 [$\frac{m}{s^2}$]
Hladni start	40 [s]
Topli start	33 [s]
Vrući start	2 [s]
Vrijeme uzorkovanja	1 [s]



Slika 4.39. Korišteni GPS modul baziran na *SirfStar II* čipu



Slika 4.40. Blokovski dijagram korištenog GPS modula

Korišteni modul komunicira sa nadređenim sustavom preko serijske komunikacije (4800,8,1) i razmjenom standardiziranih poruka prema *NMEA* protokolu opisanom u nastavku. Korisnik može pristupiti mnogim podacima iz GPS sustava kao što su:

- Geografska širina - Latitude
- Geografska dužina - Longitude
- Visina - Altitude
- Vrijeme - Time
- Brzina i akceleracija gibanja - Speed/acceleration

zbog zauzetosti UART komunikacije na mikrokontroleru komunikacija sa GPS sustavom morala se implementirati preko standardnih ulazno-izlaznih pinova. Tvornička

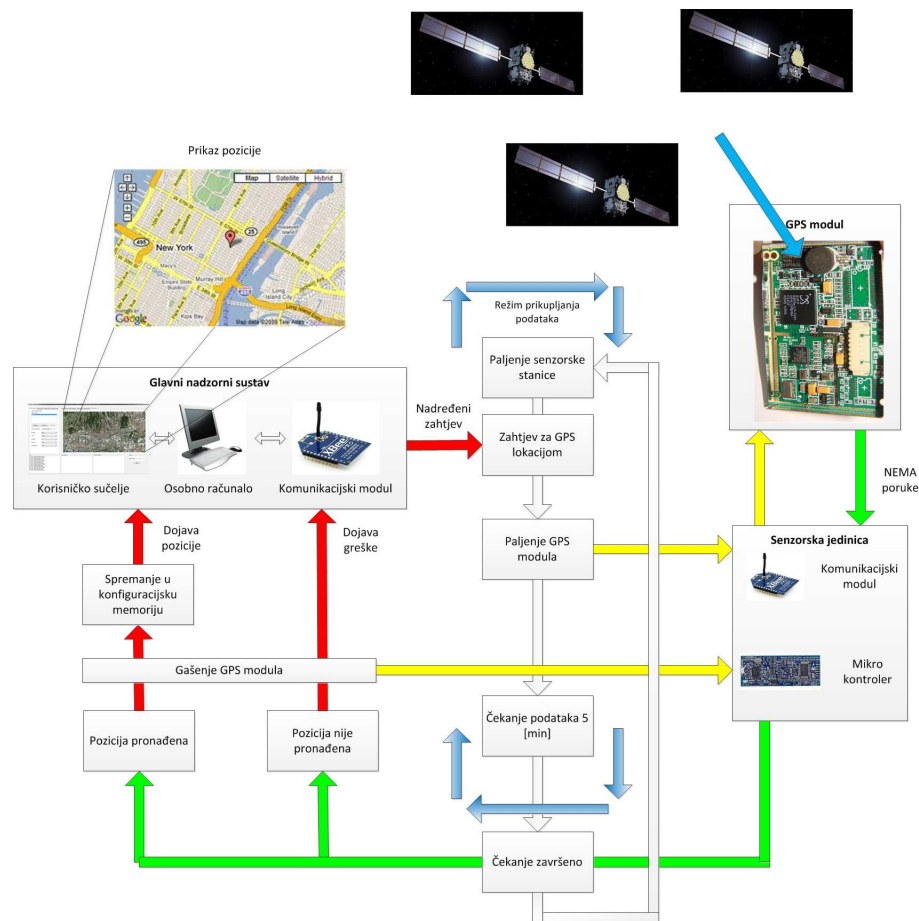
postavka serijske komunikacije modula je $4800 \left[\frac{\text{bit}}{\text{s}}\right]$ što je relativno niska brzina prijenosa. To pojednostavljuje ostvarivanje komunikacije jer se razmjena poruka mora izvesti pomoću postupka *Bit banginga*. Ovaj princip je opisan u nastavku zajedno sa implementiranom programskom podrškom. Najbitnije informacije za senzorsku stanicu su podaci o geografskoj širini i geografskoj dužini, kako bi se dojavila pravilna pozicija nadređenom sustavu. Dobivanje ove informacije opisano je u sklopu pregleda *NMEA* protokola, koji se koristi za razmjenu informacija sa GPS modulom.

Modul se napaja sa $3.3 [V]$ preko zasebnog regulatora napajanja sa *Enable* pinom, što omogućuje gašenje GPS sustava kako bi se uštedila energija. Dobivanje GPS pozicije se provodi samo na zahtjev korisnika i traje $5 [min]$ te pali napajanje GPS modula i provjerava dohvaćanje trenutne pozicije svakih $10 [s]$. Ukoliko pozicija nije dohvaćena u definiranom roku poruka o grešci javlja se korisniku kroz korisničko sučelje. Ukoliko je došlo do greške to znači da GPS nije uspio dohvatiti svoju poziciju, što znači da su vremenski uvjeti nepovoljni ili je senzorski modul postavljen na zatvoreno mjesto. Ukoliko je GPS modul dohvatio svoju poziciju mikrokontroler čeka dok ne istekne definiranih $5 [min]$ kako bi GPS modul dohvatio signal sa što više satelita. Nakon završetka definiranog vremena GPS lokacija se sprema u konfiguracijsku memoriju i nakon toga je dostupna korisniku. Kako bi se uštedila energija GPS modulu se gasi napajanje. Senzorska stanica nikad ne pronalazi svoju lokaciju bez zahtjeva korisnika. Princip dobivanja GPS pozicije prikazan je dijagramom toka na Slici 4.41.

4.4.1. Poruke *NMEA* protokola

NMEA protokol (eng. National Marine Electronics Association) je električna i podatkovna specifikacija za komunikaciju između električnih uređaja kao sonara, anemometara, žiroskopa, kompasa i GPS prijemnika. Razmjena *NMEA* poruka odvija se najčešće preko serijske komunikacije. Poruke se sastoje od ASCII znakova posloženim u točno definirane strukture. Svaka poruka započinje sa ASCII znakom "\$" i imenom poruke. Zatim slijede podaci definirani imenom poruke koji su odvojeni ASCII znakom zarez " , ". Poruka završava znakom "*" i zalihosti koja služi za detekciju grešaka. Informacije o ovom obliku prijenosa informacija *NMEA* protokolom za SirfStar II modul dostupne su u [50].

GPS uređaj može odašiljati *NMEA* poruke koje korisnik definira određenom frekvencijom. Korišteni GPS modul ima tvornički podešeno slanje 4 najčešće korištene GPS *NMEA* poruke frekvencijom od $1 [Hz]$. Za primjenu u ovoj senzorskoj stanici koristi se komunikacija preko standardnih ulazno-izlaznih pinova sa GPS modulom i nije poželjno konstantno primati podatke sa GPS modula jer se time jako opterećuje mikrokontroler. Iz tog razloga nakon svakog paljenja GPS modula, senzorska stanica šalje konfiguracijsku poruku koja zaustavlja automatsko slanje *NMEA* poruka sa modula i tek tada se osposobljava primanje poruka. Senzorska stanica koristi *NMEA* poruku kako bi zatražila odgovor GPS modula sa trenutnom



Slika 4.41. Apstraktan prikaz dobivanja pozicije senzorskog modula

pozicijom.

Sada će se spomenuti samo par *NMEA* poruka i struktura njihovih podataka, koje su korištene u senzorskoj stanici. Korištene poruke koje GPS odašilje senzorskoj stanici su:

- GGA - Podaci o trenutnom vremenu i poziciji
- GLL - Podaci o poziciji (Ne koristi se)
- GSA - Podaci o satelitima (Ne koristi se)
- GSV - Podaci o pojedinim satelitima (Ne koristi se)
- MSS - Podaci o kvaliteti signala (Ne koristi se)

Korištene poruke za konfiguriranje GPS modula su:

- PSRF103 - Zahtjev za podešavanjem ili čitanjem poruka koje se šalju sa GPS modula

- PSRF104 - Podešavanje trenutne pozicije kako bi se brže dobio signal sa satelita

Nakon paljenja GPS modula senzorski modul šalje poruku *PSRF103* kako bi se zaustavilo automatsko slanje 5 poruka. Oblik *PSRF103*

```
$PSRF103,Msg,Mode,Rate,01,*Checksum
```

gdje parametar *Msg* odabire broj poruke koja se želi podesiti prema Tablici 4.11. Parametar *Mode* = 0 definira da se želi podesiti frekvencija automatskog slanja sa parametrom *Rate* dok za izbor *Mode* = 1 odabiremo zahtjev GPS modulu da nakon primitka ove poruke odgovori sa traženom porukom. Modul je podešen za slanje poruka *GGA*, *GLL*, *GSA* i *GSV* svake sekunde, stoga se odmah nakon paljenja šalju četiri *PSRF103* poruke i postavlja se parametar *Mode* = 0 i *Rate* = 0. Senzorska stanica može dobiti sve potrebne podatke iz *GGA* poruke. Stoga, ukoliko je potrebno može se dobiti informacija o trenutnoj poziciji modula pomoću poruke:

```
$PSRF103,00,01,00,01,*Checksum
```

i modul odgovara sa *GGA* porukom.

Tablica 4.11. Odabir parametra *Msg* za konfiguriranje željene *NMEA* poruke

Parametar <i>Msg</i>	Ime poruke
0	GGA
1	GLL
2	GSA
3	GSV
4	RMC
5	VTG
6	MSS

Kako bi se ubrzalo dobivanje GPS pozicije nakon paljenja modula koristi se poruka *PSRF104* kako bi se podesila zadnja poznata pozicija senzorskog modula ukoliko se ona nalazi u konfiguracijskoj memoriji. Oblik *PSRF104* poruke glasi:

```
$PSRF104,Lat,Lon,Alt,96000,TimeOfWeek,WeekNo,12,Config,*Checksum
```

Parametri *Lat*, *Lon* i *Alt* postavljaju se na zadnju poznatu GPS poziciju iz konfiguracijske memorije. Parametar *Lat* upisuje se u rasponu od -90 do 90 stupnjeva dok se parametar *Lon* upisuje u rasponu od -180 do 180 stupnjeva. Zapis parametara *Lat* i *Lon* nije isti kao i kod poruke *GGA* vraćene se GPS modulu i stoga je potrebno napraviti pravilnu konverziju. Parametar *Alt* označuje visinu i zapisuje se u metrima. Parametrima *TimeOfWeek* [s] i *WeekNo* definira se trenutno vrijeme ukoliko je

poznato. Pomoću parametra *Config* možemo definirati koliko smo sigurni da su upisani podaci točni.

Najbitnija poruka koja se na zahtjev senzorske stanice prima sa GPS modula je *GGA*. Pomoću nje može se saznati trenutno vrijeme, trenutna pozicija i broj satelita koji su korišteni za dobivanje pozicije. Organizacija poruke glasi:

```
$GPGGA,Time,Lat,N/S,Lon,E/W,Fix,Sat,1.0,Alt,M,,M,,0000,*Checksum
```

gdje parametri imaju sljedeće značenje:

- *Time* - Trenutno vrijeme zapisano u obliku *hhmmss.sss*: Sati, minute, sekunde, stotinke
- *Lat* - Geografska dužina zapisana u obliku *ddmm.mmmm* u stupnjevima, kutnim minutama i sekundama
- *N/S* - Oznaka sjeverne ili južne polutke koja definira predznak geografske dužine
- *Lon* - Geografska širina zapisana u obliku *dddmm.mmmm* u stupnjevima, kutnim minutama i sekundama
- *E/W* - Istok ili zapad definira predznak geografske širine
- *Fix* - Ukoliko je *Fix*=1 tada je signalizirano da je pozicija valjana
- *Sat* - Broj korištenih satelita za određivanje pozicije
- *Alt* - Trenutna visina u metrima
- *M* - Oznaka jedinice metar

4.4.2. Implementacija GPS pozicioniranja na mikrokontroleru

Za mikrokontroler *LPC1343* napisana je programska podrška koja omogućava razmjenu poruka emulirajući rad *UART* modula sa GPS modulom spojenom na dva standardna ulazno-izlazna pina mikrokontrolera. Još jedan izlazni pin mikrokontrolera koristi se za upravljanje napajanjem GPS modula koji je spojen na zasebni 3.3 [V] linearni regulator sa *Enable* pinom. Bitbang označava način serijske komunikacije kada se koristi programska implementacija protokola postavljanjem stanja pinova u preciznim vremenskim razmacima. Precizni vremenski razmaci za ostvarivanje brzine od 4800 [$\frac{\text{bit}}{\text{s}}$] dobiveni su uporabom 16 bitnog timera postavljenog na mjerenje vremena u preciznosti od 1 [μs]. Pri ovoj brzini komunikacije potrebno je ostvariti vrijeme trajanja bita od 208 [μs] stoga je preciznost korištenog timera bila dostatna.

Komunikacija sa GPS modulom započinje pozivanjem funkcije:

```
void GPSEnable( void )
```

koja dovodi napajanje na GPS modul i šalje poruku za zaustavljanje svih poruka koje GPS modul šalje preko serijske komunikacije. Tek kada su sve poruke zaustavljene, postavlja se prekid na pin za primanje poruka sa GPS modula. Bilo koja poruka koja nakon tog trenutka stigne sa GPS modula registrira se generiranjem prekida u kojemu se obrađuju pristigli ASCII znakovi. Zahtjev za određenom porukom sa GPS modula izvodi se pomoću funkcije:

```
void GPSQueryCommand (uint8_t Command);
```

Odabir poruke koja se traži od GPS modula izvodi se pomoću parametra *Command* i prema vrijednostima prikazanim u Tablici 4.11. Nakon toga je za očekivati da GPS modul odgovori sa traženom porukom. Tek kada se primi kompletna poruka unutar prekida, to se dojavljuje pozivanjem funkcije u kojoj se programira reakcija na primljenu poruku:

```
void GPSResponseRecieved (uint8_t Length);
```

Primljena poruka nalazi se u globalnoj varijabli: *RecievedGPSString*[100] sa duljinom definiranom u parametru *Length*. Unutar prije spomenute funkcije ukoliko se radi od *GGA* poruci, izoliraju se podaci o geografskoj širini, dužini, visini, trenutnom vremenu i broju korištenih satelita. Reakcija na druge poruke nije implementirana. Svi podaci *GGA* poruke spremaju se u globalnu strukturu:

```
typedef struct {
    char DataAcquired;
    uint8_t UTChh;
    uint8_t UTCmm;
    uint8_t UTCss;
    uint32_t LatitudeHigh;
    uint16_t LatitudeLow;
    uint32_t LongitudeHigh;
    uint16_t LongitudeLow;
    uint16_t Altitude;
    uint8_t SatellitesUsed;
    char NorthSouth;
    char EastWest;
} GPSData;
```

Isti podaci se nakon toga pravilno spremaju u konfiguracijsku memoriju iz koje se na zahtjev prosljeđuju nadređenom sustavu. Spomenuti algoritam dobivanja GPS pozicije izvodi se u sklopu reakcije na zahtjev korisnika i neće biti detaljno opisan u okviru ovog rada. Sva komunikacija se završava pokretanjem funkcije:

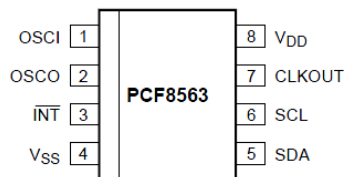
```
void GPSDisable ( void );
```

koja miče prekide sa komunikacijskih pinova i gasi GPS modul radi očuvanja energije.

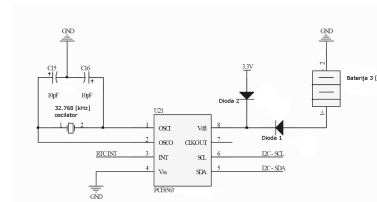
4.5. Mjerenje trenutnog vremena - RTC PCF 8586

Za mjerenje trenutnog vremena koristi se RTC (eng. Real Time Clock) rješenje *PCF8563* [51] tvrtke NXP. Ovakva rješenja se koriste u gotovo svim elektroničkim sklopovima koja moraju imati podatak o trenutnom vremenu. Elektronički satovi imaju veoma malu potrošnju i mogu raditi nakon prestanka napajanja glavnog sklopa pomoću baterije. Potrošnja korištenog RTC čipa iznosi $0.8 [mA]$ za vrijeme izvođenja komunikacije na *I²C* linijama i $0.0000005 [mA]$ za vrijeme mirovanja *I²C* linija.

Elektronički satovi odlikuju se velikom preciznošću mjerenja vremena. Ovisno o korištenom RTC-u, podacima se pristupa ili preko paralelnog sučelja ili serijskih komunikacija kao *I²C* i *SPI*. Korišteni RTC modul posjeduje *I²C* komunikaciju sa adresom $1010001x$. Maksimalna brzina komunikacije je $400 [kHz]$ što je kompatibilno sa ostalom korištenom opremom. Minimalna konfiguracija za rad korištenog RTC-a uključuje vanjski oscilator od $32768 [Hz]$ i napajanje od minimalno $2 [V]$. Svi izlazi čipa su prikazani na Slici 4.42. U senzorskoj stanici korištena je izvedba u SMD varijanti u SO8 kućištu. Vanjski oscilator se koristi kako bi se dobila veća preciznost mjerenja vremena. Dodatno podešavanje se može izvesti ugradnjom promjenjivog kondenzatora za podešavanje frekvencije oscilatora. Točna frekvencija oscilatora jako utječe na točnost mjerenja vremena. Većina kristalnih oscilatora neznatno mijenja frekvenciju sa obzirom na vanjsku temperaturu. Za potrebe senzorske stanice nije bitno izrazito točno mjeriti vrijeme, stoga ova problematika nije razmatrana, no detaljno je obrađena u [52].



Slika 4.42. Svi izlazi čipa *PCF8563*

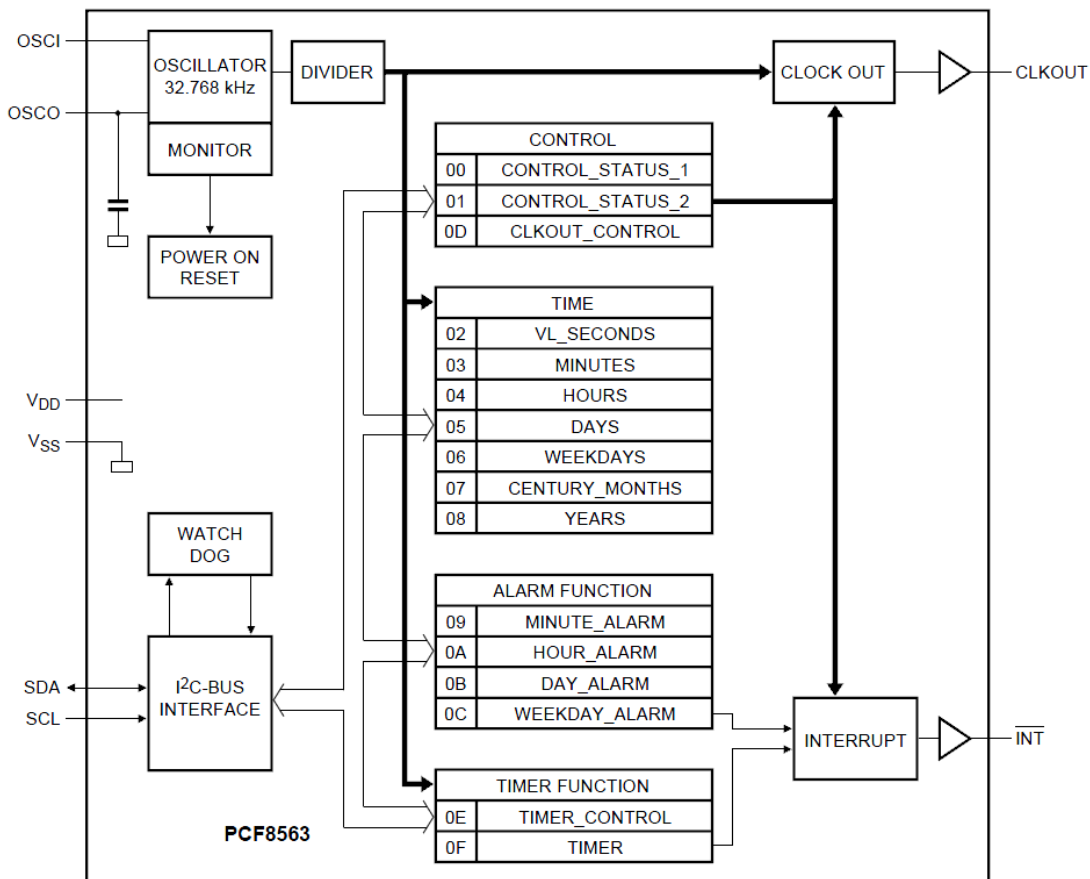


Slika 4.43. Povezivanje RTC čipa *PCF8563*

Povezivanje RTC čipa prikazano je na Slici 4.43. Kako bi se osiguralo kontinuirano napajanje RTC čipa bez obzira na napajanje senzorske stanice koristi se baterija od $3 [V]$. Pomoću dvije diode osigurano je napajanje modula iz napajanja senzorske stanice, kada je napajanje prisutno i iznosi $3.3 [V]$. Tada je potencijal na RTC modulu veći od napajanja baterije i smjer struje prema bateriji je blokirano diodom 1. Kada nestane napajanja senzorskog modula, RTC čip se napaja iz baterijskog napajanja od $3 [V]$. Dioda 2 tada ne dozvoljava smjer struje prema senzorskom modulu. Preciznost oscilatora je osigurana pomoću dvaju kondenzatora od $10 [pF]$ spojenih na vanjski oscilator prema preporuci iz [53].

RTC čip posjeduje i jedan open-drain izlaz koji dojavljuje prekid nadređenom sustavu. Moguće je postaviti alarm na određeno vrijeme i datum. Pri konfiguriranju RTC-a moguće je ostvariti dojavu alarma postavljanjem niske razine na pin \overline{INT} . Nadređeni sustav prepoznaje aktiviranje alarma i izvršava određenu radnju. Nakon reakcije na alarm potrebno je javiti potvrdu RTC-u kako bi se prekid potvrdio i maknuo.

Čitanje i pisanje vremena na RTC provodi se upisivanjem i čitanjem definiranih memorijskih lokacija. Blokova shema RTC-a sa svim memorijskim lokacijama prikazana je na Slici 4.44. Unutar registara *Seconds*, *Minutes*, *Hours*, *Days*,



Slika 4.44. Blokova shema korištenog RTC-a sa memorijskim lokacijama

Weekdays, *Months*, *Years* nalaze se informacije o vremenu, datumu, danu u tjednu i godini. Na tim lokacijama nalaze se vrijednosti zapisane u BCD obliku. Upisivanje vremena provodi se pisanjem u te registre. Potrebno je napomenuti da se prilikom čitanja vremena iz RTC-a zaustavljaju sve operacije upisa novog vremena u registre. Za to vrijeme RTC povećava vrijednost posebnog registra ukoliko je prošla jedna sekunda za vrijeme čitanja trenutnog vremena. Nakon završetka čitanja u tom slučaju se vrijednost sekundi korigira. Na ovaj način RTC može pamtit samo jednu promjenu sekundi dok korisnik čita vrijednost. Stoga je potrebno osigurati da vrijeme

čitanja bude izvedeno unutar manje od jedne sekunde kako bi se eliminirala pogreška. Čitanje se izvodi na frekvenciji od 400 [kHz] i pristup registrima će završiti unutar manje od jedne sekunde.

Prikaz bitnih registara kojima se može pristupiti prikazan je u Tablici 4.12. Unutar registra *CONTROL_STATUS_1* moguće je pokretati (*STOP* = 0) i zaustavljati (*STOP* = 1) brojanje proteklog vremena. Registri *TEST1* i *TEST2* je potrebno postaviti na logičku jedinicu kako bi se uključio normalan režim rada. Registar *CONTROL_STATUS_2* služi za podešavanje postavki prekida. Postavljanjem *AIE* = 1 omogućuje generiranje prekida na alarm. Korišteni RTC može raditi i kao timer, no on se neće koristiti u tom režimu rada. U istom registru nalazi se i zastavica *AF* koja se postavlja u trenutku generiranja prekida. Nakon što korisnik pročita registar *CONTROL_STATUS_2* zastavica *AF* se automatski postavlja u nulu, signalizirajući potvrdu prekida.

Pin \overline{INT} je spojen na digitalni ulaz mikrokontrolera te je također postavljen prekid na negativan brid promjene tog signala. Tada će prekid na RTC-u uzrokovati prekid na mikrokontroleru koji možemo poslužiti. Za potrebe rada sa RTC čipom napisane su sljedeće funkcije:

- ```
date_time_t RTCReadTime();
```

Čita se trenutno vrijeme sa RTC čipa i sprema u strukturu *date\_time\_t* objašnjenu u nastavku.

- ```
void RTCSetTime(date_time_t *dt);
```

Funkcija upisuje vrijeme u RTC definirano strukturom *date_time_t*

- ```
void RTCSetAlarm(uint8_t EnableAlarm, date_time_t *dt, uint8_t Option);
```

Funkcija služi za paljenje (*EnableAlarm* = 1) i gašenje (*EnableAlarm* = 0) alarma na RTC čipu. U trenutku paljenja alarma na RTC čipu, omogućuje se i prekid na mikrokontrolerskom pinu. Strukturom *date\_time\_t* definira se vrijeme kada se želi postaviti alarm. Parametrom *Option* definiramo da li želimo da se alarm pali na minute, sate, dane, ili dane u tjednu. Bilo koja kombinacija odabira je moguća i alarm će se upaliti tek kada su svi odabrani uvjeti zadovoljeni.

U trenutnoj verziji senzorske stanice ne koristi se alarmna funkcija RTC čipa. Sva programska podrška je napravljena te ukoliko je potrebno, alarmna funkcija se vrlo jednostavno može koristiti. Naposljetku bitno je napomenuti način spremanja vremena u memoriju mikrokontrolera. Definirana je struktura *date\_time\_t* koja glasi:

```
typedef struct
{
 uint8_t seconds; // 0 do 59
 uint8_t minutes; // 0 do 59
 uint8_t hours; // 0 do 23 (24-satno vrijeme)
 uint8_t day; // 1 do 31
 uint8_t month; // 1 do 12
 uint8_t year; // 00 do 99
 uint8_t weekday; // 0 = Nedjelja, 1 = Ponedjeljak, itd.
}date_time_t;
```

Tablica 4.12. Raspored podataka u memorijskim lokacijama RTC čipa  
*PCF8563*

| Registar <i>CONTROL_STATUS_1</i> |                              |
|----------------------------------|------------------------------|
|                                  | 7 6 5 4 3 2 1 0              |
| Adresa 0x00                      | TEST 1 x STOP x TEST 2 x x x |

| Registar <i>CONTROL_STATUS_2</i> |                           |
|----------------------------------|---------------------------|
|                                  | 7 6 5 4 3 2 1 0           |
| Adresa 0x01                      | x x x TI_TP AF TF AIE TIE |

| Registar <i>VL_SECONDS</i> |                     |
|----------------------------|---------------------|
|                            | 7 6 5 4 3 2 1 0     |
| Adresa 0x02                | x SEK BCD1 SEK BCD1 |

| Registar <i>MINUTES</i> |                     |
|-------------------------|---------------------|
|                         | 7 6 5 4 3 2 1 0     |
| Adresa 0x03             | x MIN BCD2 MIN BCD1 |

| Registar <i>HOURS</i> |                         |
|-----------------------|-------------------------|
|                       | 7 6 5 4 3 2 1 0         |
| Adresa 0x04           | x x SATI BCD2 SATI BCD1 |

| Registar <i>DAYS</i> |                         |
|----------------------|-------------------------|
|                      | 7 6 5 4 3 2 1 0         |
| Adresa 0x05          | x x DANI BCD2 DANI BCD1 |

| Registar <i>WEEKDAYS</i> |                        |
|--------------------------|------------------------|
|                          | 7 6 5 4 3 2 1 0        |
| Adresa 0x06              | x x x x x Dan u tjednu |

| Registar <i>MONTH</i> |                    |
|-----------------------|--------------------|
|                       | 7 6 5 4 3 2 1 0    |
| Adresa 0x07           | x x x Broj mjeseca |

| Registar <i>YEAR</i> |                         |
|----------------------|-------------------------|
|                      | 7 6 5 4 3 2 1 0         |
| Adresa 0x08          | GODINA BCD2 GODINA BCD1 |

## 5. Memorijski sustav za spremanje podataka i programska podrška

Senzorska stanica posjeduje memorijski sustav za spremanje i pristup podacima mjerenja. Ovak sustav sastoji se od EEPROM i Flash memorije. Skraćenica EEPROM (eng. Electronically Erasable Programmable Read-Only Memory) označava elektroničku memoriju koja omogućava spremanje manjeg broja podataka koji se čuvaju i nakon prestanka napajanja. Današnje EEPROM memorije omogućuju gotovo 1 000 000 operacija pisanja i brisanja. FLASH memorija je razvijena iz EEPROM memorije te u općem slučaju ima puno veći kapacitet i brzinu. I u slučaju EEPROM i FLASH memorije, podaci su organizirani u blokove. Blokovi kod FLASH memorije su znatno veći jer se u većini slučajeva koristi za zapis većeg broja podataka. To omogućuje brže brisanje i pisanje.

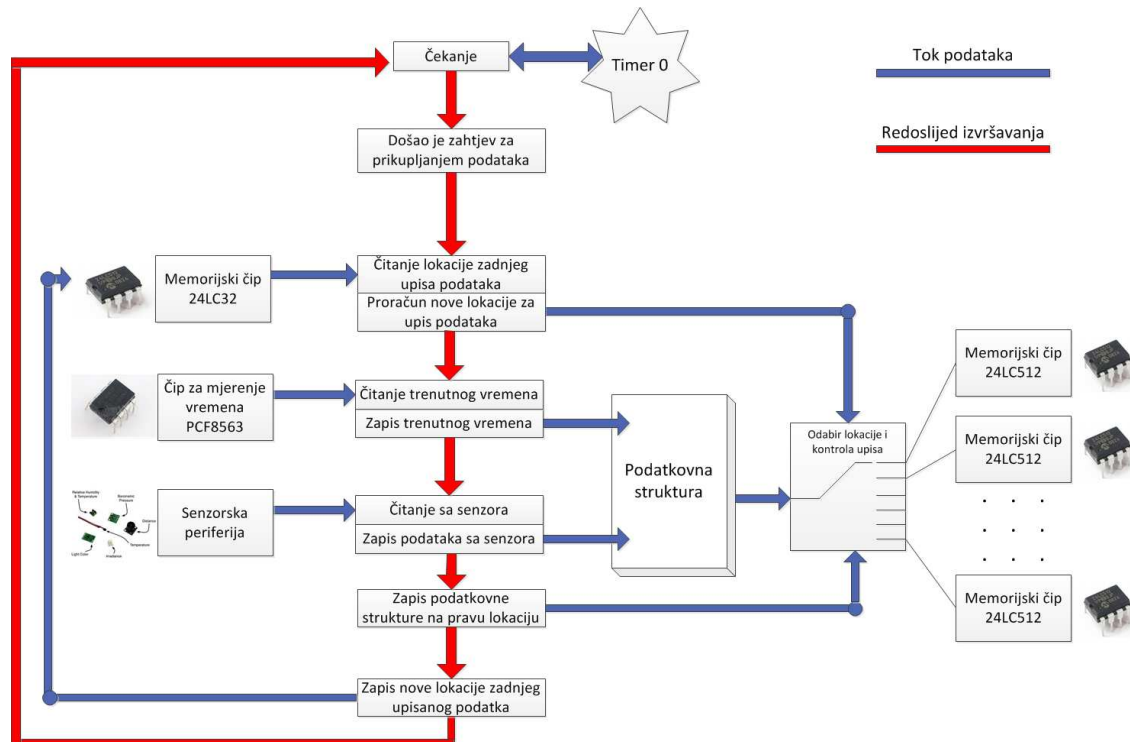
Za potrebe senzorske stanice vrlo je bitno brzo i točno spremati podatke te ih jednako dobro čitati. Princip rada senzorske stanice je da se u vremenskim intervalima  $T_{collect}$  odvija akvizicija, organizacija i spremanje podataka sa senzora. Vrijeme  $T_{collect}$  bira korisnik u intervalu od 1 [min] pa sve do 10 [h] sa rezolucijom od 1 [min]. Protoklo vrijeme između trenutka uzorkovanja mjeri se sistemskim 32-bitnim timerom pod rednim brojem 0. Ukoliko senzorska stanica dobije nalog timera 0 za prikupljanjem podataka, onemogućavaju se sve ostale radnje te se odvija ciklus prikupljanja podataka sa svih senzorskih jedinica. Ovak ciklus može trajati do 5 [s]. Zatim ukoliko je potrebno provodi se slanje upravljačkih signala na upravljačke jedinice. Proces prikupljanja podataka završava spremanjem podataka u memoriju senzorske stanice.

Osnovna verzija senzorske stanice sastoji se od tri tipa memorija za različite upotrebe:

- EEPROM memorija za spremanje senzorskih podataka, kapaciteta 512 [kBit]
- EEPROM memorija za spremanje konfiguracijskih podataka, kapaciteta 64 [kBit]
- FLASH memorija za naknadna proširenja, kapaciteta 16 [MB]

Korištene su EEPROM memorije tvrtke *Microchip*: 24LC64 [54] i 24LC512 [55] te FLASH memorija tvrtke *AMIC*: A25L016 [56]. Na senzorskoj stanici omogućeno je proširenje sa dodatna 4 memorijska čipa 24LC512 za spremanje senzorskih podataka. Time je omogućeno krajnjem korisniku proširenje memorijskog prostora do 2560 [kBit]. U nastavku opisan je način spremanja podataka

Svi memorijski čipovi 24LC512 uključeni na senzorsku pločicu, koriste se kao memorijski prostor za spremanje podataka. Podaci su organizirani u predefimiranu podatkovnu strukturu dok se položaj upisa zadnje podatkovne strukture određuje pokazivačem veličine 32 bita smještenom na lokaciji 0x00 u memorijskom prostoru za spremanje konfiguracijskih podataka. Pokazivač je veličina koja određuje lokaciju upisa zadnje podatkovne strukture u podatkovne čipove. Podatkovna struktura sastoji se od vremenskog trenutka kada je mjerenje uzeto, koje se sprema u 3 byte-a te mjerenja sa senzora koja se spremaju u ostalih 29 byte-ova. Detaljan izgled podatkovne strukture prikazan je u nastavku. Dijagram toka procesa mjerenja i spremanja podataka intuitivno je prikazan na Slici 5.1.



Slika 5.1. Dijagram toka za spremanje podataka u senzorsku memoriju

## 5.1. Realizacija spremanja i čitanja sa EEPROM memorije

Korišteni EEPROM čipovi 24LC512 i 24LC64 tvrtke Microchip omogućuju jednostavnu razmjenu podataka koristeći  $I^2C$  komunikaciju. Čipovi su dostupni u standardnom DIP8 kućištu. Definiranje  $I^2C$  adrese svakog čipa omogućeno je pomoću tri ulaza. Tako je moguće spojiti 8 ovakvih memorija na istu  $I^2C$  sabirnicu dodijeljujući im različite adrese. Ove memorije omogućuju brzinu komunikacije od 400 [kHz] i zato su odličan izbor za našu primjenu. Logičke razine na pinovima A2, A1 i A0 definiraju  $I^2C$  adresu memorije na način:

$$1 \ 0 \ 1 \ 0 \ A2 \ A1 \ A0 \ R_{\overline{W}} \quad (5.1)$$

Kao što je već rečeno memorija 24LC64 koristi se za spremanje postavki, dok su ostale memorije 24LC512 u svrhu spremanja podataka mjerenja. Pomoću pinova A2, A1 i A0 definirane su sljedeće  $I^2C$  adrese za memorije:

- Spremanje postavki 24LC64 -  $I^2C$  Addr: 1010000x
- Spremanje podataka 24LC512 -  $I^2C$  Addr: 1010010x
- Spremanje podataka 24LC512 -  $I^2C$  Addr: 1010011x
- Spremanje podataka 24LC512 -  $I^2C$  Addr: 1010101x
- Spremanje podataka 24LC512 -  $I^2C$  Addr: 1010110x
- Spremanje podataka 24LC512 -  $I^2C$  Addr: 1010111x

Adresa RTC modula glasi 1010001x i stoga se ne može koristiti za adresiranje memorije. Podaci se na memorijske module upisuju na standardni način  $I^2C$  komunikacije, tako da se prvo pošalje adresa sa zahtjevom za pisanje, zatim 2 byte-a adrese na koju se želi upisati i zatim slijed podataka koji se želi upisati. Bitno je napomenuti da prilikom upisa podataka na 24LC512 modul, količina byte-ova ne smije prelaziti 128 byte-a dok kod 24LC64 ne smije prelaziti 32 byte-a. Razlog tomu je što je to veličina ulaznog međuspremnika za upis podataka i ukoliko se spremnik prepuni dolazi do gubljenja podataka. Kao što je rečeno, EEPROM memorija je organizirana u sektore i potrebno je osigurati da prilikom upisa podataka krenuvši od zadane memorijske lokacije, ne prijeđe granica sektora za vrijeme sekvencijalnog upisivanja podataka. Granice sektora za 24LC512 su na memorijskim lokacijama:

$$[128n, \ 128n + 127], \quad n = 0, \dots, n_{max} \quad (5.2)$$

odnosno na lokacijama 0, 127, 128, 255 itd. Za memoriju 24LC64 vrijede granice koje se ne smiju prijeći prilikom upisa podataka:

$$[32n, \ 32n + 31], \quad n = 0, \dots, n_{max} \quad (5.3)$$

odnosno na lokacijama 0, 31, 32, 63 itd. Ukoliko se pokuša upisati preko granica sektora tada će se ti podaci krenuti upisivati na početak sektora koji je prvotno adresiran. Stoga je potrebno programskom podrškom izbjeći ovakvu pogrešku. Memorijski čipovi za spremanje senzorskih podataka imaju veličinu od 512 [*kBit*]. Adresiranje se odvija prema byte-ovima odnosno postoji 64 [*kB*] adresnog prostora na svakom čipu. Broj bitova za zapisivanje adrese iznosi:

$$64000 < 2^{16}, \quad n = 16 \quad (5.4)$$

Kako se može spojiti do 5 čipova tada veličina adresnog prostora iznosi  $5 \cdot 64000 = 320000$  byte-a. Ta se vrijednost može zapisati koristeći 19 bita ali odabran je memorijski prostor od 32 bita za pohranu pokazivača zadnjeg upisanog podatka. Prije svakog pokretanja u programskom kodu potrebno je definirati broj spojenih memorijskih modula kako se mikrokontroler pravilo mogao adresirati sve čipove. Iako se na svakom memorijskom čipu koristi lokalna adresa u rasponu od 0 do 64000, svi čipovi se adresiraju globalnom memorijskom lokacijom na način:

- EEPROM 1 - *I<sup>2</sup>C* Addr: 1011010x, Globalno adresiranje: 0-63999
- EEPROM 2 - *I<sup>2</sup>C* Addr: 1011011x, Globalno adresiranje: 64000-127999
- EEPROM 3 - *I<sup>2</sup>C* Addr: 1011101x, Globalno adresiranje: 128000-191999
- EEPROM 4 - *I<sup>2</sup>C* Addr: 1011110x, Globalno adresiranje: 192000-255999
- EEPROM 5 - *I<sup>2</sup>C* Addr: 1011111x, Globalno adresiranje: 256000-319999

Pokazivač je spremljen u 32 bita na memorijsku lokaciju nula unutar memorije 24LC64 za spremanje konfiguracijskih podataka. Napisane su sljedeće funkcije za mikrokontroler kako bi se olakšalo dohvaćanje pokazivača, spremanje novog pokazivača, te spremanje podatkovne strukture u memoriju za pohranu podataka:

- ```
void EEPROMInit(void);
```

Inicijalizira *I²C* komunikaciju prema memorijama. Prilikom svakog pokretanja mikrokontrolera potrebno je pozvati ovu funkciju.

- ```
void EEPROMWriteDataPointer (uint32_t pointer);
```

Funkcija upisuje novu vrijednost pokazivača koja je definirana 32 bitnom vrijednošću ulaznog parametra *pointer*.

- ```
uint32_t EEPROMReadDataPointer ();
```

Funkcija vraća 32 bitnu vrijednost pokazivača u rasponu definiranom sa brojem spojenih memorijskih čipova. Pokazivač se čita sa memorijske lokacije 0 čipa 24LC64 za spremanje konfiguracijskih podataka

```
void EEPROMIncreaseDataPointer (uint16_t offset);
```

Funkcija povećava vrijednost pokazivača za vrijednost u broju byte-ova definiranu parametrom *offset* i zapisuje ga na istu memorijsku lokaciju. Ukoliko bi pokazivač prešao vrijednost memorijskog prostora na dostupnim memorijskim čipovima, vrijednost pokazivača se postavlja na 0.

```
void EPROMWriteNewDataPacket (uint8_t *buffer);
```

Funkcija sprema podatkovnu strukturu kao niz byte-ova u memorijski prostor za spremanje senzorskih podataka na lokaciju definiranu pokazivačem. Veličina podatkovne strukture je unaprijed definirana i funkcija se brine o čitanju pokazivača, upisivanjem podatkovne strukture na ispravnu lokaciju i na ispravni memorijski čip te naposljetku o zapisivanju nove vrijednosti pokazivača.

```
void EEPROMReadDataPacketFull (uint8_t *buffer, uint32_t pointer, ←
date_time_t *TimeTrace);
```

Funkcija čita podatkovnu strukturu sa memorijske lokacije pokazivača definirane parametrom *pointer* i vraća podatke na toj lokaciji i strukturu sa vremenom kada su podaci zapisani. Ova struktura opisana je u nastavku.

```
void EEPROMFlash();
```

Pozivom ove funkcije briše se sadržaj svih memorijski čipova i postavlja se vrijednost pokazivača na 0.

Također su napisane funkcije za upisivanje dijagnostičkih poruka u konfiguracijsku memoriju:

```
void EPROMWriteDiagnosticMsg (uint16_t pointer, uint8_t MsgNumber, ←
uint8_t *buffer);;
```

Na memorijsku lokaciju definiranu parametrom *pointer* zapisuje dijagnostičku poruku pod rednim brojem *MsgNumber* i tekstom u polju *buffer*. Bitno je osigurati da redni brojevi rastu sa višim memorijskim lokacijama na kojima se poruke upisuju. Ova funkcija se koristi samo za vrijeme programiranja memorije prije predaje krajnjem korisniku kako bi se definirale sve moguće dijagnostičke poruke.

```
void EEPROMWriteNewDiagnosticMsg (uint8_t MsgNumber);
```


Funkcija upisuje novu dijagnostičku poruku u stack na memorijsku lokaciju ispred posljednje upisane poruke. Ostvareno je vladanje cikličkog spremnika i upisivanje novog pokazivača na trenutno upisanu poruku. Također se upisuje i vremenski trenutak u skladu sa prethodnim opisom.

```
uint32_t EEPROMReadDiagnosticMsg (uint8_t LastMsgNumber, date_time_t *↔
TimeTrace, uint8_t *buffer);
```

Funkcija vraća poruku na stacku definiranu parametrom *LastMsgNumber*. Ukoliko je *LastMsgNumber* = 0 tada se vraća zadnja upisana poruka a za *LastMsgNumber* = 1 se vraća predzadnja opisana poruka. Vrijednosti *LastMsgNumber* se smije kretati od 0 do 9. Poruka se vraća u obliku strukture sa vremenom *TimeTrace* i niza od 16 ASCII znakova *buffer*. Ove informacije se koriste pri lokalnom ili daljinskom korisničkom zahtjevu.

```
void EEPROMReadMemoryOrganization (uint8_t *buffer);
```

Funkcija vraća informacije o organizaciji spremanja mjerenih podataka u podatkovnu memoriju. Po potrebi se informacija prosljeđuje na zahtjev nadređenog sustava.

5.2. Organizacija memorijskog prostora

Memorijski prostor za spremanje podataka mjerenja organiziran je u niz podatkovnih struktura duljine 32 byte-a. Podatkovna struktura sastoji se od 4 byte-a u kojem se nalazi vrijeme kada je uzeto mjerenje. U 3 byte-a vremenskog trenutka nalaze se podaci o vremenu u minutama i satima kada je uzeto mjerenje, te informacija o danu, mjesecu i godini:

- Minute - 6 bita → 0 do 59
- Sati - 5 bita → 0 do 23
- Dani - 5 bita → 1 do 31
- Mjeseci - 4 bita → 1 do 12
- Godine - 4 → 0 do 15
- Ukupno - 24 bita=3 byte-a

Informacija o godini zapisana je u vrijednostima od 0-15 stoga se prava trenutna godina može izračunati kao pročitana vrijednost + 2000. Cijela podatkovna struktura ima 32 byte-a. Za spremanje mjerenja koristi se preostalih 29 byte-a na način:

- Temperatura zraka - 16 bit

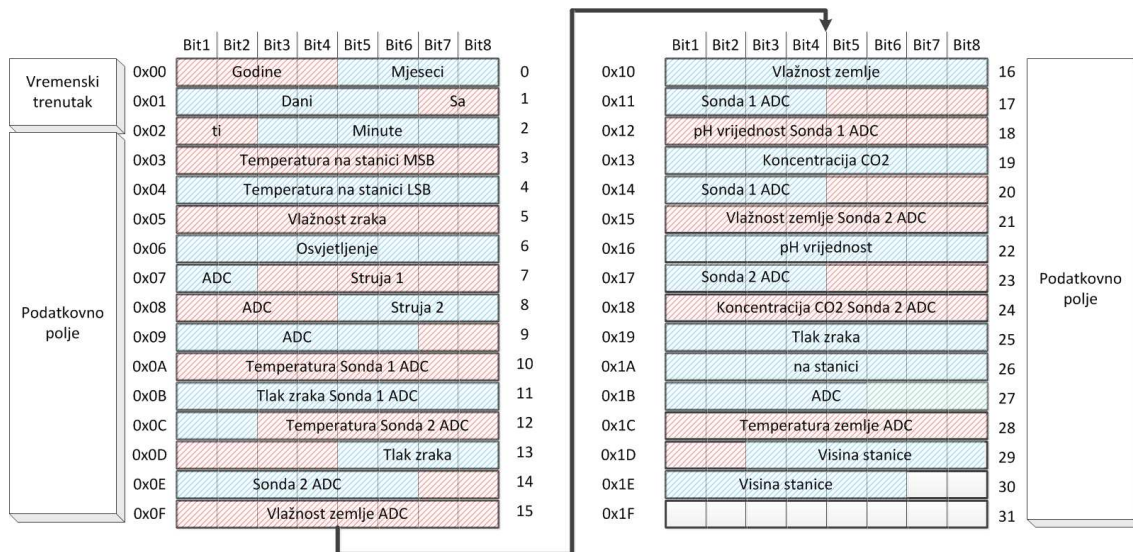
- Vlažnost zraka- 8 bit
- Osvjetljenje - 10 bit
- Struja 1 - 10 bit
- Struja 2 - 10 bit
- Temperatura - Sonda 1 - 10 bit
- Tlak zraka - Sonda 1 - 10 bit
- Temperatura - Sonda 2 - 10 bit
- Tlak zraka - Sonda 2 - 10 bit
- Mjerenje vlažnosti zemlje - 10 bit
- Vlažnost zemlje - Sonda 1 - 12 bit
- PH vrijednost - Sonda 1 - 12 bit
- Koncentracija CO_2 - Sonda 1 - 12 bit
- Vlažnost zemlje - Sonda 2 - 12 bit
- PH vrijednost - Sonda 2 - 12 bit
- Koncentracija CO_2 - Sonda 2 - 12 bit
- Tlak zraka na stanici - 24 bit
- Mjerenje temperature zemlje - 10 bit
- Mjerenje trenutne visine - 12 bit

Organizacija podatkovne strukture radi lakšeg razumijevanja prikazana je na Slici 5.2. Ukupna organizacija memorije za spremanje podatkovnih struktura prikazana je na Slici 5.3. Sada možemo izračunati broj podataka koji se može spremati bez brisanja prethodnih podataka u ovisnosti o vremenu uzorkovanja. Broj dana koje senzorska stanica može spremati podatke sa samo jednim 24LC512 čipom glasi:

$$n[dan] = \frac{2000 \cdot T_{collect}}{1440} \quad (5.5)$$

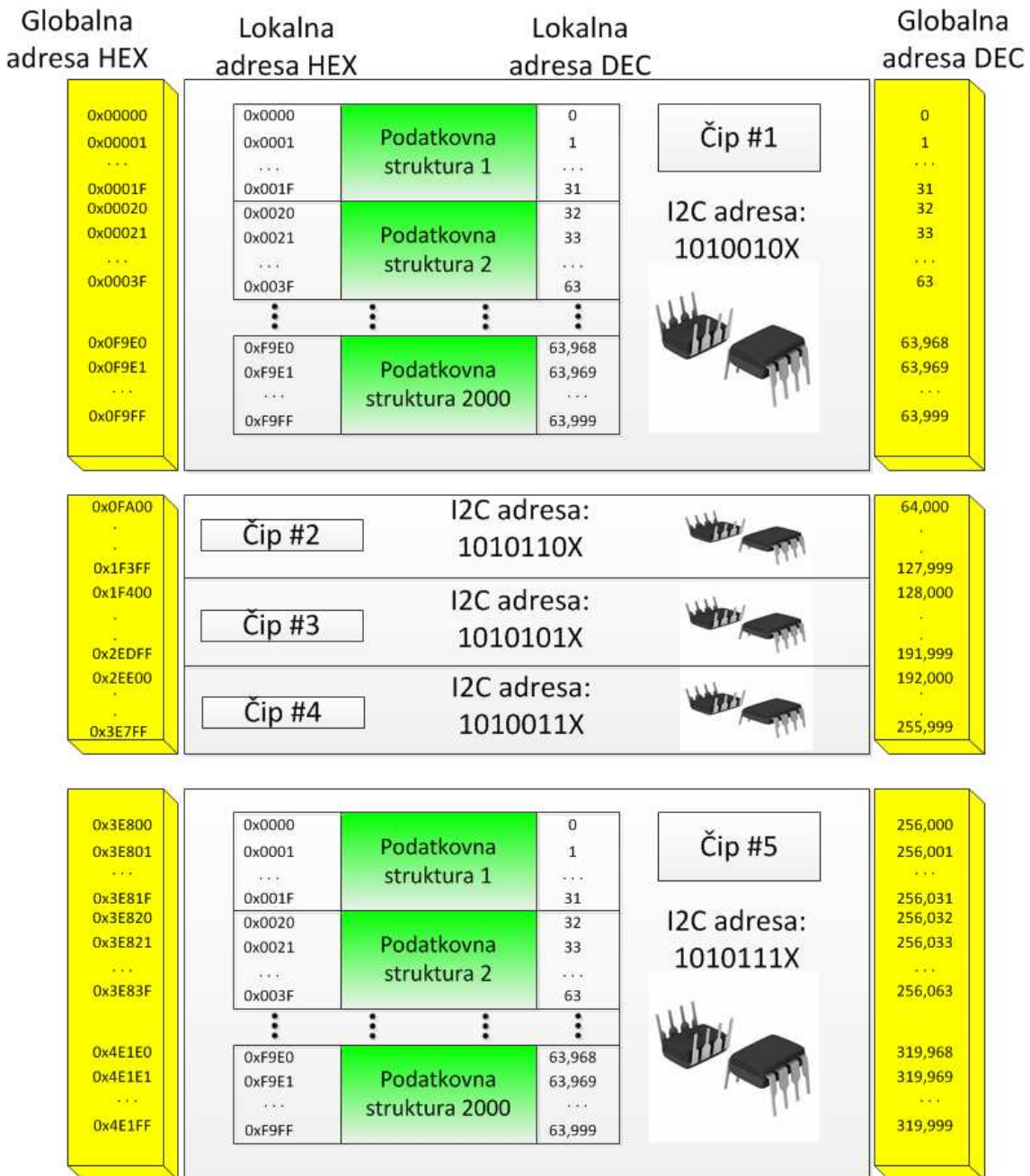
gdje je $T_{collect}$ vrijeme između prikupljanja podataka u minutama n broj dana koliko se podaci dugo mogu spremati. Ukoliko uzmemo vrijeme prikupljanja uzoraka $T_{collect} = 10 [min]$ tada sa jednim 24LC512 memorijskim čipom možemo spremati približno 13 dana podataka. Ukoliko se koriste sva raspoloživa mjesta za memoriju tada se mogu spremati podaci preko 2 mjeseca.

Unutar konfiguracijske memorije čipa 24LC64 nalaze se odabrane postavke modula, GPS lokacija, vrijeme paljenja itd. Točan raspored glasi:



Slika 5.2. Memorijska organizacija podatkovne strukture

- Pokazivač na zadnji upisani podatak u memoriju - 32 bit
- Vrijeme i datum paljenja senzorskog modula - 24 bit
- Podaci o GPS lokaciji modula - 112 bit
 - Vrijeme dobivanja GPS lokacije
 - GPS lokacija latitude
 - GPS lokacija longitude
 - GPS lokacija altitude
 - Broj korištenih satelita
- Podešeno vrijeme prikupljanja podataka u minutama - 16 bit
- Stack za 10 dijagnostičkih poruka - ukupno 320 bit:
 - Vrijeme i datum generiranja dijagnostičke poruke - 24 bit
 - Redni broj poruke - 8 bit
- Tablica poruka koje se mogu generirati - Maksimalno 20 poruka - 2720 bita:
 - Redni broj poruke - 8 bit
 - Tekst poruke - 128 bit = 16 ASCII znakova
- Pokazivač na zadnju upisanu dijagnostičku poruku - 16 bit
- Veličina podatkovne strukture u bitovima - 8 bit
- Podaci o organizaciji podatkovne strukture za spremanje mjerenja. Maksimalno 20 podataka - 2880 bita:



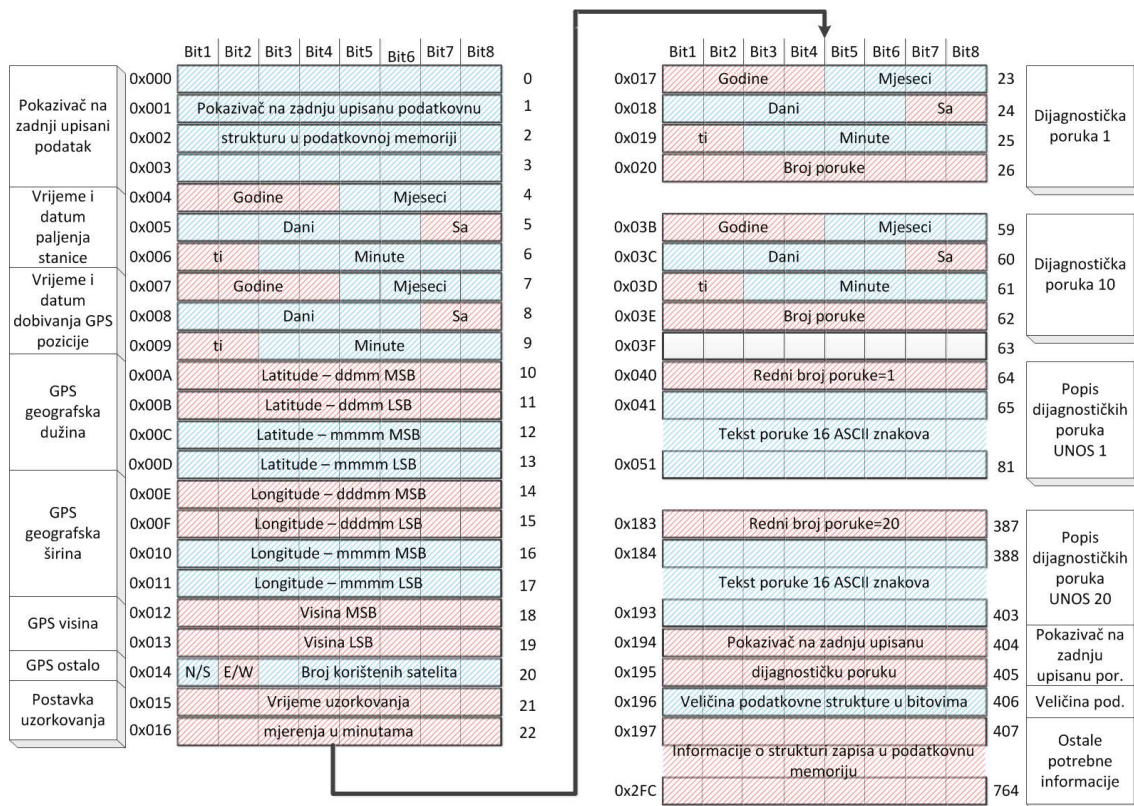
Slika 5.3. Memorijska organizacija spremanja podatkovnih struktura

- Redni broj podatka - 8 bit
- Ime podatka - 128 bit = 16 ASCII znakova
- Duljina podatka u bitovima - 8 bit

Prikaz točnih memorijskih lokacija sa podacima na memorijskom čipu sa konfiguracijskim podacima prikazan je na Slici 5.4. Dijagnostičke poruke definirane su u memoriji sa svojom pozicijom i nizom od 16 ASCII znakova. Nakon što se dogodi

akcija koja zahtjeva spremanje dijagnostičke poruke mikrokontroler upisuje vrijeme kada je dijagnostička poruka nastala i redni broj poruke. Dijagnostičke poruke se nižu krenuvši od memorijske lokacije 59 pa sve dok se ne upiše 10 poruka. Zatim se kreće od početne lokacije tako da se brišu prethodne poruke. Upis zadnje dijagnostičke poruke definiran je 16 bitnim pokazivačem na memorijskoj lokaciji 404.

Kao posljednji podaci unutar konfiguracijske memorije nalaze se informacije o podatkovnoj strukturi kako bi nadređeni sustav mogao u bilo kojem trenutku dobiti informaciju o svim mjerenjima stanice i rasporedu bitova unutar strukture koju preuzima. Ovo može biti korisno ukoliko postoje senzorske stanice sa drugačijim mjerenjima i drugačijom organizacijom podatkovne strukture. Nadređeni sustav preko daljinskog pristupa može zatražiti ove informacije kako bi se pravilno prepoznali preuzeti podaci. Memorijski prostor sa dijagnostičkim porukama i informacijama o podatkovnoj strukturi upisuje se samo jednom prilikom predaje krajnjem korisniku i nakon toga nije moguće više promijeniti unos bez prethodnog reprogramiranja. U konačnoj verziji senzorske strukture raspored podataka u konfiguracijskoj memoriji sa Slike 5.4 se neznatno razlikuje.



Slika 5.4. Memorijska organizacija spremanja konfiguracijskih podataka

5.3. Pretraživanje memorijskog prostora

Na zahtjev nadređenog sustava potrebno je pronaći tražene podatke prema zadanom kriteriju i vratiti ih nadređenom sustavu. Kriterij za pronalaženje podataka je početno vrijeme i datum te krajnje vrijeme i datum. Svi podaci između definiranih vremena moraju biti pronađeni u memoriji. Budući se memorija popunjava sekvencijalno po memorijskim lokacijama kako vrijeme prolazi tako je pronalaženje podataka znatno pojednostavljeno.

Nakon primitka zahtjeva algoritam započinje čitati podatke od zadnje upisane memorijske lokacije. Čita se vremenski trenutak spremanja podataka u prva tri byte-a podatkovne strukture i ukoliko je to vrijeme veće od zadanog krajnjeg trenutka tada se nastavlja čitanje prethodnog podatka. Nakon što se pronađe prvi podatak čije je vrijeme uzorkovanja ranije nego definirano vrijeme, započinje se čitanje i prosljeđivanje podataka. Pri svakom prosljeđivanju podatka čita se vrijeme uzorkovanja i uspoređuje sa krajnjim zahtjevanim vremenom uzorkovanja. Pri tome je bitno imati u vidu da ukoliko svi podaci u memoriji zadovoljavaju uvjet, tada bi se pretraživanje vrtilo u krug po svim memorijskim lokacijama. Zato je uključeno osiguranje da nakon što se pročita maksimalni broj podataka koji stane u memoriju odnosno:

$$n > 2000 \cdot n_{chipova} \quad (5.6)$$

Tada se prekida slanje podataka i završava pretraživanje.

Kada se pročita zadnji podatak unutar definiranog raspona šalje se poruka da je slanje završeno i broj podatkovnih struktura koje zadovoljavaju uvjet. Nadređeni sustav može provjeriti da su svi podaci primljeni, tako da uspoređi broj primljenih podataka i dobiveni broj poslanih podataka. Napisana je sljedeća funkcija za pretraživanje memorijskog prostora u kojoj je implementirano i slanje nadređenom sustavu:

```
uint16_t EEPROMDataPacketFind (date_time_t *StartTime, date_time_t *EndTime, ←
    uint16_t Xbee_address);
```

funkcija vraća broj podataka koji zadovoljavaju uvjet definiran vremenima *StartTime* i *EndTime*. Svi podaci se šalju na 16 bitnu adresu XBee modula *Xbee_address*.

6. Sustav prijenosa i prezentacije podataka

Sustav prijenosa i prezentacije podataka sastoji se od mogućnosti lokalnog pregleda podataka te daljinski pregled podataka. Lokalni pregled podataka omogućen je na samoj senzorskoj stanici te se sastoji od 16 segmentnog LCD ekrana te interface-a za komunikaciju sa korisnikom. Pomoću LCD ekrana korisnik na licu mjesta može vidjeti posljednje prikupljene podatke senzora. Odabir je omogućen pomoću dva tipkala spojena na GPIO kontroler *LPC* modula. Mogućnosti lokalnog prikupljanja podataka su vrlo ograničene, odnosno korisnik može pristupiti samo zadnjim izmjerenim podacima te određenim brojem dijagnostičkih poruka kao, alarmi, greške itd. Razlog tomu je očigledno ograničenje 16 segmentnog LCD ekrana za pristup podacima. Implementacija ispisa poruka na LCD ekranu je prikazana u nastavku.

Dva tipkala dostupna korisniku služe za navigaciju podacima. Prikaz prednje strane senzorskog modula vidljiv je na Slici 2.38. Pri prvom pritisku bilo kojeg tipkala dovodi se napajanje na LCD modul. Desno tipkalo služi za pregled čitanja senzora dok lijevo tipkalo služi za pregled dijagnostičkih poruka samog modula. Nakon pritiska bilo kojeg tipkala, ponovnim pritiskom mijenja se informacija na LCD ekranu. Nakon što korisnik 10 sekundi nije pritisnuto tipkalo ponovno, mikrokontroler zaključuje da je korisnik završio pregled podataka i gasi napajanje prema LCD ekranu kako bi se uštedila energija. Odabir prikaza na LCD ekranu realiziran je pomoću automata stanja za desno tipkalo i automata stanja za lijevo tipkalo. Popis poruka pri pregledu senzorskih podataka pomoću desnog tipkala glasi:

- Vrijeme zadnjeg prikupljanja podataka - "Time: xx:xx:xx"
- Trajanje rada senzorske stanice - "Working: xxx hr"
- Temperatura zraka - "Temp: xx C"
- Vlažnost zraka- "Humidity: xx %"
- Tlak zraka - "Pres: xxxxxx Pa"
- Osvjetljenje - "Lum: xxxx %"
- Točka rosišta - "Dew: xxx"
- Visina modula - "Alt: xxx m"

- Stanje baterije - "Bat: *xx* %"
- Temperatura zemlje - "Soil Temp *xx* C"
- Vlažnost zemlje - "Soil Hum *xx* %"
- Vlažnost zemlje - Sonda 1 - "Hum1: *xx* %"
- Temperatura - Sonda 1 - "Temp1: *xx* C"
- Tlak zraka - Sonda 1 - "Pres1: *xxxxxx* Pa"
- PH vrijednost - Sonda 1 - "PH1: *xx* pH"
- Koncentracija CO_2 - Sonda 1 - "CO2_1: *xxxxx* ppm"
- Vlažnost zemlje - Sonda 2 - "Hum2: *xx* %"
- Temperatura - Sonda 2 - "Temp2: *xx* C"
- Tlak zraka - Sonda 2 - "Pres2: *xxxxxx* Pa"
- PH vrijednost - Sonda 2 - "PH2: *xx* pH"
- Koncentracija CO_2 - Sonda 2 - "CO2_2: *xxxxx* ppm"

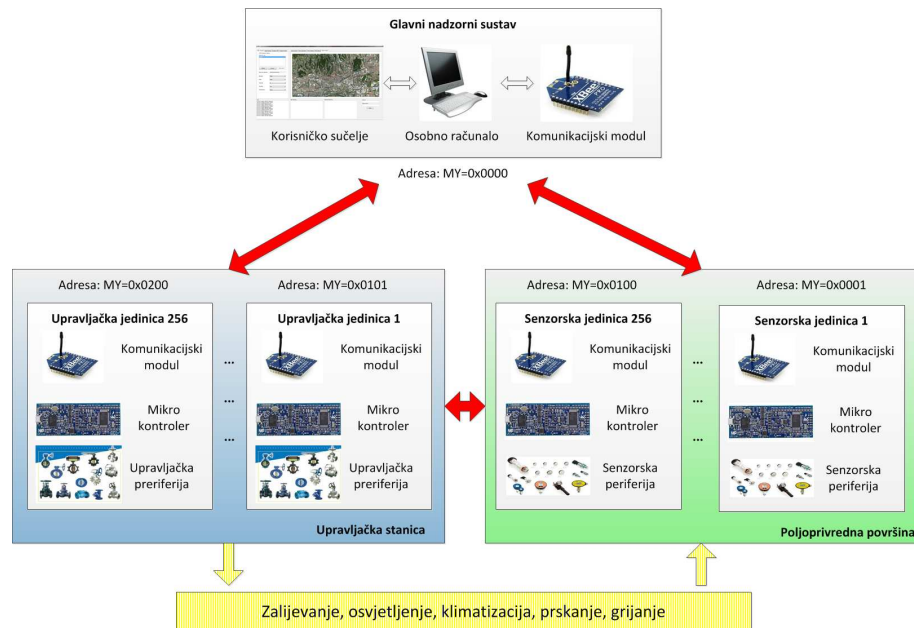
Gdje *xxx* označava trenutnu vrijednost koju korisnik promatra. Sve informacije se povlače iz EEPROM memorijskog sustava, sa lokacije zadnjeg upisanog podatka. Ukoliko određena sonda nije bila spojena pri zadnjem mjerenju, umjesto 4 poruke za određenu sondu ispisati će se poruka "Probe 1 NC" ili "Probe 2 NC". Kao primjer dijagnostičkih poruka koje se prikazuju lijevim tipkalom možemo spomenuti:

- GPS lokacija određena - "GPS Lock"
- Odpojena sonda - "Probe1 DCon"
- Pripojena sonda - "Probe1 Con"
- Pristup sustavu daljinski - "Remote Data Req"
- Prazna baterija - "Low Bat"

Postoji još mnogo dijagnostičkih poruka koje nisu spomenute. Bitno je napomenuti da se spremanje dijagnostičkih poruka sprema na stack duljine 10 poruka. Stoga korisnik može pristupiti samo zadnjih 10 poruka, jer se nakon dolaska nove dijagnostičke poruke stare brišu. Krajnjem korisniku omogućuje se izbor poruka koje želi prikazati. Odabir novih poruka za prikazivanje zahtjeva ponovno reprogramiranje mikrokontrolera. Podešavanje sustava nije omogućeno lokalno, već izričito daljinski.

Daljinski pristup sustavu odvija se preko RF komunikacije koristeći XBee-PRO module te nadređeno računalo sa programskom podrškom. U ovom poglavlju opisati će se princip rada RF komunikacije dok je pogled sa strane krajnjeg korisnika

biti opisan u uvodu. Daljinski pristup (eng. Remote Access) omogućuje pristup i konfiguriranje senzorskog modula u potpunosti. Komunikacijski sustav sastoji se od proizvoljnog broja senzorskih i upravljačkih stanica te jednog nadređenog računala. Prikaz topologije komunikacijske mreže prikazan je na Slici 6.1. Svaki čvor na komunikacijskoj mreži jednoznačno je definiran 16 bitnom adresom zvanom *MY*. Senzorski i upravljački čvorovi sadrže mikrokontrolerski sustav *LPC1343* za obradu i slanje informacija povezan sa XBee-PRO modulom dok se nadzorni sustav sastoji od računala, programske podrške u C#-u i XBee-PRO modula.



Slika 6.1. Pregled komunikacijskog sustava

Definirani su rasponi adresa za određene dijelove sustava. Tako je definirano da senzorske jedinice imaju komunikacijsku adresu u rasponu od 0x0001 do 0x00FF dok upravljačke jedinice imaju određenu adresu u rasponu od 0x0100 do 0x01FF. Nadređeni sustav može imati bilo koju adresu izvan raspona definiranih adresa za senzorske i upravljačke stanice ali je poželjno koristiti adresu 0 radi jednostavnosti. Bitno je da stanice imaju adrese u definiranom rasponu kako bi ih nadređeni sustav prilikom skeniranja mreže pravilno klasificirao. Kao što je prikazano na Slici 6.1, dvosmjerna komunikacija se vrši između svih cjelina. Nadređeni sustav uvijek može zahtijevati podatke od senzorskih i upravljačkih stanica, te vršiti konfiguraciju istih. Senzorska jedinica komunicira sa točno određenom upravljačkom jedinicom koja upravlja veličinama na svom području. Također je moguće da više senzorskih stanica upravlja jednom upravljačkom stanicom prema logici koju određuje korisnik.

Koncept dodjeljivanja adresa kao i princip razmjena poruka pomoću bežične komunikacije prikazan je u nastavku.

6.1. X-Bee komunikacija za bežični pristup podacima

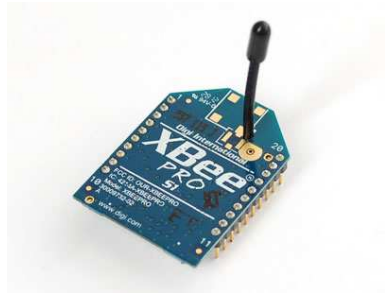
XBee modul [4] je kompaktni RF tranciever tvrtke Digi International. Od prvog pojavljivanja do danas XBee je postala vrlo popularna platforma za bežični prijenos podataka. XBee koristi potpuno implementirani protokol za razmjenu podataka između modula, te posjeduje mogućnosti za jednostavno stvaranje robusne mreže bežično povezani senzora (eng. Wireless Sensor Network). Neke od spomenutih implementiranih mogućnosti su adresiranje pojedinih modula, potvrda primitka poruke, ponavljanje slanja i još mnoge druge mogućnosti. Pored komunikacijskih mogućnosti, inženjeri iz Digi Internationala osigurali su da XBee radi kao samostalno rješenje, tako što su uključili digitalne ulaze i izlaze, analogne ulaze te PWM generatore na sam modul. Zbog spomenutih mogućnosti za neke primjene moguće je u potpunosti eliminirati potrebu za mikrokontrolerskim sustavom.

XBee modul dolazi u dvije varijante: XBee i XBee-PRO. Osnovna razlika između ova dva modula je u daljini prijenosa podataka i potrošnji. Oba modula koriste se 2.4 [GHz] prostorom te IEEE 802.15.4 protokolom poznatijim kao: "Low-Rate, Wireless Personal Area Network", odnosno protokolom zamišljenim za razmjenu malog broja podataka između čvorova na mreži. Kao dio protokola postoje sljedeće bitne karakteristike:

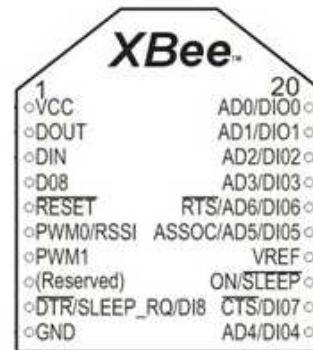
- CCA (eng. Clear Channel Assessment) - Prije slanja modul provjerava zauzetost frekvencije
- Adresiranje - Odredište slanja poruke definirano je 16 ili 64 bitnom adresom čvora na mreži, što omogućuje komunikaciju između više od 64 000 čvorova
- Provjera greške - Implementirana je provjera greške u obliku generiranja i provjere zalihosti (eng. Checksum)
- Ponavljanje slanja - Čvor koji odašilje poruku zahtjeva potvrdu od čvora koji prima poruku da bi se završilo slanje. Ukoliko potvrda nije primljena slanje se ponavlja do 3 puta, prije prijave greške korisniku

XBee moduli osiguravaju kvalitetnu komunikaciju do 30 [m] unutar zatvorenog prostora te do 90 [m] na otvorenom prostoru. XBee-PRO moduli imaju veću snagu te omogućuju komunikaciju do 100 [m] u zatvorenim prostorima i približno 1600 [m] na otvorenom prostoru. Domet slanja i primanja očituje se i u većoj potrošnji XBee-PRO modula koja iznosi 250 [mA] prilikom slanja, u usporedbi sa XBee modulom koji troši 45 [mA]. Za senzorske module odabrana je XBee-PRO varijanta zbog potrebe za većim dometom. Maksimalna brzina komunikacije iznosi 250 [kbps] što je zadovoljavajuća brzina za naše potrebe. Ukoliko se za spremanje podataka koriste dvije EEPROM memorije od 512 [kBit] tada se razmjena svih podataka može završiti u vremenu od par sekundi. Ukoliko se u to vrijeme uključi vrijeme potrebno za dobavljanje podataka sa memorije te njihovu obradu, vrijeme potrebno za dobavljanje svih podataka trebalo bi iznositi manje od 10 [s] što je svakako zadovoljavajući rezultat.

Na Slici 6.2 prikazan je izgled XBee-PRO modula. Modul komunicira sa nadređenim sustavom preko dvosmjerne UART komunikacije na TTL razini. Modul se napaja sa 3.3 [V] kao i mikrokontroler *LPC1343* stoga nije potrebno koristiti pretvornike naponskih razina. Izlaz i ulazi XBee-PRO modula prikazani su na Slici 6.3. Ulazi i izlazi modula sa opisom glase:



Slika 6.2. Izgled XBee-PRO modula



Slika 6.3. Ulazi i izlazi XBee-PRO modula

- *Vcc* - Napon napajanja od 3.3 [V]
- *GND* - Pin za spajanje zemlje
- *DOUT* - TX pin UART sučelja koji se spaja na RX pin UART sučelja na mikrokontroleru
- *DIN* - RX pin UART sučelja koji se spaja na TX pin UART sučelja na mikrokontroleru
- \overline{RESET} - Pin za ponovno pokretanje XBee modula u slučaju greške
- *PWM0*, *PWM1* - (eng. Pulse Width Modulation) izlazi za upravljanje
- *DIO0* – *DIO8* - Digitalni ulazi/izlazi
- *AD0* – *AD6* - 10 bitni analogni ulazi
- \overline{SLEEP} - Pin za postavljanje XBee-PRO modula u sleep mod za manju potrošnju energije

Minimalni spojevi koji su potrebni za rad sa modulom su napajanje *Vcc* i *GND* te *DOUT* i *DIN* koji su povezani sa UART modulom na mikrokontroleru. Jedan digitalni izlaz mikrokontrolera spojen je na \overline{SLEEP} pin XBee modula. Potrošnja modula u Sleep modulu rada iznosi samo 10 [μA]. Na žalost dok je modul u Sleep modu ne može primiti poruke. Potrošnja je značajno smanjena u tom modu (sa 250 na 0.01 [mA]) pa je dodana podrška za gašenje modula.

Povezivanje sa računalom odvija se preko USB priključka. Za konfiguriranje XBee modula koristi se program XCTU koji omogućuje promjenu parametara samog modula kao: brzinu prijenosa serijskih podataka, adresu modula, mod rada, konfiguraciju pinova itd.

6.1.1. Implementacija komunikacije sa modulom

Princip UART komunikacije objašnjen je u Poglavlju 3.1. Za korištenje XBee modula koristi se mod prijenosa podataka: 8 bitna poruka i 1 stop bit. Odabrana brzina serijske komunikacije iznosi 115200 [bps]. Odabir brzine prijenosa serijskih podataka ne ovisi o brzini prijenosa podataka bežično. XBee modul posjeduje u sebi FIFO buffer za 202 byte-a podataka koji se puni kako podaci ulaze u modul, a prazni kako su podaci primljeni od drugog modula. Ukoliko se XBee puni brže nego što se poruke uspiju poslati tada dolazi do prepunjavanja buffera i gubitka poruka. U tom slučaju je potrebno implementirati Hardware Flow Control pomoću pinova *CTS* (eng. Clear To Send) i *RST* (eng. Request To Send).

Pored postavki serijskog sučelja potrebno je postaviti konfiguraciju bežične komunikacije. Potrebno je odabrati identifikator kanala *CHANNEL* i pod identifikator mreže *PAN ID*. Kako bi moduli mogli međusobno komunicirati potrebno je postaviti parametre na istu vrijednost. Tako su odabrane osnovne vrijednosti *CHANNEL = 0x0C* i *PAN ID = 0x3332*. Već je spomenuto kako se XBee moduli mogu adresirati 16 i 64 bitnim adresama. U ovom projektu odabrano je adresiranje 16 bitnim adresama te je potrebno u konfiguraciji modula preko XCTU programske podrške postaviti parametar *MY* na vrijednost različitu od *0xFFFF*. Tada je definirano da modul koristi 16 bitno adresiranje. Kao što je već spomenuto XBee modul spojen na nadređeni sustav se podešava na *MY = 0x0000*, senzorske stanice dobivaju adrese od *0x0001* do *0x0100* a upravljačke stanice dobivaju adrese *0x0100* do *0x0200*.

kao dodatne bitne postavke RF komunikacije predstavljaju se:

- *RR* - Broj ponavljanja slanja poruke do primitka potvrde
- *DL* - 16-Bitna adresa modula koju se šalje poruka
- *AP* - Postavljanje načina komunikacije

Broj postavki za konfiguriranje modula je doista velik i pojedinosti su detaljno objašnjene u [57]. U pregledu ovog rada spomenuti će se samo najbitniji parametri koje je potrebno konfigurirati za ostvarenje komunikacije nadređenog sustava te senzorskih i upravljačkih stanica.

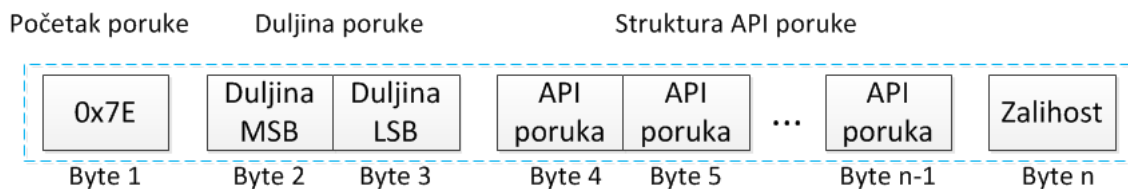
XBee moduli omogućuju dva načina razmjene poruka:

- AT Mode - Ovo je prvotna postavka za sve XBee module. Poruke se proslijeđuju preko XBee modula u istom obliku kako se i primaju. To znači da

dva XBee modula "glume" serijsku liniju i krajnjem korisniku pojednostavljuju komunikaciju. Adresiranje modula se provodi promjenom konfiguracije samog modula, odnosno promjenom parametara DH i DL (Destination High i Destination Low)

- API Mode - Komunikacija se odvija preko definiranih poruka (eng. Frame) koje su određene definiranom strukturom i sadrže dodatne informacije

Razmjena poruka će se vršiti u API modu rada. Razlog tomu je što definirane poruke sadrže dodatne informacije kao: adresa pošiljatelja, jačina signala, koje su veoma bitne u komunikaciji sa više čvorova. To unosi dodatne podatke u poruku ali daje dodatnu robusnost komunikacije. Općeniti izgled poruke koje razmijenjuju XBee moduli u API modu rada prikazan je na Slici 6.4. Sastoji se od početnog byte-a $0x7E$ koji označava početak poruke, zatim dva byte-a koja određuju duljinu poruke koja slijedi, slijed byte-ova koji ovise o poruci koja se šalje, te zadnji byte zalihosti za provjeru greške. Zalihost na kraju poruke određuje se tako da se zbroje svi byte-ovi nakon duljine poruke (byte 4 do byte n-1) i naposljetku oduzmu od $0xFF$. Provjera primitka poruke provodi se tako da se usporedi izračunata zalihost dobivene poruke i usporedi sa primljenom zalihosti.



Slika 6.4. Općenita poruka pri komunikaciji u API modu

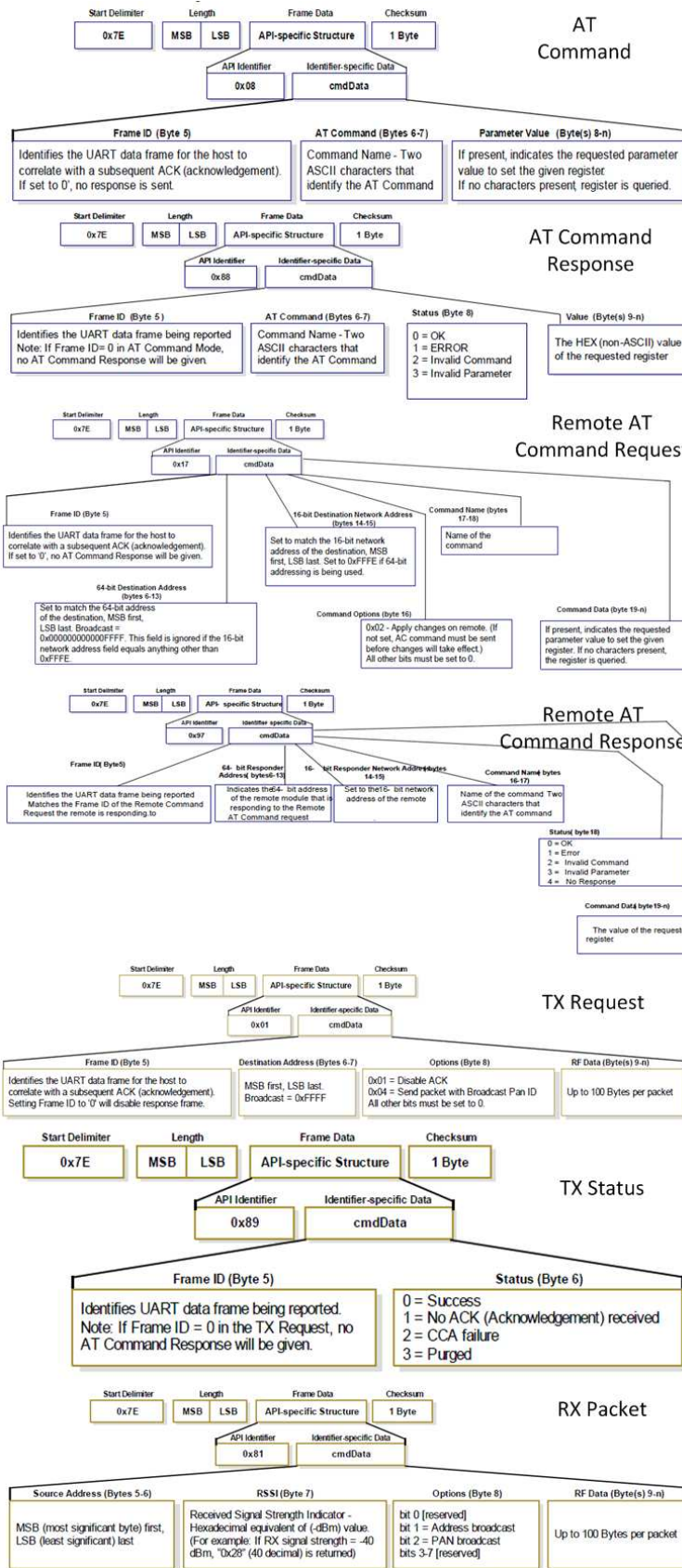
Postoje različite API poruke koje je potrebno detaljno objasniti za razumijevanje. Ukupno je definirano 11 API poruka od kojih se za realizaciju komunikacijskog sustava u ovom projektu koriste njih 7. Korištene API poruke sa objašnjenjem glase:

- *AT Command Request* - Poruka pomoću koje se konfigurira ili čita trenutno spojeni XBee modul. U poruci je moguće definirati parametar koji se želi pročitati li promijeniti te nova vrijednost parametra ukoliko je odabrana promjena. Parametar je definiran pomoću ASCII koda od dva byte-a. Identifikator ove poruke se nalazi u prvom byte-u i glasi: $0x08$
- *AT Command Response* - Nakon slanja "*AT Command*" modul odgovara sa porukom koja sadrži identifikator parametra kojem se pristupalo, poruke ukoliko je bilo greške te vrijednosti parametra ukoliko se parametar želio pročitati. Greška može nastati ukoliko je korisnik želio pristupiti parametru koji ne postoji ili je želio promijeniti parametar u vrijednost koja nije u odgovarajućem obliku ili rasponu. Identifikator ove poruke glasi: $0x88$.
- *Remote AT Command Request* - Ova API poruka se koristi u istu svrhu kao "*AT Command*" poruka, no u ovom slučaju moguće je navesti 16 ili 64 bitnu

adresu modula kojemu se želi pristupati. Ukoliko postoji modul sa istom zadanim adresom ova poruka zahtjeva odgovor tog modula i eventualnu promjenu njegovih parametara. Identifikator ove poruke glasi: *0x17*.

- *Remote AT Command Response* - Ova poruka je odgovor modula kojemu se pristupalo pomoću "*Remote AT Command Request*" te sadrži adresu modula koji odgovara, dojavu o grešci i vrijednost parametra kojemu se pristupalo. Ukoliko modul koji je poslao zahtjev nije primio nikakvu poruku, tada se vraća isti oblik poruke sa informacijom da odgovora nije bilo. Identifikator ove poruke glasi: *0x97*
- *TX Request* - API poruka za slanje proizvoljnih podataka na XBee modul definiran 16 bitnom adresom. Na ovaj način moguće je poslati do 100 byte-a podataka na proizvoljni modul. Također je moguće definirati da li modul mora potvrditi primitak poruke ili ne. Ova API poruka će služiti za slanje podataka između stanica i nadređenog sustava. Identifikator ove poruke glasi: *0x01*
- *TX Status* - Nakon završetka slanja podataka sa "*TX Request*" porukom, sustav koji je slao poruku ukoliko je to zahtijevao prima informaciju o tome je li drugi sustav primio poruku. Identifikator ove poruke glasi: *0x89*
- *RX Packet* - Nakon što modul primi poruku od drugog modula pomoću "*TX Request*", proslijeđuje poruku na serijski izlaz uz dodatne informacije kao: 16-bitna adresa pošiljatelja poruke, indikator jačine signala i informaciju o tome je li poruka poslana samo tom moduli ili je poruka bila globalna. Poruka na kraju također sadrži identičan slijed byte-ova koji su poslani sa drugog modula. Sva razmjena korisničkih podataka između dva modula vrši se pomoću *TX* i *RX* API poruka. Identifikator ove poruke glasi: *0x81*

Točan raspored byte-ova za svaku poruku uz detaljne informacije prikazan je na Slici 6.5.



Slika 6.5. Korišteni API frame-ovi

6.1.2. Implementacija komunikacije sa mikrokontrolerom

Kako bi se ostvarila komunikacija između XBee modula i mikrokontrolera potrebno je konfigurirati UART perifernu jedinicu. Postavke komunikacije podešavamo registrom *U0LCR* (eng. Line Control Register). Tu definiramo prijenos podatak od 8-bitova, jedan stop bit i bez pariteta. Frekvencija oscilatora iznosi $F_{osc}=72 [MHz]$. Željeni baudrate za komunikaciju sa XBee-om iznosi 115200. U dokumentaciji XBee modula stoji napomena da ukoliko se odabere brzina 115200 tada stvarna brzina iznosi 111111. Ovo je potrebno uzeti u obzir. Ukoliko se pokuša izračunati vrijednost registra za Baudrate generator prema formuli:

$$F_{div} = integer \left[\frac{F_{osc}}{16 \cdot Baudrate} \right] = 40 \quad (6.1)$$

Stvarni dobiveni baudrate u tom slučaju iznosi:

$$Baudrate = \frac{F_{osc}}{16 \cdot 40} = 112500 \quad (6.2)$$

odnosno vidimo pogrešku. Velika prednost LPC1343 mikrokontrolera je što posjeduje generator baudrate-a kojeg je moguće korigirati decimalnim vrijednostima (eng. Fractional Baudrate generator). Postupak odabira parametara registara provodi se na sljedeći način:

$$DL_{est} = \frac{72000000}{16 \cdot 111111} = 40.5 \quad (6.3)$$

Dobivena vrijednost nije cjelobrojna. Odabire se parametar $FR_{est}=1.5$ te se proračunava nova vrijednost registra:

$$DL_{est} = integer \left[\frac{72000000}{16 \cdot FR_{est} \cdot 111111} \right] = 27 \quad (6.4)$$

$$FR_{est} = \frac{72000000}{16 \cdot DL_{est} \cdot 111111} = \frac{72000000}{16 \cdot 27 \cdot 111111} = \frac{3}{2} \quad (6.5)$$

Odabiru se parametri registara Baudrate generatora prema tablici 210 u [58] i glase:

- DIVADDVAL=1
- MULVAL=2
- DLM=0
- DLL=27

Sada možemo proračunati stvarni baudrate prema formuli:

$$Baudrate = \frac{72000000}{16 \cdot (256 \cdot DLM + DLL) \cdot \left(q + \frac{DIVADDVAL}{MULVAL} \right)} = 111111.111 \quad (6.6)$$

Vidimo da smo dobili puno preciznije generiranje baudrate-a koristeći fractional baudrate generator. Funkcija koja podešava UART modul na mikrokontroleru za komunikaciju brzinom 111 111 [bps] koristeći 8 podatkovnih i 1 stop bit glasi:


```
void UARTInit(111111);
```

Funkcija također čisti sve ulazne i izlazne registre i podešava generiranje prekida nakon svakog podatka koji se primi na UART. Funkcija koja se poziva pri generiranju prekida glasi:

```
void UART_IRQHandler(void);
```

te se u njoj identificiraju XBee API poruke.

6.1.3. Ostvarena programska podrška za razmjenu podataka

Napisane su sljedeće funkcije koje olakšavaju primanje i slanje API XBee poruka:

1.

```
void XbeeATRequest(char *command, uint8_t *parameter, uint8_t length, uint8_t query);
```

Funkcija za slanje *AT Command* poruka za promjenu ili čitanje parametara XBee-PRO modula spojenog na mikrokontroler. Ulazni parametri su:

- (a) *Command* - AT parametar koji se želi pročitati ili upisati
- (b) *Parameter* - Vrijednost koja se želi upisati u parametar. Ostavlja se prazno ukoliko se parametar želi samo pročitati
- (c) *Length* - Broj byte-ova polja *Parameter*
- (d) *Query* - Ukoliko *Query* = 0 tada se obavlja pisanje a ukoliko *Query* = 1 tada se obavlja čitanje vrijednosti parametra

2.

```
void XbeeTxRequest(uint16_t address, uint8_t *data, uint8_t length, uint8_t ReqAck);
```

Funkcija za slanje podataka na XBee-PRO modul proizvoljne adrese. Ulazni parametri su:

- (a) *Address* - Proizvoljna 16 bitna adresa modula na koji se šalju podaci
- (b) *Data* - Podaci koji se šalju su u obliku 8 bitnog polja maksimalne duljine 100
- (c) *Length* - Broj byte-ova polja *Data* koji se šalju
- (d) *ReqAck* - Ukoliko *ReqAck* = 0 ne traži se potvrda primitka, dok u suprotnom slučaju lokalni XBee vraća "*TX Status*" poruku sa izvještajem o primitku

3.

```
void XbeeRxReaction(uint16_t SourceAddress, uint8_t SignalStrength, uint8_t *PacketData, uint8_t DataLength);
```

Funkcija se poziva kada lokalni XBee-PRO modul primi *TX* poruku sa podacima. Ulazni parametri su:

- (a) *SourceAddress* - Adresa modula koji je poslao poruku
- (b) *SignalStrength* - Jačina signala izražena u 8 bit-noj vrijednosti u jedinici [*dBm*]
- (c) *PacketData* - Podaci koji su primljeni i zapisani u obliku 8 bitnog polja
- (d) *DataLength* - Broj byte-ova polja *PacketData* koji su primljeni

4.

```
void XbeeATReaction(uint8_t *AT_command, uint8_t *parameters, uint8_t DataLength);
```

Funkcija koja se poziva kada mikrokontroler primi poruku XBee-PRO modula kao odgovor na "AT Command" API poruku. Ulazni parametri su:

- (a) *ATCommand* - Ime parametra koji se pisao ili čitao
- (b) *Parameters* - Vrijednost parametra ukoliko se čitao
- (c) *DataLength* - Broj byte-ova polja *Parameters*

5.

```
void XbeeError(uint8_t ERR_NO);
```

Funkcija koja se poziva ukoliko se dogodi određena greška prilikom XBee komunikacije. Time je omogućena reakcija mikrokontrolera ukoliko je to potrebno. Grešku je moguće identificirati prema kodu *ERR_NO*. Neke od definiranih grešaka glase:

- Err No=1 - Pogreška zalihosti za bilo koji tip API poruke
- Err No=2 - Nema potvrde primitka na poslani paket
- Err No=3 - Greška CCA na poslani paket
- Err No=4 - Purged Error na poslani paket
- Err No=5 - Greška čitanja ili pisanja parametra
- Err No=6 - Traženi parametar ne postoji
- Err No=7 - Vrijednost parametra nije dozvoljena

Kada određeni modul primi poruku koji je neki drugi modul poslao, osim informacije o adresi pošiljatelja potrebno je znati i koja je svrha te poruke. Svrha poruke definirana je određenim kodovima koji govore koja je potrebna reakcija modula koji je primio poruku. Kod poruke nalazi se u prvom byte-u primljene "RX Reaction"

poruke. Reakcija senzorskog modula ovisi o primljenom kodu i o adresi sa koje je poruka došla. Tako su definirane različite reakcije za senzorske i upravljačke stanice. Za senzorsku stanicu razlikujemo:

1. Adresa pošiljatelja = 0x0000 - poruka je došla sa nadređenog računala
 - Kod = 0x01 - Zahtjev za podacima mjerenja
 - Kod = 0x02 - Zahtjev za imena svih mjerenih varijabli
 - Kod = 0x03 - Zahtjev za trenutnim vremenom na stanici
 - Kod = 0x04 - Zahtjev za podešavanjem vremena stanice
 - Kod = 0x05 - Zahtjev za brisanjem memorije senzorske stanice
 - itd...
2. Adresa pošiljatelja [0x0001, 0x00FF] - poruka je došla sa druge senzorske stanice
 - Kod = 0x01 - Zahtjev za zadnjim podacima mjerenja
 - itd...
3. Adresa pošiljatelja [0x0100, 0x01FF] - poruka je došla sa druge upravljačke stanice
 - Kod = 0x01 - Zahtjev za zadnjim podacima mjerenja
 - itd...

dok za upravljačku stanicu na isti način razlikujemo:

1. Adresa pošiljatelja = 0x0000 - poruka je došla sa nadređenog računala
 - Kod = 0x01 - Zahtjev za promjenom algoritma upravljanja i odabir načina rada
 - Kod = 0x02 - Zahtjev za imenima svih upravljanih varijabli
 - Kod = 0x03 - Zahtjev za trenutnim vremenom na stanici
 - Kod = 0x04 - Zahtjev za podešavanjem vremena stanice
 - Kod = 0x05 - Zahtjev za brisanjem memorije senzorske stanice
 - Kod = 0x06 - Zahtjev za određenim brojem spremljenih dijagnostičkih poruka
 - itd...
2. Adresa pošiljatelja [0x0001, 0x00FF] - poruka je došla sa druge senzorske stanice
 - Kod = 0x01 - Zahtjev za uključenje ili isključenje (vode, svjetla, itd...)

- itd...
3. Adresa pošiljatelja [0x0100, 0x01FF] - poruka je došla sa druge upravljačke stanice
- Kod = 0x01 - Zahtjev za određenim brojem spremljenih dijagnostičkih poruka
 - itd...

Broj poruka koje stanice mogu razmijeniti je iznimno velik i stoga neće biti prikazane sve poruke. Poruka osim svog koda, sadrži i podatkovni dio koji dodatno definira poruku. Tako na primjer kada nadređeni sustav pošalje poruku koda 0x04 u svrhu podešavanja vremena, također u dodatnim byte-ovima šalje trenutni datum, godinu, i vrijeme u satima, minutama i sekundama. Ukoliko je definirano kodom poruke, senzorska stanica može odgovoriti povratnom porukom kao što je to slučaj kod koda 0x01 kada senzorska stanica šalje podatke mjerenja spremljene u internu memoriju.

Naposljetku potrebno je napomenuti da prilikom izvođenja slanja ili primanja podataka sa XBee-PRO modula, *SLEEP* pin mora biti postavljen na visoku razinu. Paljenje i gašenje modula omogućeno je sljedećom funkcijom:

```
void XbeeEnable(uint8_t Enable);
```

Uz parametar *Enable* = 0 modul se nalazi u modu male potrošnje i ne može slati i primiti podatke. Postavljanjem *Enable* = 1 omogućena je sva funkcionalnost razmjene podataka.

6.2. LCD ekran za lokalni pristup podacima

U ovom dijelu opisan je način povezivanja i upravljanja LCD ekranom *GDM1601E* [59] tvrtke *XIAMEN OCULAR* i način prezentiranja podataka korisniku. Ekran posjeduje 16 segmenata za prikaz ASCII znakova. Svaki segment se sastoji od 40 LED ćelija, kojima upravlja kontroler *KS066U* [60]. Korišteni LCD ekran prikazan je na Slici 6.6. Korišteni ekran napaja se sa 5 [V] i nema pozadinsko osvjetljenje. Princip upravljanja ovakvim ekranima je standardiziran i primjer upravljanja je prikazan u [61]. Dostupni pinovi na ekranu glase:

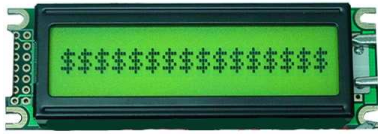
1. *GND* - Uzemljenje
2. *V_{dd}* - Napajanje 5 [V]
3. *V₀* - Podešavanje kontrasta signalom od 0 do 5 [V]
4. *RS* - (eng. Register Select) Odabir upravljačkog ili podatkovnog podatka
5. *R/W* - (eng. Read / Write) Signal za odabiranje pisanja ili čitanja sa ekrana
6. *E* - (eng. Enable) Dojava spremnosti podatka na podatkovnim signalima
7. *DB0-DB7* - Signali za paralelni prijenos podataka

Razmjena poruka obavlja se preko paralelnog sučelja sa 8 podatkovnih bitova: *DB0-DB7*. Također je moguće ostvariti upravljanje koristeći 4 podatkovna bita: *DB4-DB7*. Ova mogućnost će se iskoristiti zbog zauzetosti pinova na *LPC1343* mikrokontroleru. Dodatni signali koji su potrebni za upravljanje ekranom su *RS* i *E* dok je signal *R/W* moguće spojiti na uzemljenje jer se pomoću njega odabire čitanje ili pisanje na ekran. U našem slučaju dovoljno je samo vršiti pisanje u memoriju kontrolera na ekranu. Potrebno je ukupno 6 digitalnih izlaza kako bi se moglo pisati na LCD ekran.

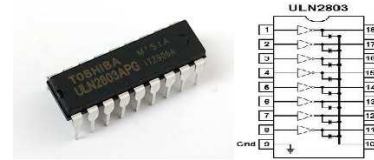
6.2.1. Povezivanje LCD ekrana i mikrokontrolera

Izlazni pinovi *LPC* mikrokontrolera mogu dati napon visoke razine od 3.3 [V]. Nažalost, to nije dovoljno za registriranje logičke jedinice na LCD ekranu i stoga je potrebno pronaći način za povećanje naponskih nivoa na 5 [V]. Jedan od načina je korištenje tranzistorske sklopke za svaki digitalni izlaz mikrokontrolera. Tranzistorske sklopke su jednostavan način povećavanja naponskih nivoa. Umjesto nabavke 6 tranzistora korišten je čip *ULN2803* koji u sebi sadrži 8 tranzistorskih sklopki u obliku Darlingtonova spoja. Izgled i topologija čipa *ULN2803* prikazana je na Slici 6.7.

Darlingtonov spoj se sastoji od dva tranzistora i može raditi u obliku tranzistorske sklopke. Ulazi u bazu spajaju se na digitalne pinove mikrokontrolera dok se

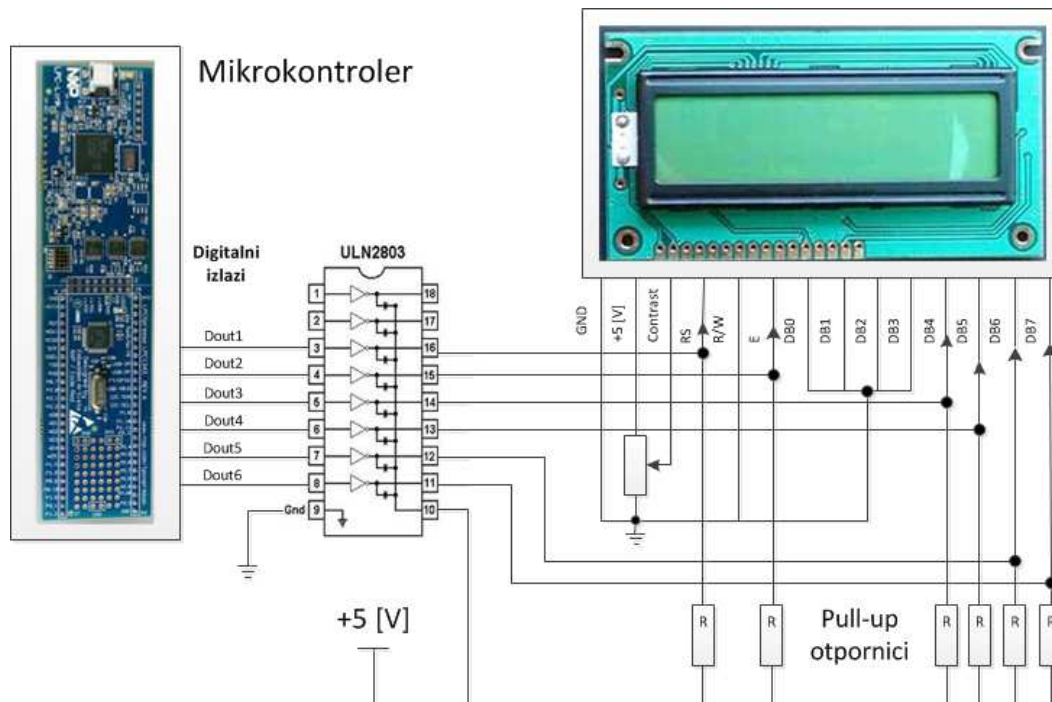


Slika 6.6. Korišteni 16-segmentni LCD ekran *GDM1601E*



Slika 6.7. Izgled i topologija čipa *ULN2803*

izlazi spajaju na digitalne ulaze LCD ekrana uz dodane pull-up otpornike prema naponu od 5 [V]. Niska razina na ulazu baze uzrokuje blokiranje tranzistorskog spoja od izlaza prema zemlji i naponska razina je dignuta na 5 [V] sa pull-up otpornikom. Pri visokoj razini na ulazu tranzistorski spoj počinje voditi i povezuje izlaz sa uzemljenjem. Korišteni pull-up otpornici su vrijednosti 10 [kΩ]. Pojednostavljena shema spajanja LCD ekrana sa mikrokontrolerom prikazana na Slici 6.8.



Slika 6.8. Prikaz načina spajanja LCD modula sa mikrokontrolerom

Upis jedne poruke izvodi se postavljanjem data bitova na odgovarajuće razine i podizanjem E pina na visoku razinu. Ukoliko je stanje $RS = 1$ tada se upisana poruka tumači kao konfiguracijska, dok za stanje pina $RS = 0$ poruka tumači kao poruka za prikaz. Kako bi se omogućio rad LCD modula koristeći četiri data pina potrebno je provesti konfiguraciju prema sljedećim koracima:

1. Postaviti $RS = 0$ i $EN = 1$

2. Postaviti [DB7,DB6,DB5,DB4]=0011
3. Postaviti $EN = 0$
4. Sačekati 10 [ms]
5. Postaviti $EN = 1$
6. Postaviti [DB7,DB6,DB5,DB4]=0011
7. Postaviti $EN = 0$
8. Sačekati 10 [ms]
9. Postaviti $EN = 1$
10. Postaviti [DB7,DB6,DB5,DB4]=0010
11. Postaviti $EN = 0$
12. Sačekati 10 [ms]
13. Postaviti $EN = 1$
14. Postaviti [DB7,DB6,DB5,DB4]=1000
15. Postaviti $EN = 0$

Ovim koracima LCD modul je konfiguriran za 4-bitno upravljanje. Svi podaci koji se upisuju od ovog trenutka smatraju se razlomljenim na dva upisa od 4 bita. Za potrebe ispisa i upravljanja LCD modulom napisane su sljedeće funkcije:

- ```
void LCDOn(void) ;;
```

Funkcija koja služi za paljenje LCD modula i konfiguriranje za 4-bitni mod rada

- ```
void LCDOff(void) ;;
```

Funkcija koja služi za gašenje LCD modula radi uštede energije

- ```
void LCDWriteString(char *string , uint8_t stupac) ;
```

Funkcija koja prima niz ASCII znakova i ispisuje ih na ekranu počevši od pozicije definirane varijablom *Stupac*

- ```
void LCDClearScreen(void) ;
```

Funkcija koja briše sve ispisane znakove na LCD ekranu

7. Sustav napajanja i mjerenja potrošnje

Senzorska stanica je napajana iz baterijskog napajanja. Potrebno je osigurati veliku autonomiju senzorske stanice i zato je velika pažnja usmjerena na osiguravanje što manje potrošnje sustava. Provedena je analiza potrošnje korištenih elemenata kako bi se procijenila duljina autonomije. Potrošnje u različitim režimima rada prikazane su u Tablici 7.1. Prema gruboj procjeni koja se mogla dobiti iz tehničke dokumentacije može se zaključiti da će prosječna potrošnja za sklop u mirovanju (ne u trenutku prikupljanja podataka) iznositi približno $60 [mA]$. Vidljivo je da je najveća stavka u potrošnji modul XBee za bežičnu komunikaciju. Postavljanjem modula u *Sleep* režim rada bi znatno smanjilo potrošnju, no u tom modu rada nije moguće primiti poruke. Modul XBee posjeduje mogućnost postavljanja cikličkog paljenja *Sleep* režima rada. Ova problematika u ovom trenutku nije razmatrana ali je senzorska stanica pripremljena tako što je *Sleep* pin XBee modula povezan sa mikrokontrolerom.

Ostale komponente koje troše dosta energije su GPS i LCD modul kao i sklop sa operacijskim pojačalima. Iz tog razloga korišteni su linearni regulatori sa mogućnosti gašenja napajanja kako bi se zasebno napajali. Na senzorskoj stanici je pomoću kratkospojnika moguće odabrati način napajanja senzora tlaka i senzora vlažnosti zraka. Iste je moguće napajati pomoću digitalnog izlaznog pina na mikrokontroleru ili direktno sa $3.3 [V]$ regulatora zaduženog za napajanje mikrokontrolera. Dodatna ušteda energije je korištenje još jednog upravljivog regulatora napajanja za napajanje senzorskih sondi. Obje senzorske sonde se napajaju iz istog regulatora, koji se uključuje samo kada je potrebno izvesti mjerenja.

LCD je potrebno napajati sa reguliranim naponom od $5 [V]$. Za tu svrhu koristi se linearni regulator *MIC5205* [62] tvrtke *Micrel* koji je u mogućnosti davati $150 [mA]$ konstantne struje sa malim padom napona. Paljenje napajanja upravljano je pomoću pina *Enable* koji je spojen na digitalni izlaz mikrokontrolera. Kako bi se smanjile oscilacije izlaza dostupan je dodatni izlaz C_{byp} za spajanje kondenzatora koji dodatno smanjuje šum na izlazu. Ovaj regulator dostupan je u iznimno malom kućištu *SOT – 23* prikazanom na Slici 7.1 dok je način spajanja prikazan na Slici 7.2.

Drugi korišteni regulator za napajanje sa $3.3 [V]$ naziva se *MCP1804* [63] tvrtke *Microchip* prikazan na Slici 7.3. Ovaj regulator također posjeduje *Enable* pin i koristi se za napajanje senzorskih sondi, GPS modula i operacijskih pojačala. To

Tablica 7.1. Potrošnje korištenih elemenata

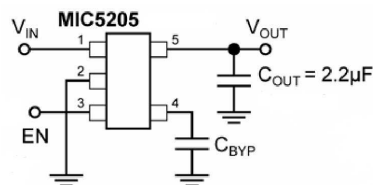
	Uvjet	I_s
LPC1343	Normal	4 [mA]
	Sleep	2 [mA]
	Deep sleep	30 [μ A]
XBee	Slanje	140 [mA]
	Mirovanje	40 [mA]
	Sleep	50 [μ A]
MCP23009	Mirovanje	1 [μ A]
	Normal	1 [mA]
PCF8563	Mirovanje	800 [nA]
	Čitanje	3 [mA]
ADS1015	Mirovanje	2 [μ A]
	Pretvorba	200 [μ A]
BMP085	Mirovanje	0.1 [μ A]
	Pretvorba	1 [mA]
MPL115A1	Mirovanje	3 [μ A]
	Pretvorba	5 [μ A]
DHT11	Mirovanje	0.15 [mA]
	Pretvorba	1 [mA]
LCD GDM1601	Normal	1.3 [mA]
	Max	4 [mA]
24LC512	Mirovanje	100 [nA]
	Čitanje	400 [μ A]
GPS Modul	Normal	1 [mA]
	Max	4 [mA]
A25L016	Mirovanje	25 [μ A]
	Čitanje	4 [mA]
Operacijska pojačala	Procjena	10 [mA]
AFE LMP91050	Normal	85 [μ A]
	Max	3.2 [mA]
AFE LMP91200	Normal	50 [μ A]
	Max	0.5 [mA]

je ukupno 3 korištena regulatora čiji su *Enable* pinovi spojeni na mikrokontroler. Time je ostvarena značajna ušteda energije, jer sada se ti moduli mogu paliti samo kada za to ima potrebe. Način spajanja ovih regulatora je vrlo sličan kao i kod regulatora *MIC5205* i prikazan je na Slici 7.4.

Posljednji korišteni regulator napona je *LM1117* [64] tvrtke *Texas Instruments*. Ovaj regulator se nalazi u *SOT – 233* kućištu i prikazan je na Slici 7.5. Znatno je većih dimenzija i može dati do čak 800 [mA] konstantne struje uz mali pad napona. Dodavanje vanjskih kondenzatora od $C = 10$ [μ F] je nužno radi stabilizacije napona.



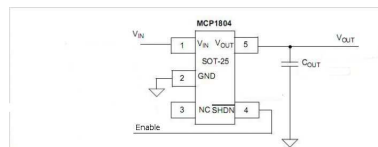
Slika 7.1. Korišteni regulator napona
MIC5205



Slika 7.2. Način spajanja regulatora
MIC5205

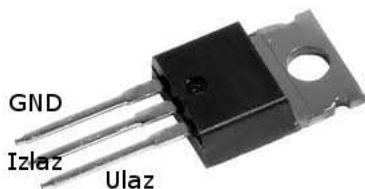


Slika 7.3. Korišteni regulator napona
MCP1804

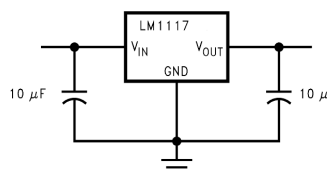


Slika 7.4. Način spajanja regulatora
MCP1804

Ovim regulatorom nije moguće upravljati pomoću *Enable* pina i on se koristi za konstantno napajanje mikrokontrolerskog i XBee modula, memorijske periferije i RTC modula. Način povezivanja prikazan je na Slici 7.5.



Slika 7.5. Korišteni regulator napona
LM1117 3.3 [V]



Slika 7.6. Način spajanja regulatora
LM1117

Kako bi se dodatno uštedila energija koristi se *PMU* jedinica (eng. Power Management Unit) na mikrokontroleru koja pokreće rad male potrošnje mikrokontrolera. Korištenje *PMU* jedinice opisano je u [65]. Nastavak rada se može dogoditi na zahtjev izvana ili preko generiranja prekida neke vanjske jedinice. U ovom modu rada potrošnja mikrokontrolera pada na 2 [mA]. Pregled kompletne sheme upravljanja napajanjem prikazan je na Slici 7.7.

7.1. Mjerenja veličina struje

Mjerenje struje se provodi mjerenjem pada napona na otporniku malog iznosa (eng. shunt). Tipični principi mjerenja veličine struje opisani su u [66], [67]. Kako bi se kvalitetno izmjerio pad napona na malom otporniku, potrebno je isti pojačati kako bi se iskoristila puna preciznost 10 bitnog analogno-digitalnog pretvornika na mikrokontroleru. Ukoliko se koristi vrijednost "shunt" otpora $R_s = 0.5 [\omega]$ i očekuje se mjerenje struje do iznosa $I_s = 50 [mA]$ tada pad napona na otporniku iznosi:

$$U_s = I_s R_s = 0.05 \cdot 0.5 = 25 \quad [mV] \quad (7.1)$$

Preciznost 10 bitnog AD pretvornika sa referentnim naponom od 3.3 [V] određuje se na način:

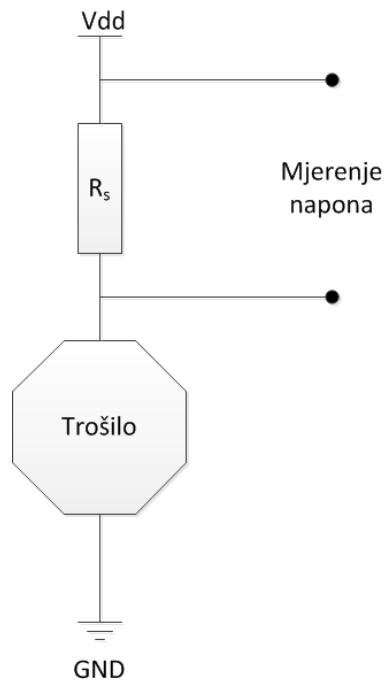
$$U_{min} = \frac{3.3}{2^{10}} \approx 3.2[mV] \quad (7.2)$$

Što u usporedbi sa padom napona na shuntu U_s znači da će se razlika između struje $I_s = 0 [mA]$ i $I_s = 50 [mA]$ registrirati u razlici od približno 8 jedinica. To znači jako loše mjerenje i jako loše iskorištenje resursa. Iz tog razloga potrebno je naći rješenje kako bi se signal dovoljno pojačao. Pojačanje je moguće ostvariti korištenjem operacijskih pojačala. Struju je moguće mjeriti pomoću shunta spojenog na high ili low side. Low side znači da je shunt spojen na uzemljenje sa jednim krajem i na trošilo sa drugim krajem. Tada će struja prolaziti prvo kroz trošilo a zatim kroz shunt. Prednost ovog načina spajanja je jednostavnija realizacija pojačavanja signala za mjerenje. Ukoliko se koristi high side shunt, tada struja prvo prolazi kroz shunt pa zatim kroz trošilo. Mjerenje pada napona na shuntu je u tom slučaju potrebno realizirati diferencijalnim pojačalom. Način spajanja high side shunta prikazan je na Slici 7.8 dok je način spajanja low side shunta prikazan je na Slici 7.8.

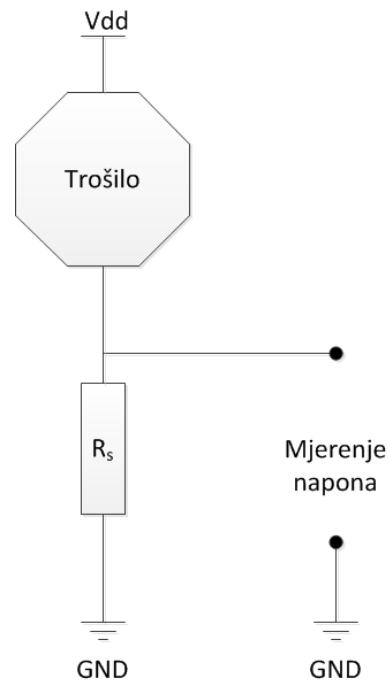
U nekim primjenama nije moguće koristiti jednostavniju varijantu low side shunta i pojačala dok je u oba slučaja moguće iskoristiti diferencijalno pojačalo. Kako bi se pojednostavilo mjerenje struje izrađen je sklop za diferencijalno pojačanje napona na shunt otporniku. U tom slučaju se nije potrebno brinuti oko pravilnog uzemljenja i utjecaja shunt otpornika spojenog na uzemljenje preko trošila. Korištenjem diferencijalnog pojačala prikazanog na Slici 7.10 moguće je mjeriti razliku u naponu direktno dovodeći signal sa stezaljki shunt otpornika. Ovakav spoj pojačava razliku između ulaznih napona V_1 i V_2 za određeni faktor. Promjenom vrijednosti otpora moguće je određivati pojačanje samog pojačala. Relacija koja opisuje statičko pojačanje diferencijalnog pojačala glasi:

$$V_{out} = (V_2 - V_1) \frac{R_2}{R_1} \quad (7.3)$$

Jedan oblik diferencijalnog pojačala je i instrumentacijsko pojačalo. Korištenjem dodatna dva operacijska pojačala rješava se problem utjecaja ulazne impedancije diferencijalnog pojačala pomoću dva naponska sljedila na oba ulaza. Naponsko sljedilo

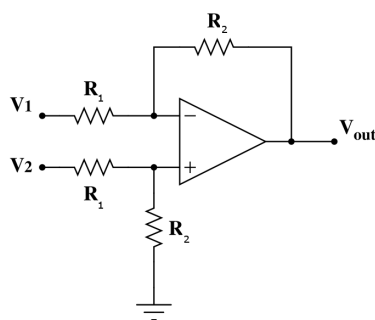


Slika 7.8. Highside mjerenje struje

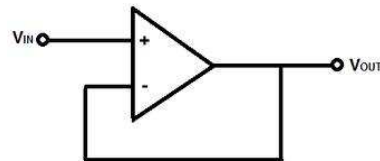


Slika 7.9. Lowside mjerenje struje

služi sa stvaranje vrlo velike ulazne impedancije pomoću operacijskog pojačala sa negativnom povratnom vezom. Invertirajući ulaz operacijskog pojačala spojen je sa izlazom pojačala. Ulazni signal dovodi se na neinvertirajući ulaz. Zbog teorijski beskonačnog pojačanja operacijskog pojačala (u praksi je ono vrlo veliko ali ne i beskonačno), izlazni signal slijedi ulazni signal dok je ulazna impedancija teorijski beskonačna zbog karakteristika operacijskog pojačala. Ovaj spoj se pretežito koristi ukoliko se želi virtualno odvojiti dijelovi električnog kruga. Operacijsko pojačalo u spoju naponskog sljedila prikazano je na Slici 7.11.



Slika 7.10. Diferencijalno pojačalo napona



Slika 7.11. Spoj naponskog sljedila

Naponsko sljedilo osigurava $V_{in} = V_{out}$ uz vrlo visoku ulaznu impedanciju. Instrumentacijsko pojačalo koristi dva naponska sljedila koji se spajaju na diferencijalne ulaze i pri tome znatno poboljšavaju mjerenje i dinamičke karakteristike. Neke od

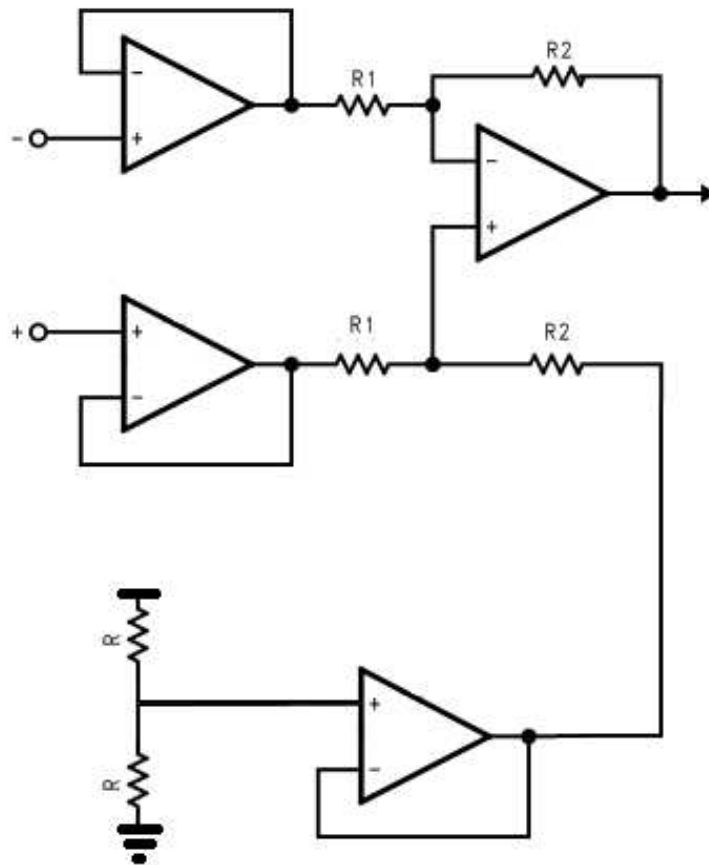
prednosti su smanjenje offseta i drifta kod mjerenja, smanjenje šuma itd. Zbog svojih karakteristika vrlo se često koristi u visoko preciznim mjerenjima. Spoj instrumentacijskog pojačala prikazan je na Slici 7.12. Potrebno je obratiti pažnju na dodatni problem. Napajanje operacijskih pojačala ima znatan utjecaj na kvalitetu mjerenja. Kako se u senzorskoj stanici pojačalo može napajati samo sa pozitivnim naponom, to zadaje ograničenje na mjerenje samo slučajeva kada je $V_2 - V_1 > 0$. U suprotnom slučaju instrumentacijsko pojačalo neće moći stvoriti negativan napon. Kako bi se mogli mjeriti i slučajevi kada je $V_2 - V_1 < 0$, potrebno je unijeti pomak (eng. offset). Offset znači pomaknuti mjerenje za određeni iznos V_0 , da kada vrijedi $V_2 - V_1 = 0$ izlazni napon iznosi V_0 . Offset se unosi stvaranjem virtualne nule. Pojam virtualna nula označava situaciju kada se pomoću drugog naponskog sljedila generira napon određenog iznosa i postavi kao nul napon instrumentacijskog pojačala. Preporučljivo je postaviti virtualnu nulu V_0 na polovicu mjerenog raspona napona. Tako će vrijedi:

- $V_2 - V_1 > 0 \quad V_{out} = V_0 + K(V_2 - V_1)$
- $V_2 - V_1 = 0 \quad V_{out} = V_0$
- $V_2 - V_1 < 0 \quad V_{out} = V_0 - K(V_2 - V_1)$

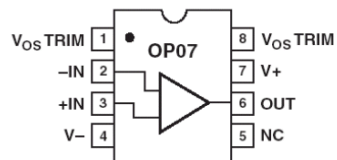
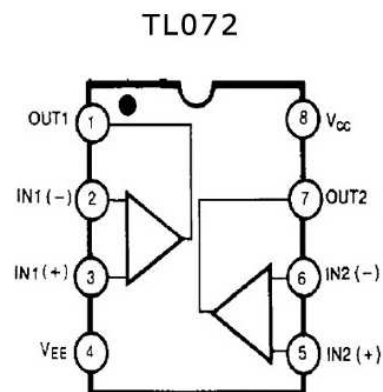
gdje je K pojačanje instrumentacijskog pojačala. Polovica napona za potrebe generiranja virtualne nule može se postići serijskim spojem dvaju istih otpornika povezanih na naponsko sljedilo. Kompletan način povezivanja pojačala za instrumentacijsko pojačalo sa offsetom je prikazano na Slici 7.12. Ukupno je potrebno 4 operacijska pojačala za ovakvu realizaciju instrumentacijskog pojačala. Senzorska stanica posjeduje dva instrumentacijska pojačala ovog tipa. Za to je potrebno 7 operacijskih pojačala jer se jedno naponsko sljedilo za generiranje virtualne nule iskoristilo i za drugo instrumentacijsko pojačalo. Za praktičnu realizaciju korištena su operacijska pojačala tvrtke *Texas Instruments*:

- *OP07* [68] - Za realizaciju diferencijalnog pojačala
- *TL072* [69] - Za realizaciju ulaznih naponskih sljedila i generiranje virtualne nule

Ukupno se koristi 3 čipa *TL072* u DIP8 kućištu sa dva operacijska pojačala i dva čipa *OP07* u DIP8 kućištu sa jednim operacijskim pojačalom. Oba pojačala i raspored pinova prikazani su na Slikama 7.13, 7.14. Konačna shema spajanja opisana je u okviru izrade PCB dizajna senzorske stanice.



Slika 7.12. Instrumentacijsko pojačalo sa offsetom

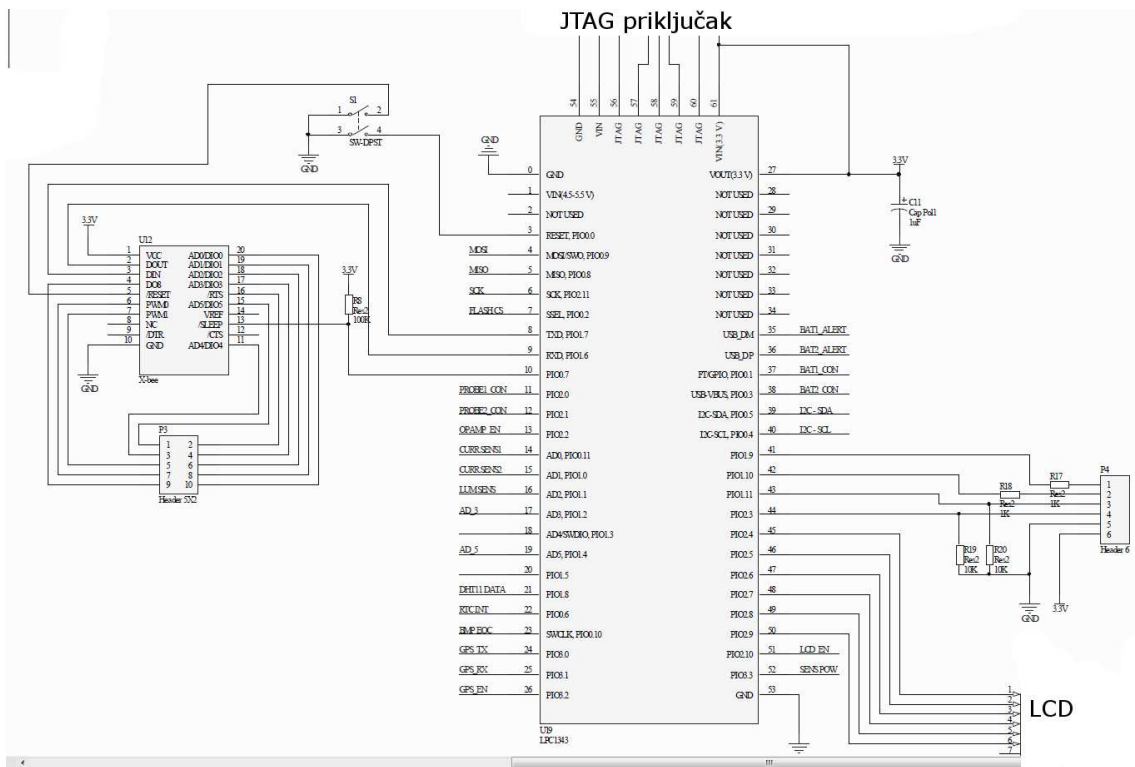
Slika 7.13. Čip *OP07* sa operacijskim pojačalomSlika 7.14. Čip *TL072* sa operacijskim pojačalima

8. Izrada električne sheme i PCB-a senzorske stanice

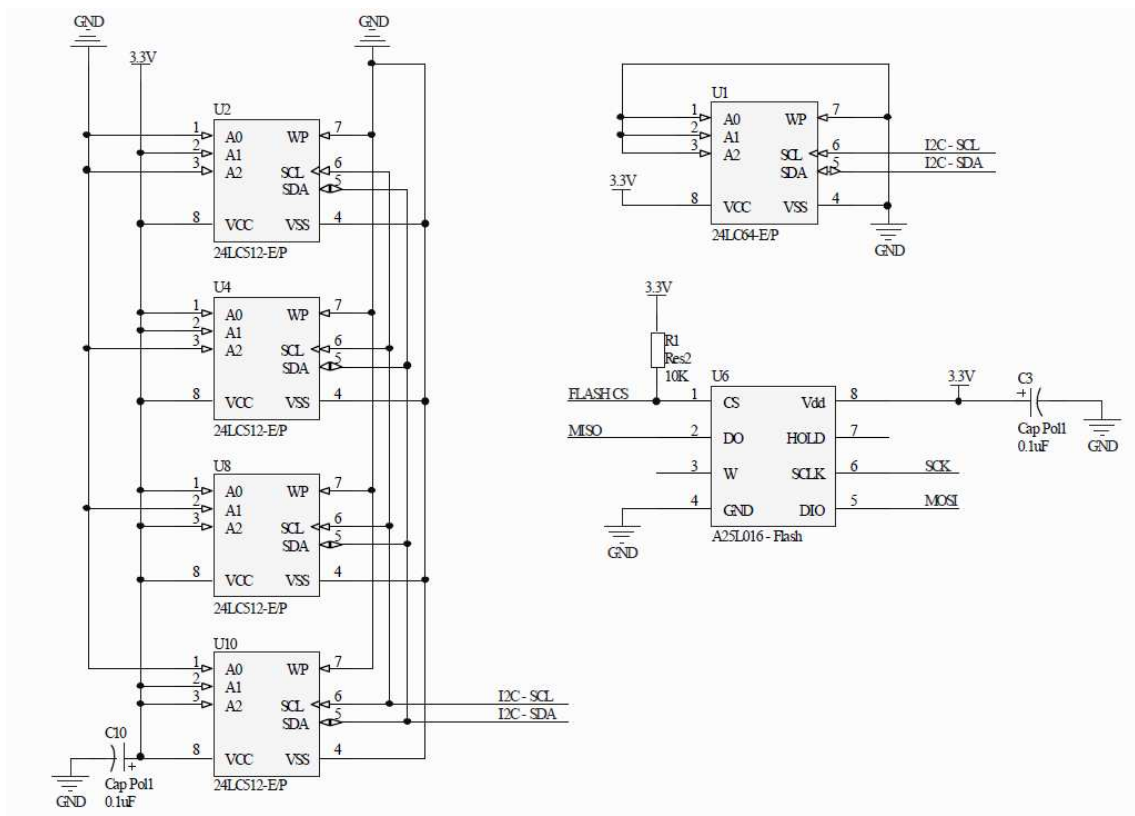
U ovom poglavlju prikazati će se izrađene sheme senzorskog modula. Izrada električne sheme je preduvjet za izradu električne tiskane pločice odnosno PCB-a (eng. Printed Circuit Board). Za izradu se koristio program *Altium Designer* prema preporukama iz [70]. Sve izrađene sheme su prikazane na sljedećim slikama:

- Mikrokontroler i XBee modul - Slika 8.1
- EEPROM i FLASH memorije - Slika 8.2
- Senzori i RTC modul - Slika 8.3
- Operacijska pojačala - Slika 8.4
- Priključci za povezivanje sonde - Slika 8.5
- Regulatori napona - Slika 8.6
- Priključak za LCD - Slika 8.7
- Senzorske sonde - Slika 8.8

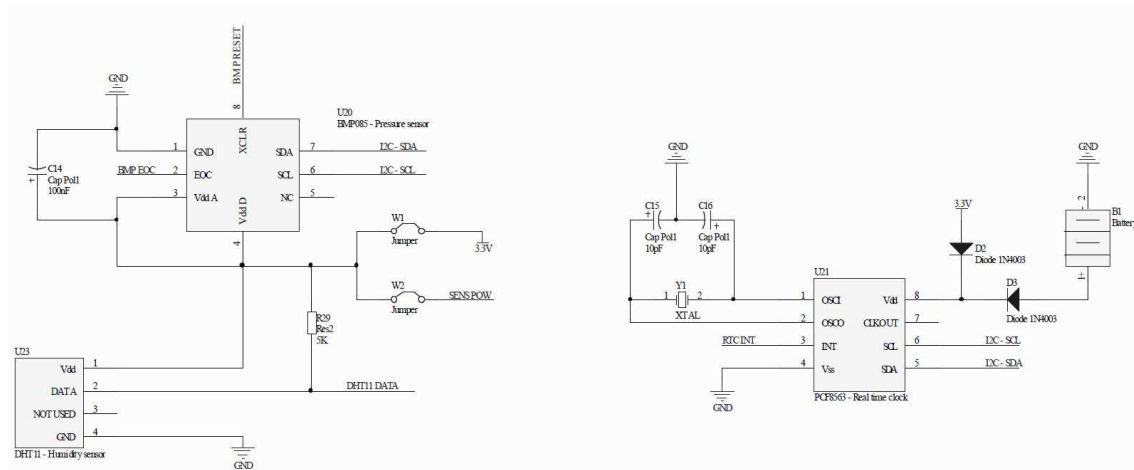
Kako bi se praktično realizirale prikazane sheme, izrađen je model dvoslojne pločice prikazan na Slici 8.9. Plave linije predstavljaju vodove na donjoj dok crvene linije predstavljaju vodove na gornjoj strani električne pločice. Dimenzije pločice iznose 100x185 sa prosječnom širinom vodova od 0.3 [mm]. Dimenzija rupa iznosi prosječno 0.9 [mm]. Naručena je izrada električne pločice sa metaliziranim rupama i stop lakom. Konačan rezultat vidljiv je na Slici 8.10.



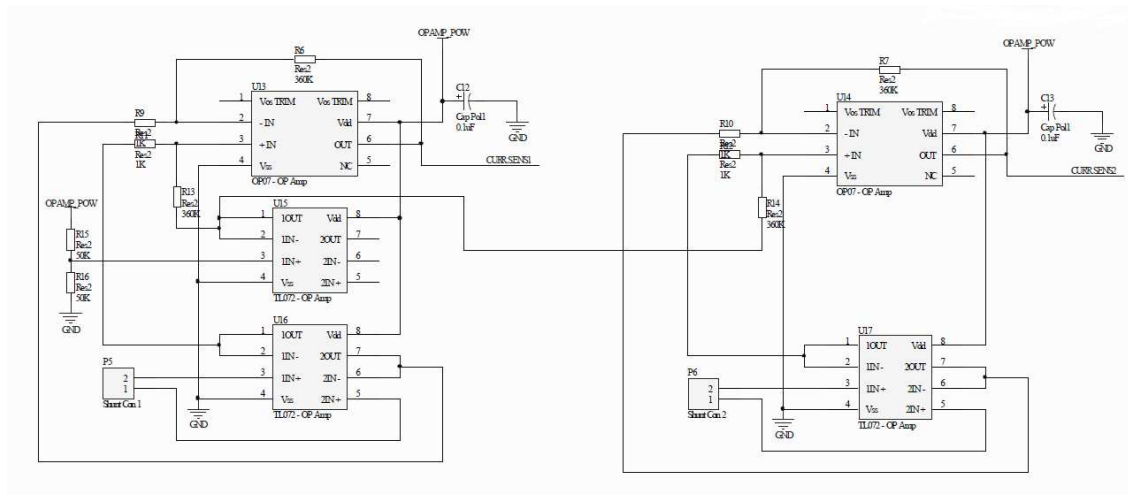
Slika 8.1. Prikaz dijela električne sheme sa mikrokontrolerom i XBee modulom



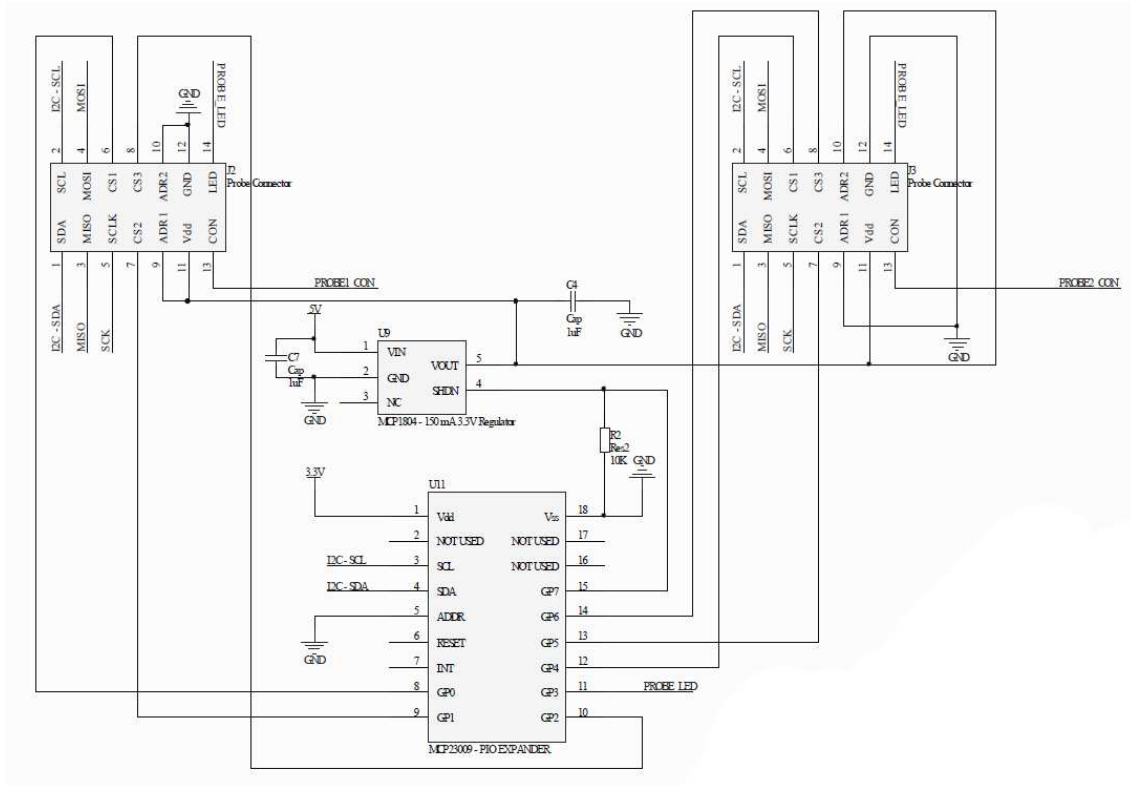
Slika 8.2. Prikaz dijela električne sheme sa memorijskim modulima



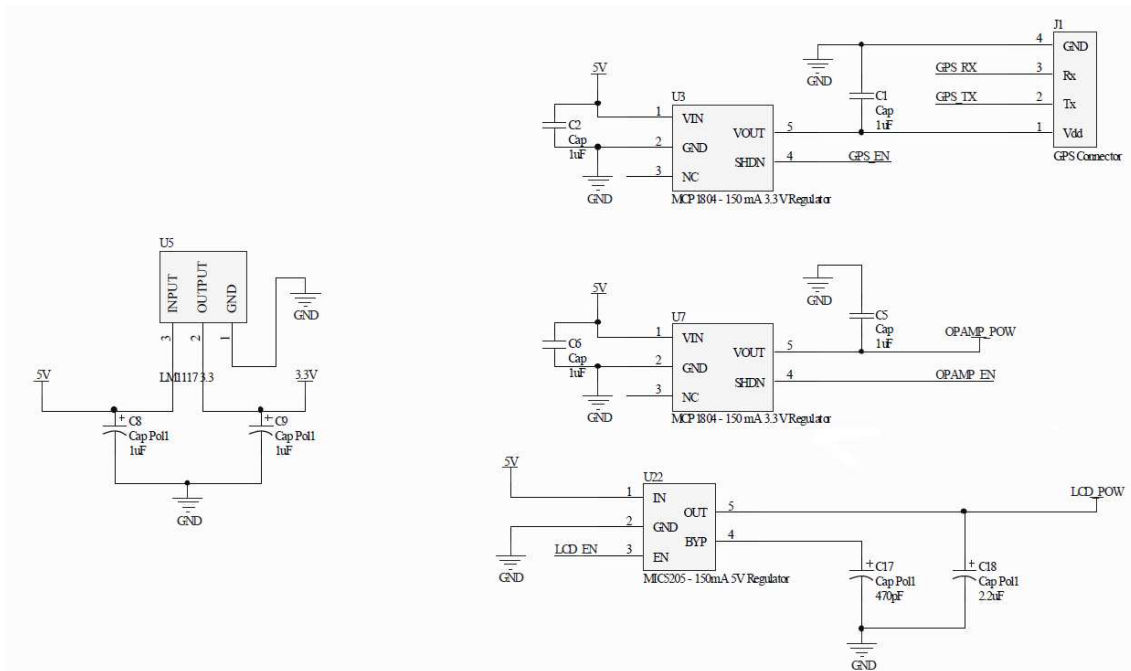
Slika 8.3. Prikaz dijela električne sheme senzora i RTC modulom



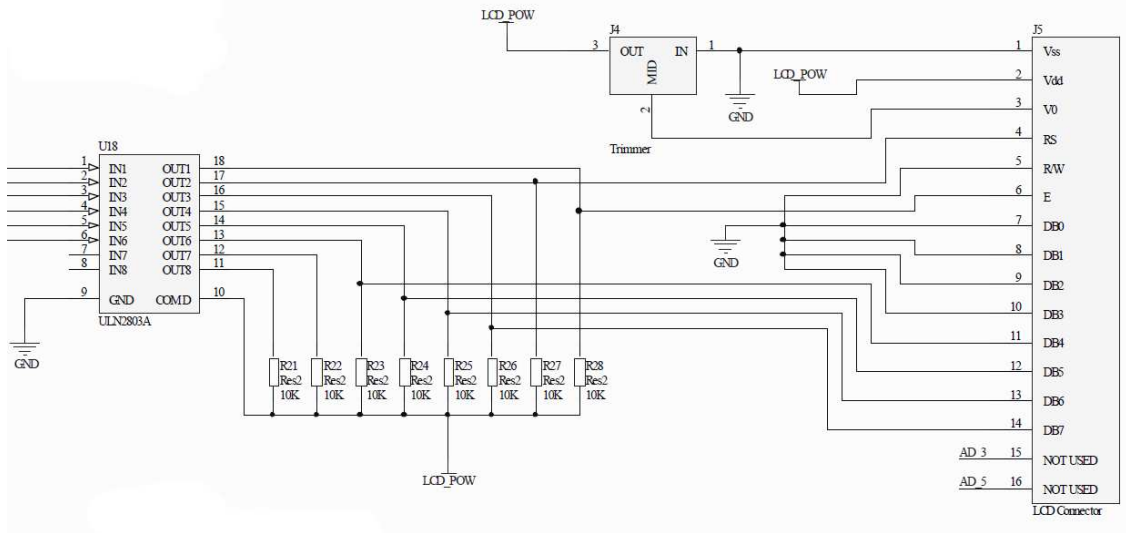
Slika 8.4. Prikaz dijela električne sheme sa operacijskim pojačalima za mjerenje struje



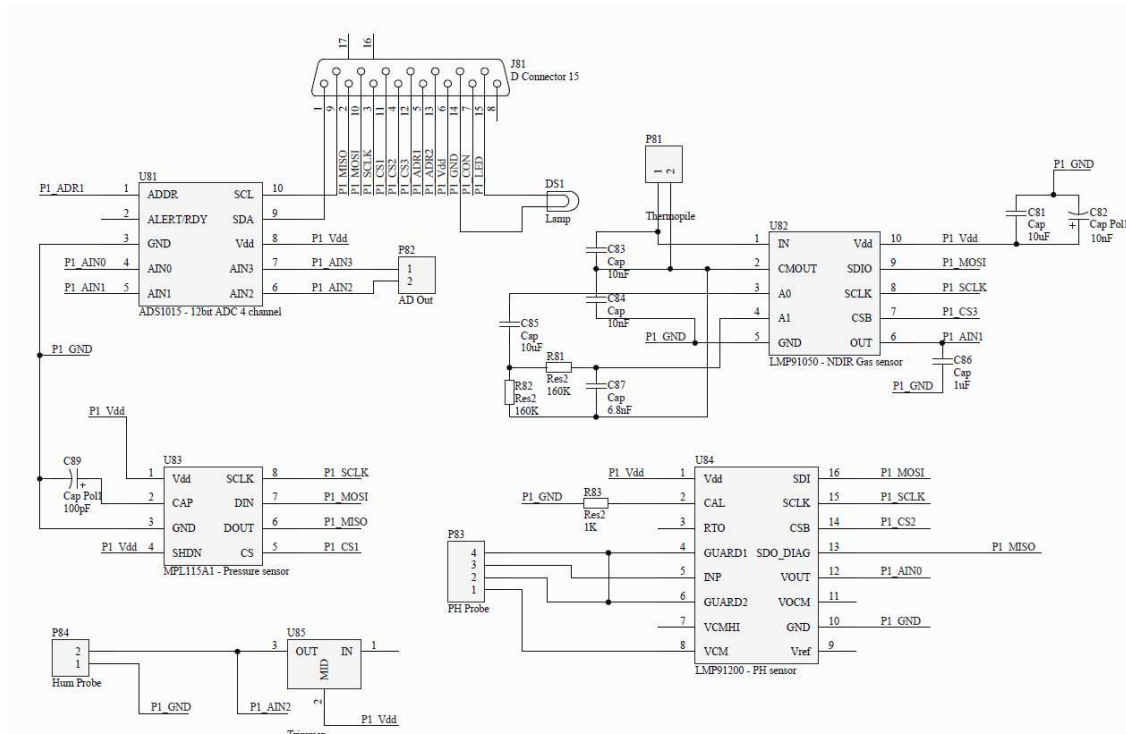
Slika 8.5. Prikaz dijela električne sheme sa vezama prema senzorskim sondama



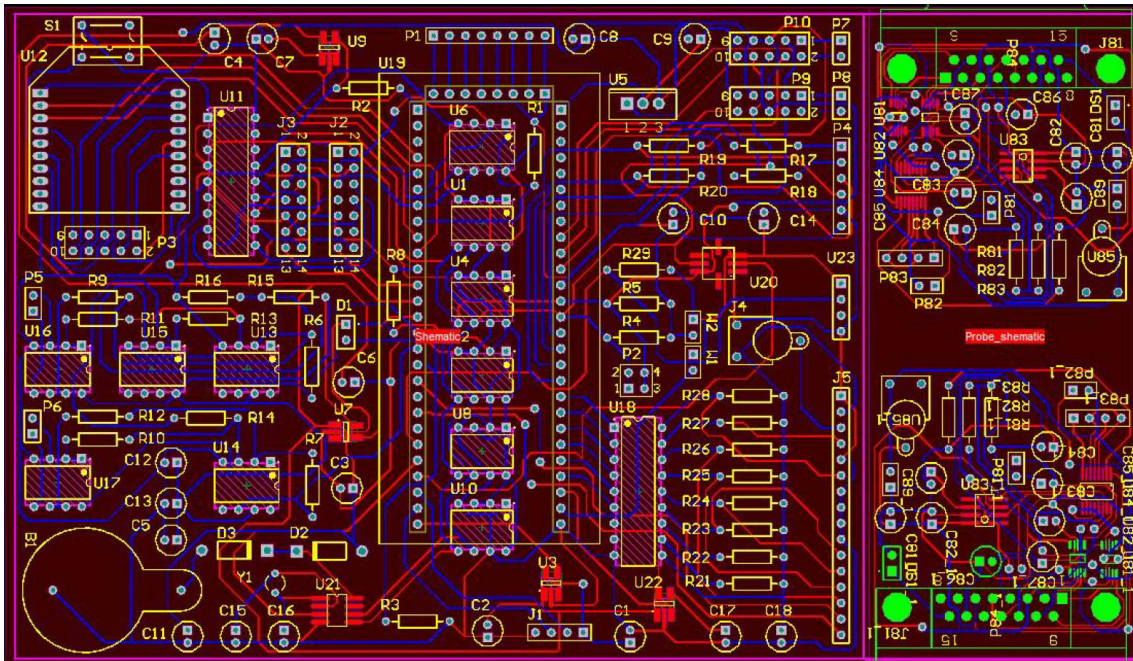
Slika 8.6. Prikaz dijela električne sheme sa regulatorima napajanja



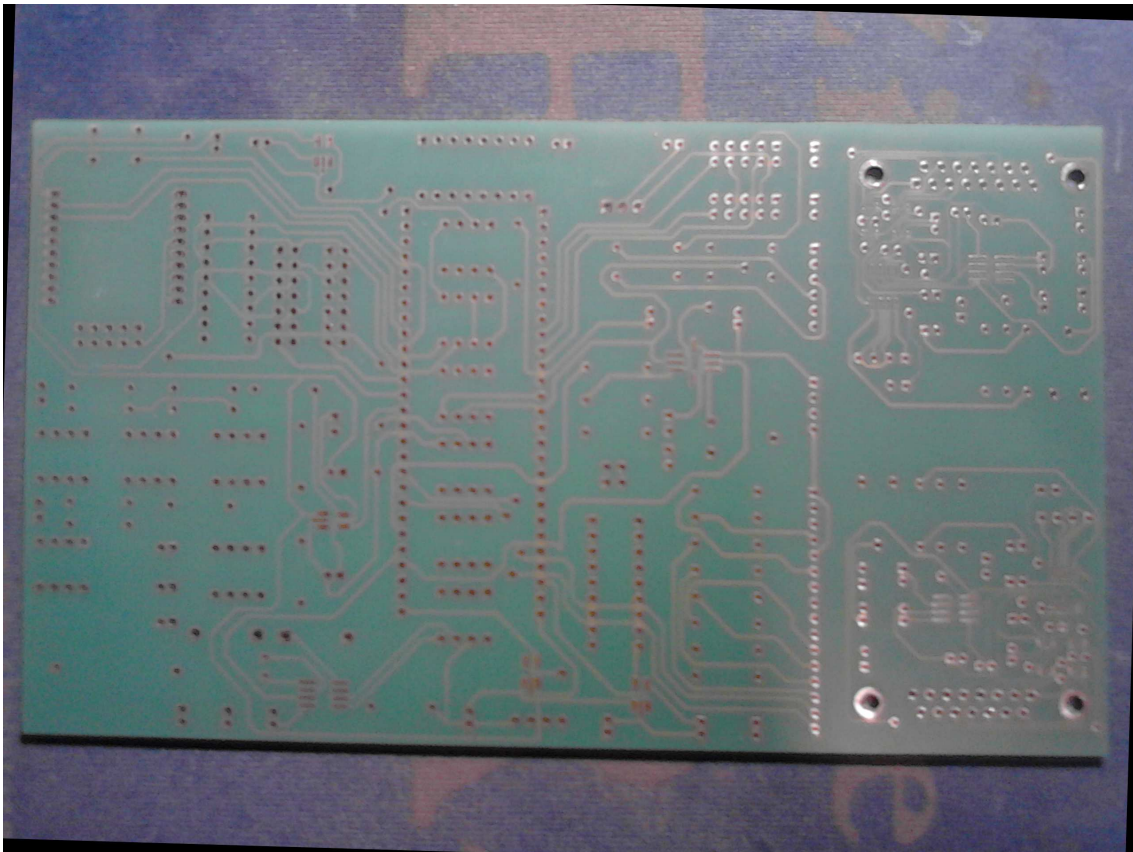
Slika 8.7. Prikaz dijela električne sheme sa priključkom za LCD ekran



Slika 8.8. Prikaz dijela električne sheme senzorskih sondi



Slika 8.9. Konačan izgled PCB-a poslan na izradu



Slika 8.10. Izrađena elektronička pločica

9. Zaključak

Razvijeni sustav za kontinuirani nadzor i upravljanje agrikulturnim sustavima je od početnog zamišljenog koncepta pa do trenutne faze iznimno porastao na kompleksnosti. Prvotna misao o izradi jednostavnog sustava za prikupljanje mjerenja dodatno je proširivana kako se razvijao rad na ovome projektu. U konačnici izrađen je iznimno kompleksan sustav sa velikim praktičnim značenjem. Pomoću željenih specifikacija odabrane su potrebne komponente koje su zajedno integrirane u kompaktnu cjelinu. Ova cjelina uz pomoć izrađene programske podrške omogućuje krajnjem korisniku jednostavan pristup mjerenjima. Prilikom izrade ovog sustava vodilo se računa o intuitivnosti i fleksibilnosti kako bi krajnji korisnik na jednostavan način mogao koristiti sustav bez trošenja vremena na savladavanje tehničke problematike. Integracija senzorskih i upravljačkih stanica u jednu funkcionalnu cjelinu omogućuje automatizaciju procesa upravljanja zelenim površinama u zatvorenoj petlji.

Izrađeni sustav predstavlja jeftino i jednostavno rješenje koje bi moglo približiti tehnologiju malim poduzetnicima u poljoprivredi. Postojeća rješenja su izrazito skupa i nefleksibilna, te su kao takva dostupna samo malom broju poljoprivrednika. Upravo prije spomenute karakteristike stvaraju skepticizam i daju konačan sud o odustajanju od modernizacije. Mogućnosti koje ovaj sustav nudi su od velike koristi u poljoprivredi sa namjerom uštede vremena, povećanja rodost kulture, smanjenje troškova i rizika ulaganja te u konačnici modernizacija poslovanja. U današnjem vremenu brzog razvoja bez modernizacije bilo kakvo konkuriranje nije moguće. Dosad razvijeni sustavi ne nude mogućnosti upravljanja poljoprivrednom površinom u zatvorenoj petlji. Koristeći ovaj sustav korisnik na jednostavan način može ostvariti pouzdano upravljanje zalijevanjem, grijanjem ili bilo kojim drugim procesom, time smanjujući potrebu za ljudskim resursima i štedeći vrijeme uz apsolutnu ekološku prihvatljivost.

Ovaj sustav testiran je u stvarnim uvjetima uz prikaz dobivenih rezultata, te svih mogućnosti koje su implementirane u ovom sustavu. Svaki dio projekta od ideje, specifikacije, nabavke i integracije komponenti pa sve do konačnog rezultata opisan je u ovom radu. Iako je mnogo posla napravljeno, ovaj projekt je još u razvojnoj fazi i postoji mnogo mjesta za napredak.

Literatura

- [1] IMS 4.0 Agro Station. Station for agrometeorological purposes. Technical report, MicroStep-MIS Inc., 2010.
- [2] Pinova-Meteo Stanica. Agrometeorološka stanica za primjene u poljoprivredi. Technical report, Pinova D.o.o.
- [3] Ian Griffiths. Programming C Sharp 5.0: Building Windows 8, Web, and Desktop Applications for the .NET 4.5 Framework. O'Reilly, 2012.
- [4] Xbee-Pro Datasheet. Product manual v1.xex - 802.15.4 protocol. Technical report, Digi International Inc., 2009.
- [5] J. Champion. A flexible charting library for .net, June 2007.
- [6] T. B. Sutton R. D. Magarey and C. L. Thayer. A simple generic infection model for foliar fungal plant pathogens. 2004.
- [7] Gmap.net - great maps for windows forms and presentation, June 2010.
- [8] TRK22 Datasheet. Trk 22 miniature signal relay. Technical report, Irel - Iskra Relays, N/A.
- [9] LPC1343 Product Datasheet. Lpc1311/13/42/4 32-bit arm cortex-m3 micro-controller; up to 32 kb flash and 8 kb sram; usb device. Technical report, NXP Semiconductors, 2012.
- [10] NXP Semiconductors. Lpc1343 general info, December 2012.
- [11] LPCXpresso Schematic. Lpcxpresso lpc1343 rev a. Technical report, Embedded Artists AB, 2009.
- [12] Microbuilder.eu. Lpc1343 library and reference design, February 2003.
- [13] I^2C bus specification. Protocol overview version 2.1. Technical report, Phillips Semiconductors, 2000.
- [14] BMP085 Datasheet. Bmp085 digital pressure sensor. Technical report, Bosh Sensortec, 2009.

-
- [15] MPL115A1 Datasheet. Miniature spi digital barometer. Technical report, Freescale Semiconductor Inc., 2011.
 - [16] Louise A. Spilsbury Richard Spilsbury. Plant Growth. HEINEMANN LIB, 2008.
 - [17] H. H. Van Laar Jan Goudriaan. Modelling Potential Crop Growth Processes: Textbook With Exercises. Springer, 1994.
 - [18] Theodore W. Tibbitts. Humidity and plants. BioScience Vol. 29, No. 6, 1979.
 - [19] Humidity sensors Application Sheet. Humidity sensor theory and behavior. Technical report, Honeywell, 2008.
 - [20] DHT11 Datasheet. Humidity and temperature sensor. Technical report, D-Robotics UK, 2010.
 - [21] Wiki. Dht11 wiki, December 2012.
 - [22] KTY81 Datasheet. Kty81 series - silicon temperature sensors. Technical report, NXP Semiconductors, 2008.
 - [23] LPC1343 Application Note. Pcb layout and adc circuit recommendations for lpc1100 and lpc1300. Technical report, NXP Semiconductors, 2011.
 - [24] BPW40 Datasheet. Silicon npn epitaxial planar photodiode. Technical report, TELEFUNKEN electronic Creative Technologies, N/A.
 - [25] Andrew Frueh. The soil moisture sensor, June 2012.
 - [26] Leonard Perry. ph for the garden. University of Vermont Extension Department of Plant and Soil Science, 2003.
 - [27] Wikipedia. Soil ph influence on crop grow, January 2013.
 - [28] Paul Vossen. Changing soil ph. University of California, 2003.
 - [29] Primotronic. Mjerenje ph vrijednosti, January 2013.
 - [30] Wikipedia. ph information, December 2012.
 - [31] LMP91200 Datasheet. Lmp91200 configurable afe for low-power chemical sensing applications. Technical report, Texas Instruments Inc., 2012.
 - [32] R.L. Cooper and W.A. Brun. Response of soybeans to a carbon dioxide. Crop Science, Vol 7, p.455-457, 1967.
 - [33] Judith F. Thomas Joy M. Smith Hugo H. Rogers, Jennifer D. Cure. Influence of elevated CO_2 on growth of soybean plants. Crop Science, Vol 24, p.361-366, 1984.

-
- [34] Daniel R. Taub. Effects of rising atmospheric concentrations of carbon dioxide on plants, January 2013.
- [35] NDIR Sensors Technical Note. Tn-169, theory and operation of ndir sensors. Technical report, RAE Systems Inc., 2002.
- [36] MG811 Datasheet. Co2 sensor mg811. Technical report, Hanwei Electronics Co., 2006.
- [37] LMP91050 Datasheet. Lmp91050 configurable afe for nondispersive infrared (ndir) sensing applications. Technical report, Texas Instruments Inc., 2012.
- [38] Wiki. Mg811 carbon dioxide (co2) sensor, February 2013.
- [39] ADS1015 Datasheet. Ultra-small, low-power, 12-bit analog-to-digital converter with internal reference. Technical report, Texas Instruments Inc., 2009.
- [40] MCP23009 Datasheet. 8-bit i/o expander with open-drain outputs. Technical report, Microchip Technology Inc., 2009.
- [41] MPL115A1 Application Note. Modern altimeter and barometer system using the mpl115a. Technical report, Freescale Semiconductor Inc., 2009.
- [42] Wikipedia. Dew point information, December 2012.
- [43] David Bolton. The computation of equivalent potential temperature. *Monthly Weather Review*, 108, 1046–1053, 1980.
- [44] Dr. Richard G. Allen. REF-ET: REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION CALCULATION SOFTWARE for FAO and ASCE Standardized Equations. University of Idaho, 2011.
- [45] Dirk Raes Martin Smith Richard G. Allen, Luis S. Pereira. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56, 1998.
- [46] B. Kaye B.M. Cooke, D. Gareth Jones. *The Epidemiology of Plant Diseases*, Second Edition. Springer, 2006.
- [47] The American Phytopathological Society. Case study 1: A simple generic infection model for foliar fungal plant pathogens, January 2013.
- [48] SirfStar II Overview. Sirfstariie/lp chip set a low power gps chip set for consumer products. Technical report, SiRF Technology, Inc., 2002.
- [49] Wikipedia. Global positioning system, January 2013.
- [50] GPS Communication Reference Manual. Nmea reference manual. Technical report, SiRF Technology, Inc., 2006.

-
- [51] PCF8563 Datasheet. Pcf8563 real-time clock/calendar. Technical report, NXP Semiconductors, 2012.
 - [52] PCF8563 Application Note. Application note for the philips real time clocks pcf8563,73,83,93. Technical report, Phillips Semiconductors, 1999.
 - [53] RTC User Manual. User manual for nxp real time clocks pcf85x3, pca8565 and pcf2123, pca2125. Technical report, NXP Semiconductors, 2008.
 - [54] Serial EEPROM 64K Datasheet. 64k i^2c serial eeprom. Technical report, Microchip Technology Inc., 2010.
 - [55] Serial EEPROM 512K Datasheet. 512k i^2c serial eeprom. Technical report, Microchip Technology Inc., 2010.
 - [56] A25L016 Datasheet. 16mbit low voltage, serial flash memory with 100mhz uniform 4kb sectors. Technical report, AMIC Technology Corp., 2010.
 - [57] Xbee-Pro Tutorial. Getting started with xbee rf modules. Technical report, Pallalax Inc., 2010.
 - [58] LPC1343 User Manual. Um10375 lpc1311/13/42/43 user manual. Technical report, NXP Semiconductors, 2012.
 - [59] GDM1601E Datasheet. 16 segment lcd with no backlight. Technical report, Xiamen Ocular, N/A.
 - [60] KS0066U Datasheet. 16com / 40seg driver and controller for dot matrix lcd. Technical report, Samsung electronics, 2005.
 - [61] Levent Saltuklaroglu. Controlling leds (liquid crystal displays) and vlds (vacuum fluorescent displays) with parallel port, February 2003.
 - [62] MIC5205 Datasheet. 150 ma low-noise ldo regulator. Technical report, Micrel Inc., 2006.
 - [63] MCP1804 Datasheet. 150 ma, 28v ldo regulator with shutdown. Technical report, Microchip Technologi Inc., 2011.
 - [64] LM1117 3.3 V Datasheet. Lm1117/lm1117i 800ma low-dropout linear regulator. Technical report, Texas Instruments Inc., 2004.
 - [65] LPC1343 Application Note. Using the lpc13xx low power modes and wake-up times on the lpcxpresso. Technical report, NXP Semiconductors, 2010.
 - [66] Low Level Measurements Handbook, Precision DC Current, Voltage, and Resistance Measurements. Keithley Instruments, 2004.
 - [67] Current Measurement Application Note Tim Regan. Current sense circuit collection making sense of current. Technical report, Linear Technology, 2005.

-
- [68] OP07 Datasheet. Ultralow offset voltage operational amplifiers. Technical report, Analog Devices, 2002.
 - [69] TL072 Application Note. Low-noise jfet-input operational amplifiers. Technical report, Texas Instruments Inc., 2005.
 - [70] David L. Jones. Pcb design tutorial. Tutorial by David L. Jones, 2004.

11. Sažetak

Autor: Edin Kočo

Ime rada: Razvoj i izrada uređaja za kontinuirani nadzor i upravljanje agrikulturnim sustavima

U ovom radu opisan je razvoj i izrada uređaja za kontinuirani nadzor i upravljanje agrikulturnim sustavima. Izrađeni sustav sastoji se od senzorskih stanica koje omogućuju izvođenje različitih mjerenja i njihovo spremanje, te od upravljačkih stanica koje omogućuju upravljanje različitim procesima na poljoprivrednoj površini. Sustav nadzire korisnik pomoću aplikacije na računalu i bežične veze prema svim stanicama u okolici.

Detaljno su objašnjeni postupci realizacije svih cjelina ovog sustava, kao što su postupak odabira i integracije komponenti, ostvarivanje bežične komunikacije, izrada programske podrške, te dizajniranje senzorskih i upravljačkih stanica. Navedeni su principi prikupljanja, obrade i spremanja podataka na senzorsku stanicu. Izrađena je senzorska stanica kao kompaktna i funkcionalna cjelina spremna za praktičnu primjenu. Trenutno su realizirana mjerenja temperature zraka, vlažnosti zraka, tlaka zraka, temperature tla, vlažnosti tla, osvjetljenosti, koncentracije plina CO_2 , pH vrijednosti tla, temperature iznad tla, stanja baterijskog napajanja i potrošnje sklopa. Ostvarena je mogućnost lociranja senzorskih stanica pomoću GPS modula te automatsko prikazivanje pozicije unutar programske podrške za korisnika. Objašnjen je koncept realizacije upravljačke stanice te princip upravljanja poljoprivrednom površinom. Izrađena je kvalitetna programska podrška za krajnjeg korisnika s ciljem jednostavnosti uporabe i velikim izborom dodatnih mogućnosti. Ostvarena programska podrška uključuje realizaciju povezivanja sa senzorskim i upravljačkim stanicama na terenu, prikupljanje i prezentaciju mjerenja, njihovo spremanje i ispisivanje. Integrirane su mogućnosti proračuna dodatnih informacija iz prikupljenih mjerenja kao: vjerojatnosti pojave određenih bolesti biljaka, proračun točke rosišta, proračun visine i temperature oblaka, izračun evapotranspiracije te proračun kratkoročne vremenske prognoze. Sustav je sposoban primiti podatke od 255 senzorskih i 255 upravljačkih stanica.

Sustav je testiran u stvarnom okruženju te su prikazani dobiveni rezultati. Izrađeni sustav pokazao je iznenađujuće dobre rezultate pri primjeni, stoga se može zaključiti da je zamišljeni koncept uspješno proveden. U planu je automatizacija zalijavanja veće zelene površine korištenjem upravljačke stanice i povratnih veza sa senzorskih stanica.

Ključne riječi: senzorske mreže, ugradbeni sustavi, upravljanje zelenim površinama, agrikultura

12. Summary

Author: Edin Kočo

Paper name: Development and production of equipment for continuous monitoring and management of agricultural systems

In this paper we describe the development and production of equipment for continuous monitoring and management of agricultural systems. The developed system consists of sensor stations which allow the collection of various measurements and control stations that can be used to control different processes on agricultural land. End user can supervise the whole system by using the developed software and wireless connection to nearby stations.

The process of making this system and all its parts is described in this paper. Component choices and integration, realization of wireless communication, software support, fabrication of sensor and control stations and many other prerequisites for full system integration were described in detail. The principles of measurement acquisition, processing and data saving was explained in detail. Sensor station was made in a compact form ready for practical use. The sensor station is able to measure air temperature, air humidity, air pressure, soil temperature, soil humidity, luminosity, concentration of CO_2 gas, soil pH value, temperature above soil, battery level and station current consumption. GPS module was used to locate the sensor station and automatically report the station position to the end user within the software support. The basic concept for the practical realization of control station along with the idea on how to control the agricultural land was explained. Software for the end customer was developed while keeping in mind the need for simplicity and high customizability. The developed software allows the user to connect to all nearby sensor and control stations in the field, acquire and visualize measurement data and finally save or print for later use. The user can choose among additional interesting information that can be calculated from the measurement data such as: calculating crop disease probability, calculating dew point, calculating cloud height and temperature, calculating evapotranspiration and short term weather forecast. The system is designed to support up to 255 sensor and 255 control stations.

This system was tested in real environment and the acquired data is presented. The developed system showed surprisingly good results in practical use and the results proved that the initial concept was successfully implemented. Future plans involve testing the system on larger scale using control station and measurement feedback from multiple sensor stations.

Key words: sensor networks, embedded systems, agricultural area control, agriculture