UNIVERZITET CRNE GORE ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET





NEBOJŠA ŠKEROVIĆ

Razvoj autonomnog, višekanalnog mikrokontrolerskog sistema niske potrošnje zasnovanog na ESP8266 mikrokontroleru za očitavanje 4-20 mA i 0-10 V signala i njegova integracija u "Internet stvari"

MASTER RAD

Podgorica, 2024

PODACI I INFORMACIJE O STUDENTU

Ime i prezime:	Nebojša Škerović
Datum i mjesto rođenja:	11.08.2000. godine, Bar, Crna Gora
Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija:	Energetika i automatika, 2022
INFORMACIJE O MASTER RADU:	
Naziv master studija:	Automatika i industrijska elektrotehnika
Naslov master rada:	Razvoj autonomnog, višekanalnog mikrokontrolerskog sistema niske potrošnje zasnovanog na ESP8266 mikrokontroleru za očitavanje 4-20 mA i 0-10 V signala i njegova integracija u "Internet stvari"

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada:	03.06.2024. godine
Datum sjednice Vijeća univerzitetske jedinice na kojoj je tema prihvaćena:	10.07.2024. godine
Mentor:	Prof. dr Milovan Radulović
Komentor:	Doc. dr Amar Kapić

Komisija za ocjenu/odbranu rada:

Datum odbrane:

Prof. dr Milena Erceg Prof. dr Milovan Radulović Doc. dr Amar Kapić

26.02.2025. godine

Datum promocije:

Ime i prezime autora: Nebojša Škerović, BSc

ETIČKA IZJAVA

U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 18 Pravila studiranja na master studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je master rad pod naslovom:

Razvoj autonomnog, višekanalnog mikrokontrolerskog sistema niske potrošnje zasnovanog na ESP8266 mikrokontroleru za očitavanje 4-20 mA i 0-10 V signala i njegova integracija u "Internet stvari"

moje originalno djelo.

Podnosilac izjave:

HULKepolut

Nebojša Škerović, BSc

U Podgorici, dana 24.12.2024. godine.

Neizmjerno sam zahvalan svojim roditeljima i bratu, čija su podrška i vjera u mene bili moj oslonac na svakom koraku mog puta.

Posebnu zahvalnost dugujem svojim mentorima prof. dr Milovanu Raduloviću i doc. dr Amaru Kapiću na izdvojenom vremenu i nesebičnoj pomoći.

Nebojša Škerović

SAŽETAK

Sistemi za praćenje i upravljanje određenim procesima zauzimaju značajno mjesto u današnjem tehnološkom razvoju, s obzirom na to da je trenutno sve veći broj uređaja koji omogućavaju nadgledanje procesa kojima su namijenjeni. Ti sistemi nastaju spajanjem dvije cjeline: sistema za prikupljanje podataka i komunikacije sa korisnikom. Usložnjavanjem industrijskih i svakodnevnih procesa javlja se potreba za upotrebom sve većeg broja senzora koji će korisniku omogućiti stvaranje što vjerodostojnije slike dešavanja koje se nadgleda. Samim tim, istovremena upotreba velikog broja senzora iziskuje potrebu za razvojem sistema koji je u mogućnosti da vrši akviziciju podataka sa više priključenih senzora i prikazuje ih vjerodostojno u realnom vremenu. U vremenu Interneta i Bluetooth-a razvoj uređaja za akviziciju podataka sa senzora nastoji da iskoristi neki tip bežične komunikacije koji će pružiti mogućnosti povezivanja više ovakvih uređaja u mrežu danas poznatu pod nazivom "Internet stvari".

U ovom master radu je prikazan razvoj sistema za višekanalnu akviziciju podataka sa analognih senzora integrisan u "Internet stvari". Predloženi sistem karakteriše niska potrošnja električne energije i mali šum pri radu. Zasnovan je na metodi selekcije odgovarajućeg A/D konvertora, mikrokontrolera, komunikacionih protokola, baze podataka i softvera za vizualizaciju podataka imajući za cilj da bude široke primjene i u skladu sa aktuelnim komponentama i softverima.

Razvijeni sistem je izrađen na štampanoj ploče na kojoj su kao glavne komponente integrisani ESP8266 mikrokontroler i AD4111 čip, čime je postignuta njegova ekonomska isplativost. Ulazni naponski opseg od ± 10 V i ulazni strujni opseg od 0 - 20 mA sigma-delta A/D konvertora u AD4111 čipu omogućavaju očitavanje širokog spektra analognih senzora koji se danas koriste, kako u industriji, tako i u svakodnevnoj upotrebi. Osim toga, dizajn AD4111 čipa omogućava da se na razvijeni sistem mogu istovremeno priključiti 8 analognih senzora sa naponskim i 4 analogna senzora sa strujnim izlazima.

Pored internog referentnog napona AD4111 čipa, u razvijenom sistemu je dodatno implementiran i eksterni naponski regulator koji može da služi kao referentni napon A/D konvertoru. Preciznost eksternog referentnog napona od ± 0.02 % u odnosu na preciznost internog referentnog napona od ± 0.12 %, je doprinijela većem efektivnom broju bitova A/D konvertora od 0 % do 2.34 % naponskih signala i od 0 % do 1.57 % strujnih signala korišćenjem eksternog

umjesto internog referentnog napona. Osim toga sistem je osmišljen u vidu "plug and play" rješenja koje korisniku dozvoljava mogućnost konfigurisanja sistema bez prethodnog znanja o programiranju. Ono je u radu predloženo u vidu web stranice, gdje mikrokontroler nakon primljene konfiguracije započinje slanje podataka putem MQTT protokola koristeći dostupnu lokalnu Wi-Fi mrežu iz okoline.

Čuvanje podataka je odrađeno upotrebom InfluxDB baze podataka koja je optimizovana za čuvanje vremenski zavisnih podataka, poput izmjerenih vrijednosti sa senzora, dok je kao softver za vizualizaciju mjerenja iskorišćena Grafana platforma.

Ključne riječi: AD4111 čip, ESP8266 mikrokontroler, analogni senzor, MQTT, baza podataka

ABSTRACT

Tracking and control systems for specific processes play a significant role in today's technological development, considering the growing number of devices enabling the monitoring of their designated processes. These systems are created by combining two components: a data acquisition system and a user communication interface. The increasing complexity of industrial and everyday processes necessitates the use of a larger number of sensors, allowing users to create an accurate representation of monitored events. Consequently, the simultaneous use of a large number of sensors requires the development of systems capable of acquiring data from multiple connected sensors and presenting it reliably in real time. In the era of the Internet and Bluetooth, the development of data acquisition devices for sensors aims to utilize some form of wireless communication, enabling the interconnection of these devices into a network known today as the "Internet of Things".

This master's thesis presents the development of a system for multi-channel data acquisition from analog sensors integrated into the Internet of Things. The proposed system is characterized by low power consumption and low noise during operation. It is based on selecting the appropriate A/D converter, microcontroller, communication protocols, database, and data visualization software, aiming to ensure wide applicability and compatibility with current components and software solutions.

The developed system is implemented on a printed circuit board, with the main components being the ESP8266 microcontroller and the AD4111 chip making it economically viable. The input voltage range of ± 10 V and the input current range of 0–20 mA of the sigma-delta A/D converter in the AD4111 chip enable reading a wide spectrum of analog sensors used today, both in industrial and everyday applications. Additionally, the design of the AD4111 chip allows for the simultaneous connection of 8 analog sensors with voltage outputs and 4 analog sensors with current outputs to the developed system.

Beyond the internal reference voltage of the AD4111 chip, the developed system incorporates an additional external voltage regulator, which can serve as a reference voltage for the A/D converter. The precision of the external reference voltage at $\pm 0.02\%$, compared to the internal reference voltage's precision of $\pm 0.12\%$, contributes to a higher effective number of bits of the A/D converter, ranging from 0% to 2.34% for voltage signals and from 0% to 1.57% for

current signals when using the external reference voltage instead of the internal one. Moreover, the system is designed as a "plug and play" solution, allowing users to configure the system without prior programming knowledge. This functionality is proposed in the thesis as a web page, where the microcontroller, after receiving the configuration, starts transmitting data via the MQTT protocol using the available local Wi-Fi network.

Data storage is handled using the InfluxDB database, optimized for storing time-dependent data, such as sensor-measured values, while the Grafana platform is employed for measurement visualization.

Key words: AD4111 chip, ESP8266 microcontroller, analog sensor, MQTT, database

SPISAK SKRAĆENICA/AKRONIMA	12
1. UVOD	13
1.1 Komunikacioni protokoli na kojima je zasnovan "IoT"	14
1.2 Pregled razvijenih DAQ sistema integrisanih u "IoT"	15
1.3 Motivi za razvoj DAQ sistema	17
1.4 Organizacija master rada	18
2. TEORIJSKI OPIS SEGMENATA VIŠEKANALNOG SISTEMA ZA OČITAVANJE SENZORA	20
2.1. A/D konvertori	20
2.2. AD4111 čip	27
2.2.1. Karakteristike i opis čipa	28
2.2.2. Mjerni ulazi i dijagram pinova AD4111 čipa	29
2.3. Mikrokontroleri	30
2.4. ESP8266 D1 mini mikrokontroler	31
2.4.1. Karakteristike i dijagram pinova mikrokontrolera	31
3. SIMULACIJA RADA SIGMA-DELTA A/D KONVERTORA	33
3.1. Sumator (diferencijalni pojačavač)	33
3.2. Integrator	34
3.3. Komparator i D-flip-flop	35
3.4. Multiplekser	35
3.5. Simulacija u LTSpice softveru	36
4. DIZAJN I FABRIKACIJA ŠTAMPANE PLOČE (PCB) SA INTEGRISANIM AD4111 ČIPOM I ESP8266 MIKROKONTROLEROM	40
4.1. Dizajn električnog kola tipičnog načina povezivanja AD4111 čipa i namjene njegovih pinova	40
4.1.1. Naponski ulazi AD4111 čipa i njihova prenaponska zaštita	41
4.1.2. Strujni ulazi AD4111 čipa i njihova prekostrujna zaštita	43
4.1.3. SPI komunikacioni protokol i njegova vizualizacija pomoću LED indikatora	44
4.1.4. Napajanje AD4111 čipa i referentni napon za A/D konvertor	46
4.2. Dizajn štampane ploče sa optimalnom pozicijom komponenti i njihovim međusobnim rutiranjem	47
5. KONFIGURACIJA RAZVIJENOG SISTEMA I TEST NJEGOVIH PERFORMANSI	52
5.1. Uspostavljanje SPI komunikacije sa AD4111 čipom i njegovo podešavanje	52

SADRŽAJ

5.2. Test performansi štampane ploče zasnovan na proračunu efektivnog broja bitova A/D konvertora upotrebom internog i eksternog linearnog naponskog regulatora	56
5.2.1. Proračun efektivnog broja bitova na naponskom ulazu A/D konvertora upotrebom internog i eksternog linearnog naponskog regulatora	57
5.2.2. Proračun efektivnog broja bitova na strujnom ulazu A/D konvertora upotrebom internog i eksternog linearnog naponskog regulatora	60
6. REALIZACIJA WEB STRANICE ZA KONFIGURACIJU RAZVIJENOG SISTEMA I IMPLEMENTACIJA MQTT PROTOKOLA ZA BEŽIČNO SLANJE MJERENJA	64
6.1. Realizacija web stranica za povezivanje sistema na dostupnu Wi-Fi mrežu i za konfiguraciju sistema	64
6.2. Implementacija MQTT komunikacionog protokola za bežično slanje mjerenja	67
6.3. JSON formatiranje podataka i test njihovog slanja MQTT protokolom	69
7. IMPLEMENTACIJA BAZE PODATAKA I SOFTVERA ZA VIZUALIZACIJU SENZORSKIH MJERENJA	72
7.1. InfluxDB baza podataka	72
7.2. Grafana platforma za vizualizaciju podataka	75
7.3. Testno okruženje i prikaz višekanalnog mjerenja različitih senzora	75
7.4. Testno okruženje i prikaz izvršenog višekanalnog očitavanja više senzora istog tipa	78
8. ZAKLJUČAK	82
LITERATURA	84

SPISAK SKRAĆENICA/AKRONIMA

Skraćenica/akronim	Puni naziv	Objašnjenje/prevod
AP	Access point	Pristupačna tačka
CPU	Central processing unit	Procesor računara
DAQ	Data acquistion	Pribavljanje podataka
DHCP	Dynamic host configuration protocol	Protokol za automatsko dodjeljivanje IP adresa uređajima
IoT	Internet of Things	mreža Internet stvari
JSON	JavaScript object notation	Format za razmjenu podataka
MISO	Master input slave output	Tok informacija od podređenog ka glavnom uređaju
MOSI	Master output slave input	Tok informacija od glavnog ka podređenom uređaju
PCB	Printed circuit board	Štampana ploča
SAR	Successive approximation register	Tip A/D konvertora zasnovan na registru sukcesivne aproksimacije
SMD	Surface mount devices	Površinski montirane komponente
SPI	Serial peripheral interface	Komunikacioni protokol - Serijski periferni interfejs
SPS	Samples per second	Uzoraka po sekundi
STA	Station	Stanica
TSDB	Time series database	Baza podataka za vremenski zavisne podatke
TVS	Transient voltage suppressor	Dioda za odvođenje prenapona

1. UVOD

Svjedoci smo eksponencijalnog rasta upotrebe senzora za praćenje i upravljanje sve kompleksnijim procesima, odnosno za potrebom korišćenja sve većeg broja senzora u takvim sistemima. Razvoj pametnih zgrada, gradova, tehnološki napredak u medicini, sportu, industriji i pametnim uređajima samo su neki od razloga za upotrebu velikog broja senzora. Pored navedenog, današnji tehnološki razvoj je postao gotovo nezamisliv bez upotrebe Interneta i drugih bežičnih oblika komunikacije koji omogućavaju efikasnije obavljanje radnih zadataka.

Samim tim, razvoj sistema za akviziciju podataka (u daljem tekstu: DAQ *eng: data acquisition*) sa senzora mora da prati trenutni razvoj senzora, bežičnih komunikacionih protokola, kao i potrebu za praćenjem složenih procesa. DAQ sistemi, koliko god bili jednostavni ili kompleksni, nalaze se gotovo svugdje, počevši od svih grana industrije [1], zatim preko sporta [2], medicine [3], agrikulture [4], do nadzora punjenja solarnih baterija [5] i slično.

Sa druge strane, sigurno je reći da su Internet i bežične komunikacije promijenile način na koji živimo, međusobno komuniciramo i obavljamo svakodnevne aktivnosti. Njihova implementacija u svakodnevici i paralelan razvoj pametnih uređaja omogućava nam brz i jednostavan pristup svim informacijama od interesa.

Danas, proizvodnja najvećeg dijela električnih uređaja omogućava njihov nadzor ili upravljanje preko Interneta i drugih oblika bežičnih komunikacija, počevši od klima uređaja, stereo zvučnika, televizora, preko pametnih satova, štampača, nadzornih kamera, do kućne rasvjete, punjača za električne automobile, EKG uređaja itd. Takva mreža koja služi za povezivanje velikog broja uređaja, zarad njihovog nadzora i upravljanja, prezentovana je i imenovana je kao "Internet stvari" (skraćeno: *eng* "IoT"), prvi put 1999. godine od strane Kevin Aštona. Nedugo zatim, početkom 21. vijeka interesovanje ka razvoju ove mreže je počelo da raste da bi trajalo i danas. Po "State of IoT Summer 2024" izvještaju ova mreža je na kraju 2023. godine imala čak 16.6 milijardi povezanih uređaja, što je porast od 15% u odnosu na 2022. godinu, dok se očekuje rast od još dodatnih 13% do kraja 2024. godine [6].

Autori u radu [7] opisuju "IoT" kao nastavak razvoja informacionih tehnologija, koristeći trenutno izolovane mreže i digitalne infrastrukture pretvarajući ih u jednu globalnu mrežu međusobno povezanih heterogenih objekata.

Kakav god pogled bio na ovu mrežu, jedno je sigurno: cilj "IoT-a" jeste da ljudima omogući lakše obavljanje zadatka, kako u kućnoj varijanti, tako i na radnom mjestu. Osim toga, u kombinaciji sa sistemima za akviziciju podataka, prema autorima iz [8], posjeduje potencijal za transformaciju domaćinstava, kancelarija i radnih prostora u energetski svjesna i optimizovana okruženja.

S obzirom na to da se radi o senzorski zasnovanim sistemima, DAQ sistemi u kojima je integrisan "IoT" postoje gotovo od nastanka te mreže i od tada se konstantno razvijaju u skladu sa aktuelnim potrebama, predstavljajući njenu srž, budući da su oni prvi posrednici u pretvaranju signala koji dolaze sa senzora u veličine koje su čitljive i razumljive korisniku, kao i transferu tih podataka do krajnjeg korisnika. Performanse ovakvih sistema zavise od više faktora: preciznosti i brzine mjerenja, broja priključenih senzora, fleksibilnosti po pitanju tipova senzora i pouzdanosti bežične komunikacije. Dakle, svaki uređaj čije se fizičke veličine mogu očitavati preko Interneta ili drugih oblika bežične komunikacije, zapravo u sebi posjeduje DAQ sistem u kojem je integrisan "IoT".

1.1 Komunikacioni protokoli na kojima je zasnovan "IoT"

U [9] su definisane i izdvojene najčešće korišćeni komunikacioni protokoli pomoću kojih mreža "IoT" funkcioniše:

- "Constrained Application Protocol" (CoAP) predstavlja jedan od Internet protokola koji je dizajniran za uređaje sa ograničenim resursima. Koristi se za komunikaciju između računara i stvoren je posebno za "IoT" sisteme koji koriste HTTP protokole.
- "Message Queue Telemetry Transport" (MQTT) je protokol za razmjenu poruka koji je primarno stvoren za komunikaciju između računara, kao i za daljinsko praćenje "IoT" okruženjima. Glavna svrha ovog protokola je prikupljanje podataka sa različitih uređaja i objekata, koristeći TCP protokole kako bi omogućio sigurne i pouzdane isporuke poruka. MQTT troši veoma malo resursa, što ga čini upotrebljivim u velikom broju aplikacija gdje su uređaji ograničeni po pitanju procesorske snage i memorije.
- "Advanced Message Queuing Protocol (AMQP) predstavlja programski sloj za infrastrukturu orjentisanu ka razmjeni poruka koristeći primitivne metode za osiguranje prenosa poruka kako bi omogućio nesmetanu i sigurnu razmjenu podataka. Ovaj protokoli

za "IoT" sastoje se od čvrsto definisanih komponenti koje usmjeravaju i čuvaju poruke unutar posrednika kao i od skupa pravila za povezivanje komponenti [10].

 "Data Distribution Service" (DDS) predstavlja uslugu zasnovu na tehnici objava i pretplata omogućavajući skalabilan, precizan i u realnom vremenu dostupan prenos podataka. Za isporuku visokog kvaliteta u "IoT" aplikacijama se često koristi *multicast* prenos. DDS je dostupan na raznim platformama podržavajući ekonomičnu razmjenu poruka u kompleksnim sistemima.

1.2 Pregled razvijenih DAQ sistema integrisanih u "IoT"

Sistem u radu [11] zasnovan je na Arduino Uno razvojnoj ploči u ulozi mikrokontrolera i A/D konvertora, dok je za bežičnu komunikaciju iskorišćen Xbee bežični modul koji radi preko Zigbee protokola. U radu su korišćena dva senzora: E-399 senzor pH vrijednosti vode i CZ15/46 senzor zamućenosti vode. Iako ovaj sistem karakteriše jednostavnost upotrebe i ekonomska isplativost, mane se ogledaju u malom broju ulaznih kanala i malom dometu bežične komunikacije od svega 30 m do 50 m.

U radu [12] opisan je sistem za akviziciju podataka, sličan prethodnom, zasnovan na Arduino Duemilanove razvojnoj ploči i Xbee modulu. U ovom sistemu dostupna su samo dva 10bitna analogna ulaza koja su iskorišćena za otporničke temperaturne senzore: RTD HELL-700 i NTC Thermistor sa naponskim opsezima od 0-3.5 V i 0-2.88 V, respektivno, za temperature u opsegu od 20 °C do 60 °C. Sistem predstavljen u ovom radu odlikuje ekonomska isplativost, jednostavnost upotrebe, ali i uska primjena, mali broj ulaznih kanala, niska rezolucija, kao i nemogućnost pristupa podacima preko Interneta.

U [13] je predstavljen DAQ sistem sa tri ulaza 8-bitne rezolucije, pri brzini odabiranja od osam hiljada uzoraka po sekundi (u daljem tekstu: SPS *eng: samples pre second*). U ovom radu je prvi kanal iskorišćen za praćenje temperature, drugi za mjerenje pritiska, dok se treći koristi za analizu signala u frekvencijskom domenu računanjem brze Furijeove transformacije. Razvijen sistem u ovom radu karakteriše niska potrošnja električne energije, ekonomska isplativost, kompaktan dizajn i integracija "IoT", ali i slično prethodnom radu, nedostaci mu se ogledaju u malom broju ulaznih kanala i niskoj rezoluciji A/D konvertora.

Autor rada [14] opisao je razvoj bežične mreže senzora sa integracijom "IoT" u svrhu monitoringa agrikulture. Softver sistema je razvijen u više slojeva što uključuje: ContikiOS, Instant Contiki, InfluxDB, Grafana, Ubidots i Rasbian.

ContikiOS predstavlja operativan sistem dizajniran za "IoT" aplikacije, specijalno primjenjiv u nisko-budžetnim, ekonomski isplativim mikrokontrolerima koji zahtijevaju povezanost sa Internetom. InfluxDB je baza podataka pogodna za vremenski zavisna podatke, brzo skladištenje i povlačenje podataka čineći je idealnim izborom u [14]. Podržava veliki broj komunikacionih protokola, istorijsko čuvanje podataka i njihovu vizualizaciju tokom raznih vremenskih intervala. Grafana je sa druge strane moćan softver za vizualizaciju podataka, koji se takođe često koristi u aplikacijama koje zahtijevaju vremenski zavisna mjerenja. Ubidots predstavlja "IoT" platformu koja omogućava pristupačan način za akviziciju, analizu i vizualizaciju senzorskih podataka, predstavljajući most između mjernih uređaja i krajnih korisnika.

Hardverski sistem master rada [14] sastoji se iz Zolertia Re-Mote modula, DHT22 senzora za temperaturu i vlažnost vazduha i Raspberry Pi 3 Model B računara. Zolertia Re-Mote je bežični modul dizajniran za bežične senzorske mreže, kojeg karakterišu niska potrošnja električne energije i veliki domet. Najčešće se koristi u automatizaciji pametnih zgrada i gradova, industrije, agrikulture itd. DHT22 koristi kapacitivni senzor vlažnosti vazduha i termistor za mjerenje temperature vazduha. Pogodan je za mjerenja temperature od -40 °C do 80 °C sa preciznošću od ± 0.5 % i vlažnosti vazduha od 0 % do 100 %. Raspberry Pi 3 Model B je računar na štampanoj ploči, koji koristi Linux kao operativni sistem, posjeduje veliki broj I/O pinova, USB portove, Ethernet port, HDMI port, micro SD port, Bluetooth i wireless LAN, što mu omogućava primjenu i integraciju u "IoT".

Testiranje opisanog sistema obuhvata mjerenja temeperature i vlažnosti vazduha koja su vršena svakih 10 minuta sa maksimalnom udaljenošću od 200 m između senzorskih modula. Podaci su čuvani na InfluxDB bazu podataka, da bi bili proslijeđeni Grafana softveru gdje su moglo pristupiti vizualizacijama mjerenja. Sistem razvijen u ovom master radu predstavlja sistem za akviziciju podataka integrisan u "IoT" što omogućava slikovit pregled svih mjerenja u realnom vremenu. Sa druge strane, pod nedostatkom bi se mogla smatrati bežična mreža senzora koja je ograničavajućeg dometa, a čija cijena direktno zavisi od broja senzora, budući da se koriste bežični moduli za transfer podataka.

U radu [15] predstavljen je sistem za akviziciju podataka, takođe integrisan u "IoT" namijenjen monitoringu fotonaponskih sistema. U njegovoj realizaciji korišćeno je četiri ESP8266 mikrokontrolera i senzori: INA219, DHT22, PYRA300, LM35, senzor prašine i anemometar. ESP8266 mikrokontroleri su iskorišćeni kao 10-bitni sistemi za akviziciju podataka sa senzora i ujedno poslužili za slanje podataka preko Interneta obzirom da na sebi posjeduju integrisan WiFi modul, dok je kao platforma "IoT" u ovom radu iskorišćen "Things speak". Rezultatima mjerenja prikazane su I-V i P-V karakteristike solarnog panela preuzete sa "Things speak" platforme. Slično kao u prethodnom radu, nedostatkom se može smatrati skalabilnost predstavljenog rješenja, gdje broj ESP8266 mikrokontrolera direktno zavisi od broja senzora, što dodatno komplikuje opisani sistem.

U [16] je predstavljen DAQ sistem namijenjen za elektromehanička testiranja materijala. Hardver predstavljenog rada se sastoji iz Arduino UNO R3 mikrokontrolerske razvojne ploče, na čije su 10-bitne analogne ulaze povezana dva senzora naprezanja HCSENS0036 naponskih opsega od 0 V do 3.5 V. Osim toga, iskorišćen je ADS1256, osmokanalni 24-bitni sigma-delta A/D konvertor, kompatibilan sa SPI komunikacijom, kao i mikrokontrolerska razvojna ploča Arduino UNO R3. Na jedan naponski ulaz ADS1256 A/D konvertora povezan je strujni senzor ACS712 koji je u mogućnosti da mjeri struje od -30 A do 30 A, a da pri tome daje na svom izlazu napon u opsegu od 0.5 V do 4.5 V.

Sistem razvijen u ovom radu nije implementiran u "IoT", već svoja mjerenja preko serijskog USB porta prosljeđuje Excel softveru na računaru, gdje se vrši njihovo čuvanje i odakle se dalje ta mjerenja vizualizuju.

1.3 Motivi za razvoj DAQ sistema

Razvijeni sistem u ovom master radu ima za cilj da na efikasan način prevaziđe sve nedostatke koji su predstavljeni u navedenoj literaturi. Sistem najprije treba da bude fleksibilan po pitanju tipova senzora koji se mogu priključiti. S obzirom na to da su najčešći naponski opsezi senzora: 0-5 V, 1-5 V i 0-10 V, dok je najčešći strujni opseg 4-20 mA, kao A/D konvertor je izabran čip AD4111 koji je u mogućnosti mjerenja napona u opsegu od -10 V do 10 V i mjerenja struje u opsegu od 0 mA do 20 mA. AD4111 posjeduje mogućnost mjerenja do osam naponskih i četiri strujna mjerenja što omogućava očitavanje velikog broja senzora korišćenjem samo jednog čipa. Čip raspolaže sa 24-bitnom rezolucijom i maksimalnom brzinom odabiranja od 31250 SPS u jednokanalnom, odnosno 6211 SPS u višekanalnom mjerenju.

U ovom radu, izabrani čip je korišćen u konfiguraciji sa ESP8266 mikrokontrolerom koji omogućava bežično slanje podataka, odnosno integraciju sa mrežom "IoT". To je ostvareno na način što se izmjerene naponske i strujne vrijednosti šalju preko Wi-Fi javnom brokeru uz pomoć MQTT protokola, odakle izmjerene vrijednosti može preuzeti InfluxDB baza podataka. InfluxDB baza podataka je izabrana iz razloga što je karakterišu laka implementacija, pouzdano čuvanje podataka, obrada i sortiranje vremenski zavisnih mjerenja i njihova vizualizacije. Pored toga, u ovom master radu će biti implementiran i softver Grafana u sklopu "IoT", koji će poslužiti kao alat za vizualizaciju, analizu i praćenje podataka u realnom vremenu. Time je krajnjem korisniku omogućen detaljan pregled i analiza svih mjerenja na pouzdan i napredan način u skladu sa trenutno aktuelnim softverima.

Ovako razvijen sistem karakteriše i jednostavnost upotrebe, budući da je osmišljen kao "plug and play" rješenje u kojem krajnji korisnik nema potrebu ni za kakvim programiranjem. Naime, ESP8266 mikrokontroler održava web stranicu koja služi za konfiguraciju sistema po želji korisnika. Sistem se može podesiti sa bilo kojeg uređaja koji ima pristup Internetu i web pretraživaču. Na taj način se razvijeni sistem može podesiti po želji korisnika bez potrebe za prethodnim znanjem o programiranju.

Sistem opisan u ovom master radu posjeduje široku namjenu i to kao uređaj za kontinuiranu upotrebu ili za brza testiranja.

1.4 Organizacija master rada

Rad je organizovan u osam poglavlja. U uvodnom dijelu se moglo pročitati o potrebama i pravcima razvoja DAQ sistema, kao i o najčešćim komunikacionim protokolima koji se koriste za "IoT". Zatim je predstavljen pregled trenutno dostupne literature koja opisuje trenutno razvijene DAQ sisteme. Na kraju su navedeni motivi za razvoj sistema opisanog u ovom master radu.

Nakon toga, u poglavlju 2 je dat teorijski opis segmenata DAQ sistema, gdje su nakon uvodnog dijela o njima, bili dati i razlozi opredjeljenja za korišćene komponente. Predstavljeni su tehnički opisi komponenti, dijagrami od značaja, kao i njihove opšte karakteristike. U trećem poglavlju je predstavljena pojednostavljena teorijska simulacija sigma-delta A/D konvertora u LTSpice softveru korišćenjem operacionih pojačavača, kao i pojedinačan opis svih njegovih segmenata. Nakon toga, simulacijom dvokanalnog multipleksera uz pomoć naponskih prekidača, na ulaz sigma-delta A/D konvertora su dovedeni uzastopni sinusni signali različitih frekvencija u cilju prikaza povorke jedinica i nula sa izlaza sigma-delta A/D konvertora, koje bi se u praksi dalje prosljedile digitalnom filteru.

U poglavlju 4 su nakon prikaza opštih karakteristika štampanih ploča i dizajniranih električnih kola, opisani koraci u dizajniranu same štampane ploče koja predstavlja hardver sistema razvijenog u ovom master radu sa posebnim osvrtom na pozicije i namjene svih njenih komponenti.

Nakon toga, u petom poglavlju je objašnjen način funkcionisanja SPI komunikacionog protokola i njegova implementacija zarad programiranja registara AD4111 čipa. Nakon toga je napravljen test performansi zasnovan na poređenju efektivnog broja bitova A/D konvertora u razvijenom sistemu upotrebom internog i eksternog naponskog regulatora u poređenju sa vrijednostima datih od strane proizvođača AD4111 čipa.

U poglavlju 6 je dat detaljan opis i način funkcionisanja MQTT komunikacionog protokola, koji je realizovan korišćenjem ESP8266 mikrokontrolera. Prikazan je test slanja podataka MQTT protokolom sa mikrokontrolera javnom brokeru, kao i ispravnost verifikovana korišćenjem MQTT klijent softvera.

U sedmom poglavlju je prikazan način obavljanja arhiviranja i vizualizacije očitanih mjerenja. Arhiviranje podataka je postignuto korišćenjem InfluxDB baze podataka, dok je sama vizualizacija obavljena upotrebom Grafana softvera.

Konačno, u zaključku je dat osvrt na cjelokupan rad, uz komentare koji se bave potencijalnim daljim unaprijeđenjima, ograničenjima i daljem naučnom istraživanju.

2. TEORIJSKI OPIS SEGMENATA VIŠEKANALNOG SISTEMA ZA OČITAVANJE SENZORA

2.1. A/D konvertori

A/D konvertori se koriste kako bi analogni signal pretvorili u digitalnu formu zarad njegove analize ili slanja računarima i telekomunikacionim uređajima [17]. A/D konvertori odabiranjem vrše konverziju kontinualnih signala u diskretne signale. Kontinualni analogni signali najčešće potiču od senzora koji mjere fizičke veličine u okruženju u kojem se nalaze. Prilikom odabiranja uvijek će postojati određena greška u konverziji analognog signala u digitalni. Ta greška je posljedica neizbježnog zaokruživanja ka najbližoj mogućoj vrijednosti. Veličina greške zavisi od rezolucije samog A/D konvertora, koja predstavlja broj mogućih diskretnih vrijednosti u dozvoljenom analognom opsegu konvertora.

Recimo, 10-bitni A/D konvertor može svoj dozvoljeni analogni opseg od -5 V do 5 V predstaviti u $2^{10} = 1024$ različitih naponskih nivoa. Najmanja promjena napona koju A/D konvertor može detektovati se računa formulom:

$$Q = \frac{V_{fs}}{2^N} \tag{1}$$

gdje V_{fs} predstavlja dozvoljeni analogni opseg A/D konvertora.

To znači da A/D konvertor iz primjera može prilikom odabiranja prepoznati najmanju promjenu napona od $\frac{5-(-5)}{1024}$ =9.7 mV. Na slici 2.1. prikazan je grafik na kojem se vidi digitalni izlaz iz A/D konvertora, nastao konverzijom analognog signala (označen plavom bojom), pri punom dozvoljenom analognom opsegu (oznaka FS na x-osi), kao i greška prilikom odabiranja [18].

Digitalni izlaz



Slika 2.1. Greška A/D konvertora prilikom odabiranja [18]

Osim, što veće rezolucije A/D konvertora, na njegovu preciznost takođe značajno utiče i brzina odabiranja. Jasno je da, što se većom brzinom uzorkuje analogni signal, time se i dobija vjerodostojnija replika u digitalnom obliku. Velike brzine odabiranja su neophodne kod signala visoke frekvencije poput zvučnih signala, stoga po Nikvistovom kriterijumu, frekvencija odabiranja mora biti najmanje dva puta veća od frekvencije analognog signala.

Međutim, velike brzine odabiranja takođe uvode i određeni šum, povećavajući razliku između analognog i digitalnog signala. Stoga se vrše testiranja A/D konvertora korišćenjem preciznih sinusnih signala, gdje se odnosi sinusnog signala, šuma i distorzije (SINAD) mogu proračunati uz pomoć brze Furijeove transformacije. Prema autoru rada [19], često je potrebno sprovesti još analiza, koji se tiču proračuna efektivnog broja bitova (u daljem tekstu: ENOB).

ENOB u suštini upoređuje performanse realnog A/D konvertora sa idealnim konvertorom iste rezolucije. Efektivna rezolucija A/D konvertora se u testu sa proizvoljnim ulaznim signalnom računa na sledeći način [19]:

$$ENOB = N - \log_2(\frac{P}{Q}) \tag{2}$$

gdje N predstavlja rezoluciju A/D konvertora, P predstavlja efektivnu vrijednost izmjerenog šuma, dok je Q efektivna greška odabiranja idealnog A/D konvertora. Efektivna vrijednost izmjerenog šuma se može proračunati kao standardna devijacija tog šuma prema relaciji (3):

$$P = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} (y_n - y'_n)^2}$$
(3)

gdje M predstavlja ukupan broj uzoraka, dok je y_n vrijednost n-tog uzorka, a y'_n srednja vrijednost svih uzoraka. Način računanja efektivne greške odabiranja je prikazan relacijom (1).

A/D konvertori su danas razvijeni u različitim oblicima, među kojima se po pitanju visoke rezolucije mogu izdvojiti sigma-delta A/D konvertori. Prvi put su predstavljeni 1962. godine [20], da bi dobili na značaju tek skorijim razvojem VLSI tehnologije koja zahtjeva implementaciju kompleksnih kola za obradu digitalnih signala [21]. Sigma-delta modulatori koriste A/D konvertor niske rezolucije pri brzini odabiranja mnogo većoj od Nikvistovog kriterijuma, da bi postigli visoku rezoluciju digitalnim filtriranjem [22].

Sigma-delta modulatori prvog reda se mogu jednostavno predstaviti pomoću sumatora, integratora i 1-bitnog A/D i D/A konvertora, kao što je prikazano na slici 2.2. [23].



Slika 2.2 Funkcionalni blok dijagram sigma-delta A/D konvertora [23]

Sa datog blok dijagrama se vidi da se analogni signal x(t) korišćenjem negativne povratne sprege oduzima od analognog ekvivalenta 1-bitnog digitalnog izlaza sigma-delta modulatora, nakon čega razlika ta dva signala dolazi na ulaz integratora. Zadatak integratora jeste da na svom izlazu daje vrijednost proporcionalnu akumuliranoj sumi nastaloj sumiranjem onih vrijednosti koje integrator dobija na svom ulazu. Ta suma se dalje prosljeđuje 1-bitnom A/D konvertoru koji se u analognim kolima može predstaviti analognim komparatorom i D-flip-flop-om pružajući mu pravougaoni signal određene frekvencije. Flip-flop je logičko kolo, koje može imati dva stabilna stanja: 0 i 1 i koja se mogu čuvati do sledeće vrijednosti na ulazu.

Negativna povratna sprega na slici 2.2. pokazuje da se radi o sigma-delta modulatoru prvog reda, dok se u praksi najčešće koriste sigma-delta modulatori višeg reda, dakle, sa više povratnih sprega, s obzirom na to da se sa njima postiže veći ENOB za iste brzine odabiranja [24].

Sa druge strane su SAR (*eng: Successive approximation register*) A/D konvertori, koji su poslednjih godina privukli posebno interesovanje u istraživanju zahvaljujući njihovoj energetskoj efikasnosti. SAR A/D konvertor pretvara analogni signal u digitalni korišćenjem niza uzastopnih binarnih aprokimacija. Rezolucija im se obično kreće u opsegu od 8 do 16 bita, dok su im brzine odabiranja niže od 5 MSPS.

Postoji mnogo načina za njihovu implementaciju, međutim, osnovna arhitektura je veoma jednostavna. Na slici 2.3. je data opisana struktura SAR A/D konvertora, dok je na slici 2.4. prikazan primjer 4-bitne konverzije [25]. Naime, prvo se analogni ulaz zadrži preko kola zadrške, a da bi se sproveo proces binarne pretrage, N-bitni registar se postavi na srednju vrijednost, odnosno ona vrijednost gdje su svi bitovi registra postavljeni na nuli, dok je bit sa najvećom težinom (MSB) postavljen na jedinicu. To će prouzrokovati da izlaz D/A konvertora bude jednak polovini referentnog napona. Sada, komparator ispituje da li je ulazni napon veći ili manji od napona na izlazu D/A konvertora. Za slučaj da je veći, komparator na svom izlazu daje jedinicu, što znači da će MSB bit ostati postavljen na jedinicu, a za slučaj da je bio manji, MSB bit bi se postavio na nulu. Logika SAR A/D konvertora, sada prelazi na bit manje težine u N-bitnom registru, postavljajući ga na jedinicu i obavljajući istu komparacije. Proces se ponavlja sve dok se ne dođe do bita sa najmanjom težinom (LSB), nakon čega je u N-bitnom registru dostupna digitalna forma ulaznog analognog napona.



Slika 2.3. Funkcionalni blok dijagram SAR A/D konvertora [25]



Slika 2.4. Primjer 4-bitne konverzije SAR A/D konvertora [25]

Dvije kritične komponente SAR A/D konvertora su komparator i D/A konvertor, budući da brzina konverzije zavisi od vremena stabilizacije D/A konvertora i od same logike, dok sa druge strane preciznost zavisi od komparatora obzirom da mora biti sposoban da raspoznaje male razlike između ulaznog analognog signala i izlaza iz D/A konvertora.

Pored sigma-delta i SAR A/D konvertora, značajno mjesto među njima zauzimaju i *pipeline* A/D konvertori, koji su postali najpopularnija vrsta A/D arhitekture gdje se zahtijevaju brzine odabiranja od par MSPS do preko 100 MSPS. Sa tim brzinama i rezolucijom koja se kreće u opsegu od 8 do 16 bita, pokrivaju široku primjenu u digitalnoj obradi CCD fotografija, ultrazvučnih slika, digitalnih prijemnika, digitalnih videa i brzog Eterneta [26]. Primjena A/D konvertora sa manjim brzinama odabiranja ostaju u domenu sigma-delta i SAR A/D konvertora.

Na slici 2.5 prikazan je funkcionalni blok dijagram 12-bitnog pipeline A/D konvertora. Sa slike se može vidjeti da zadržani analogni signal dolazi na prvu etapu, u kojoj 3-bitni A/D fleš konvertor vrši konverziju u tri bita. 3-bitni digitalni izlaz prolazi kroz D/A konvertor, gdje se analogni ulaz oduzima od analogne vrijednosti sa D/A konvertora. Dobijena razlika se uvećava 4 puta, nakon čega se prosljeđuje sledećoj etapi. Na kraju uvećavana razlika se dovodi na 4-bitni A/D fleš konvertor, koji na svom izlazu daje poslednja 4 bita.

S obzirom na to da su bitovi po etapama nastali u različitim vremenskim trenucima, potrebno ih je vremenski poravnati korišćenjem pomjeračkih registara i sličnih logičkih kola. Velika brzina odabiranja pipeline A/D konvertora potiče od činjenice da svaka etapa, nakon što

obavi svoju konverziju i proslijedi je sledećoj etapi i logičkom kolu za vremensko poravnavanje, može započeti ponovnu konverziju analognog signala [26].



Slika 2.5. Funkcionalni blok dijagram pipeline A/D konvertora [26]

Iz prikazanog funkcionalnog blok dijagrama pipeline A/D konvertora sa slike 2.5. primjećuje se prisustvo još jednog tipa, fleš A/D konvertora, koji predstavljaju ubjedljivo najbrži način za konverziju analognih signala u digitalne. Međutim, za njihov rad je potrebna mnogo veća količina energije nego kod već pomenutih A/D konvertora, imaju relativno nisku rezoluciju i obično su skuplji nego ostali tipovi A/D konvertora. Primjenu obično nalaze u satelitima za komunikaciju, radarima, osciloskopima i hard diskovima visoke gustine.

Na slici 2.6 je data je struktura N-bitnog fleš A/D konvertora, sa kojeg se vide da najveći dio njihove strukture čine komparatori i otpornici. Naime, za N-bitni fleš konvertor, potrebna je implementacija 2^N otpornika i $2^N - 1$ komparatora. Svaki komparator na svom izlazu daje jedinicu za slučaj da je analogni signal veći od napona sa naponskog razdjelnika, dok u suprotnom slučaju daje nulu.

Ova struktura je takođe poznata kao termometarsko enkodiranje, zato što će izlazi iz komparatora biti jedinice odozdo na gore do onog komparatora gdje ulazni signal postaje manji od napona sa naponskog djelitelja na tom komparatoru, te samim tim, uzastopna povorka jedinica, pa nula odozdo nagore, podsjeća na izgled podeljaka živinog termometra. Zatim, jedinice i nule sa komparatora dolaze na ulaz dekodera koji na svom izlazu formira N-bitnu vrijednost [27].



Slika 2.6. Struktura N-bitnog fleš A/D konvertora [27]

Opisom pomenutih tipova A/D konvertora, moguće je dobiti grafik polja primjene svakih od njih kada su u pitanju brzina odabiranja i moguća rezolucija rada [28]. Sa grafika prikazanom na slici 2.7 se može zaključiti da se sigma-delta A/D konvertori izdvajaju kada je u pitanju rezolucija rada, dok se pipeline i fleš A/D konvertori izdvajaju kada su u pitanju visoke brzine odabiranja. Između ostalog, sigma-delta A/D konvertori obično rade u opsezima odabiranja koji se kreću oko 20 kHz – 30 kHz, što je manje nego kada su u pitanju SAR A/D konvertori, ali za razliku od SAR A/D konvertora, ne zahtjevaju nikakvu kalibraciju da bi se ostvarile rezolucije od 16 bita do 18 bita, niti potrebu za anti-alijasing filterima. Međutim, sigma-delta A/D konvertori, kao što je već rečeno, mijenjaju svoju visoku brzinu u zamjenu za visoku rezoluciju, što doprinosi kompleksnosti prilikom projektovanja adekvatnog digitalnog filtra [25]. Sigma-delta A/D konvertori, kao i SAR konvertori, imaju veoma malu potrošnju električne energije u poređenju sa

fleš A/D konvertorima, dok istovremeno omogućavaju rad pri znatno većoj rezoluciji nego ostali tipovi A/D konvertora.



Slika 2.7. Grafik poređenja različitih tipova A/D konvertora u zavisnosti od brzine odabiranja i rezolucije [28]

Odlične karakteristike sigma-delta A/D konvertora, po pitanju niske potrošnje električne energije, visoke rezolucije i brzine odabiranja koja je sasvim dovoljna kada je u pitanju akvizicija podataka sa senzora industrijskog i kućnog tipa ga čine pogodnim kandidatom za A/D konvertor potreban za DAQ sistem predstavljen u ovom master radu. Iz tog razloga, prilikom izbora adekvatnog sigma-delta A/D konvertora, uzete su u obzir sljedeće karakteristike: niska potrošnja, visoka rezolucija, te veliki broj naponskih i strujnih ulaza sa ujedno velikim opsegom mjerenja. Navedene karakteristike zadovoljava AD4111 sigma-delta A/D konvertor, razvijen od strane "Analog Devices" proizvođača.

2.2. AD4111 čip

AD4111 je 24-bitni sigma-delta A/D konvertor niske snage i šuma koji posjeduje skup kola za obradu analognih signala, što mu omogućava obavljanje diferencijalnih i jednostranih mjerenja. Može obavljati konverziju analognih signala u digitalne u naponskom opsegu od ± 10 V u bipolarnom režimu i strujnom opsegu od 0 mA do 20 mA.

2.2.1. Karakteristike i opis čipa

Na slici 2.8. je prikazan funkcionalni blok dijagram AD4111 čipa. Naponski i strujni ulazi na čipu su spojeni na multiplekser sa 18 ulaza i 2 izlaza. Izlazni signal multipleksera se zatim prosljeđuje A/D konvertoru. Sigma-delta A/D konvertor unutar čipa vrši konverziju analognih signala u digitalne pri rezoluciji od 16 ili 24 bita, tokom koje koristi integrisan linearni naponski regulator koji daje 2.5 V i služi kao referentni naponski nivo. Nakon konverzije, dobijena digitalna vrijednost se obrađuje u digitalnom filteru, koji šalje krajni rezultat konverzije korisniku koristeći komunikacioni interfejs unutar čipa.

Digitalni filter integrisan unutar čipa omogućava istovremeno odbacivanje frekvencija od 50 Hz i 60 Hz pri brzini od 27.72 uzoraka po sekundi. Digitalni filter je u mogućnosti da vrši filtriranje "sinc" funkcijom trećeg reda čime se postiže umjerena redukcija šuma ili kombinacijom "sinc" funkcija petog i prvog reda, čime se postiže veća redukcija šuma, ali i sa većim kašnjenjem. Moguće je izabrati različita podešavanja digitalnog filtera i pridruživati ih različitim ulaznim kanalima, dok multiplekser prolazi kroz njih brzinom od 6210 SPS.

Takođe, čip posjeduje mogućnost detektovanja prekinutih senzorskih žica na naponskim ulazima, kao i sposobnost za spajanje sa eksternim oscilatorskim kolom i lineranim naponskim regulatorom od 2.5 V.

Čip je moguće napajati jednim naponskim izvorom od 3.3 V ili 5 V, što omogućava laku implementaciju u galvanski izolovanim aplikacijama. AD4111 može raditi u temperaturnom opsegu od -40 °C do 105 °C, a nalazi se u kućištu dimenzija 6 mm x 6 mm sa 40 pinova. Sa čipom se može komunicirati preko SPI, QSPI, MICROWIRE ili DSP komunikacionog protokola.

Sa slike se takođe mogu zapaziti ulazni baferi koji se nalaze između multipleksera i sigmadelta A/D konvertora, koji se koriste za redukciju šuma sa naponskih ulaza, dok se za strujne ulaze moraju premostiti.



Slika 2.8. Funkcionalni blok dijagram AD4111 čipa [29]

2.2.2. Mjerni ulazi i dijagram pinova AD4111 čipa

Pinovi na lijevoj strani funkcionalnog blok dijagrama predstavljaju naponske i strujne ulaze. Pinovi sa oznakom VIN0 – VIN7 i služe za naponska mjerenja, dok strujni pinovi označeni sa (IIN0+) – (IIN3+) služe za ulaz struje koja se mjeri, dok oni označeni sa (IIN0-) – (IIN3-) služe za povrat te struje.

Naponska mjerenja je moguće konfigurisati kao jednostrana, što znači da se jedan kraj naponskog senzora povezuje na pinove VIN0 – VIN7, dok se drugi kraj povezuje na VINCOM ili kao diferencijalna mjerenja gdje se oba kraja mogu povezati na parove: VIN0 i VIN1, VIN2 i VIN3, VIN4 i VIN5, VIN6 i VIN7. Detekcije prekinutih žica na naponskim pinovima se mogu iskoristiti pomoću pinova COMPA i COMPB, koji se povezuju sa naponskim ulazima u posebnoj konfiguraciji preko otpornika vrijednosti od $1k\Omega$ i kondenzatora vrijednosti od 680 pF [29].

Na slici 2.9. je dat prikaz pinova na AD4111 čipu sa pogledom odozgo. Pinovi na čipu su za površinsko montiranje (*skraćeno* SMD: *eng. surface-mount devices*).



Slika 2.9. Dijagram pinova AD4111 čipa sa pogledom odozgo [29]

2.3. Mikrokontroleri

Mikrokontroleri su uređaji koji služe da upravljaju procesom u određenom sistemu. Sastoje se iz procesorske jedinice, memorije i programibilnih I/O periferija. Njihov razvoj danas dostiže nivo koji uključuje 64-bitnih procesore u kompleksnim slučajevima, razne ugrađene antene, module, električna kola specifičnih namjena i slično.

Procesor, poznatiji kao CPU (*eng.* central processing unit) je zapravo mozak mikrokontrolera. Obrađuje i odgovara instrukcijama koje su u skladu sa pravilima definisanim od strane korisnika, koje mogu biti jednostavne poput osnovnih aritmetičkih i logičkih operacija ili kompleksne poput komunikacije i prenosa podataka drugim sistemima.

Memorija mikrokontrolera služi da skladišti podatke koje mikroprocesor prima i koristi ih da sprovede instrukcije po komadama koje su mu zadate. Postoje dva tipa memorija mikrokontrolera: programska memorija (fleš memorija) i RAM memorija. Na fleš memoriji se čuva program instaliran na mikrokontroleru, odnosno pravila zadata od strane korisnika, dok se na RAM memoriji čuva privremena memorija, poput varijabli definisanih unutar programa mikrokontrolera. Mikrokontroleri mogu sadržati i EEPROM memoriju koja predstavlja stalnu memoriju mikrokontrolera, odnosno onu koja se neće obrisati nakon njegovog isključivanja, kao i fleš memorija. Glavna razlika u odnosu na fleš memoriju je ta što se fleš memorija čita i piše u blokovima, dok EEPROM funkcioniše na nivou bajtova.

I/O periferija služi da poveže procesor sa spoljašnjom okolinom mikrokontrolera. Na svojim ulaznim portovima prima informacije, koje u digitalnoj formi šalje procesoru, koji nakon njihove obrade formira instrukcije za izlazne portove mikrokontrolera.

Osim toga, mikrokontroleri sadrže i razne hardverske komponente koje im omogućavaju regulaciju napona napajanja, radni takt, komunikaciju, konverziju analognih signala u digitalne i obrnuto.

Mikrokontroler koji se koristi u ovom master radu mora biti ekonomski isplativ, efikasan u potrošnji električne energije, imati mogućnost SPI komunikacije, posjedovati ugrađen WiFi modul zajedno sa antenom i biti mali dimenzija. Tim potrebama odgovara ESP8266 D1 mini mikrokontroler, koji je iz navedenih razloga iskorišćen u ovom master radu i to kao način za programiranje registara AD4111 čipa i za bežično slanje mjerenja sa AD4111 čipa putem Interneta bazi podataka.

2.4. ESP8266 D1 mini mikrokontroler

Dimenzije razvojne ploče su 3.45 cm x 2.54 cm, a na slici 2.10. je dat pinuot dijagram razvojne ploče sa prikazom rezervisanih pinova za različite funkcije i komunikacijske protokole.

ESP8266 D1 mini je mikrokontroler koji je poslednjih godina doživio veliku popularnost zbog svoje ekonomske isplativosti, niske snage i široke primjene. ESP8266 čip je po prvi put napravljen 2013. godine od strane "Espressif Systems", nakon čega je nastavio da se razvija u raznim oblicima, da bi 2015. godine "NodeMCU" predstavio open-source hardver platformu u cilju stvaranja razvojnih ploča. Nedugo zatim, "Wemos" je, pored mnogih drugih proizvođača, predstavio svoju "D1 mini" razvojnu ploču na kojoj je integrisan ESP8266 mikrokontroler.

2.4.1. Karakteristike i dijagram pinova mikrokontrolera

Razvojna ploča sadrži 11 digitalnih I/O pinova i jedan 10-bitni analogni ulaz. Određeni digitalni pinovi podržavaju PWM modulaciju, I2C i SPI komunikaciju. Mikrokontroler raspolaže sa fleš memorijom od 4 MB, dok se ploča napaja DC naponom od 3.3 V ili 5 V.

S obzirom na to da je na mikrokontroleru integrisan i Wi-Fi modul, moguće ga je konfigurisati kao pristupnu tačku (*skraćeno:* AP, *eng: access point*), kao klijent koji se povezuje

na postojeći Wi-Fi ruter (*skraćeno:* STA, *eng: station*) ili dualno pri čemu se istovremeno mogu koristiti oba načina rada. Wi-Fi antena je na razvojnoj ploči napravljena pomoću bakarne PCB rute, dok je 802.11b/g/n standardni Wi-Fi protokol rada na razvojnoj ploči koji omogućava rad na 2.4 GHz ili 5 GHz, dok je pri tome obezbijeđen sigurnosnim protokolima: TKIP, WEP, CRC, CCMP, WPA/WPA2 i WPS [30].



Slika 2.10. Prikaz razvojne ploče ESP8266 D1 mini sa rezervisanim pinovima za različite funkcije i komunikacijske protokole [31]

Reset taster na razvojnoj ploči služi za ponovno pokretanje ili resetovanje mikrokontrolera, zaustavljajući trenutno izvršavanje i ponovno pokrećući kod, kao da je razvojna ploča upravo uključena. Osim toga, na njoj se nalazi i plava LED dioda povezana aktivno-nisko na D4 pin.

3. SIMULACIJA RADA SIGMA-DELTA A/D KONVERTORA

U ovom poglavlju je simuliran pojednostavljen rad multipleksera i sigma-delta A/D konvertora upotrebom analognih kola poput sumatora, integratora, komparatora i D-flip-flop-a korišćenjem modela iz LTSpice softvera. Najprije je dat opis pojedinačnih električnih kola, nakon čega je izvršen izbor adekvatnih komponenti u cilju realizacije simulacije u LTSpice softveru. Na kraju poglavlja je prodiskutovan rezultat simulacije sigma-delta A/D konvertora.

3.1. Sumator (diferencijalni pojačavač)

Sumator u blok dijagramu sa slike 3.1., kao što je već rečeno, daje razliku dvije vrijednosti, te se kao analogno kolo može najjednostavnije predstaviti u vidu diferencijalnog pojačavača predstavljenom na slici 2.2.



Slika 3.1. Diferencijalni pojačavač realizovan pomoću operacionog pojačavača

Sa slike 3.1. se mogu izvesti jednačine za struje I_1 , I_2 i I_3 date u relaciji (4).

$$I_1 = \frac{V_1 - V_a}{R_1}, \ I_2 = \frac{V_2 - V_b}{R_2}, \ I_3 = \frac{V_a - V_i}{R_3}$$
(4)

Budući da su zbog svojstva operacionog pojačavača naponi V_a i V_b jednaki, te da su i struje I_1 i I_3 jednake može se izvesti relacija (5)

$$V_b = V_2 \frac{R_4}{R_2 + R_4}$$
(5)

Izjednačavanjem I_1 i I_3 i uvrštavanjem relacije (5) umjesto V_b , dobija se da je napon na izlazu diferencijalnog pojačavača jednak:

$$V_i = V_2 \frac{R_4}{R_2 + R_4} \frac{R_1 + R_3}{R_1} - V_1 \frac{R_3}{R_1}$$
(6)

Za slučaj da su otpornici $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, izlaz diferencijalnog pojačavača postaje razlika napona V_2 i V_1 , odnosno dobija se ekvivalent sumatora predstavljen u blok dijagramu na slici 2.2.

3.2. Integrator

Računanje integralne vrijednosti ulaznog signala se pomoću analognih kola može odraditi upotrebom operacionih pojačavača u kombinaciji sa otpornikom i kondenzatorom [32], kao što je prikazano na slici 3.2.



Slika 3.2. Analogni integrator realizovan pomoću operacionog pojačavača

Imajući u vidu svojstva operacionog pojačavača mogu se napisati sledeće relacije:

$$I_r = I_c$$

$$V_a = 0$$
(7)

Struje I_r i I_c se mogu izvesti preko naponskih jednačina:

$$I_r = \frac{V_u}{R}, I_c = C \frac{dV_i}{dt}$$
(8)

Sa pretpostavkom da je izlazni napon integratora u početnom trenutku jednak nuli, izjednačavanjem jednačina iz relacije (8) dobija se da je izlazni napon integratora jednak:

$$V_i = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_i dt \tag{9}$$

Za frekvencije niže od $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$ kolo sa slike 3.2. se ponaša kao integrator ulaznog signala, dok se za frekvencije više od f_c kolo ponaša kao nisko-propusni filter [32].

3.3. Komparator i D-flip-flop

Komparator predstavlja jednostavno analogno kolo realizovano preko operacionog pojačavača, koje radi poređenje napona na njegovim ulazima i to ako je napon na neinvertujućem ulazu veći od napona na invertujućem ulazu, izlazni napon komparatora će biti visok, dok je u suprotnom slučaju nizak.

D-flip-flop je logičko analogno kolo koje služi da sačuva vrijednost sa njegovog ulaza tokom uzlazne ili silazne ivice na pravougaonom signalu, do sledeće periode, čime se izlaz D-flipflop-a ne mijenja dok se ne pojavi sledeća uzlazna ili silazna ivica na pravougaonom signalu [33].

3.4. Multiplekser

Multiplekser je kolo koje obavlja ulogu uzastopnog povezivanja više analognih ili digitalnih ulaza sa jednim izlazom. U praksi su realizovani pomoću logičkih kola, međutim radi jednostavnosti, u simulaciji sigma-delta modulatora, dvokanalni multiplekser je realizovan pomoću naponskih prekidača, kako bi se omogućilo uzastopno propuštanje dva naponska sinusiodalna signala frekvencija 100 Hz i 200 Hz i prikazan je na slici 3.3. Naponski prekidači prikazani na slici 3.3. se uključuju kada im se na pinove koji ne vrše prekidanje dovede DC napon od 1.6 V. To je omogućeno povezivanjem pravougaonih naponskih signala na te pinove, čije se faze razlikuju za 180°. Pravougaoni naponski signali koji vrše upravljanje naponskim prekidačima kao i izlaz iz simuliranog multipleksera su dati na slici 3.4.



Slika 3.3. Dvokanalni multiplekser realizovan pomoću naponskih prekidača



Slika 3.4. Naponski oblici upravljačkih signala naponskih prekidača i izlaz simuliranog multipleksera

3.5. Simulacija u LTSpice softveru

U ovom poglavlju je prikazano cijelo analogno kolo koje predstavlja sigma-delta modulator prikazano na slici 3.5., kao i rezultat njegove simulacije odrađene u softveru LTSpice.


Slika 3.5. Sigma-delta modulator realizovan pomoću analognih kola

Na slici 3.5. su prikazani diferencijalni pojačavač, integrator i 1-bitni A/D konvertor kao na blok dijagramu sa slike 2.2. koji simuliraju rad sigma-delta modulatora. Analogni signal su sinusoide različitih frekvencija čije se vrijednosti mijenjaju od 0 V do 1 V, čime je isključena potreba za 1-bitnim D/A konvertorom u povratnoj sprezi u cilju uproštavanja kola sa slike. 1-bitni digitalni izlaz koji se sastoji od nula i jedinica, bi se u praksi proslijedio digitalnom filteru, koji bi smanjujući brzinu odabiranja postigao višu rezoluciju odrađene A/D konverzije.

Potrebno je izabrati adekvatne operacione pojačavače za uloge diferencijalnog pojačavača, integratora i komparatora. Operacioni pojačavač u ulozi diferencijalnog pojačavača mora imati minimalno odstupanje tokom vremena i temperature, što znači da mora pružati stabilna i precizna mjerenja sa minimalnim šumom na svom izlazu. Takođe, mora imati visoku ulaznu impedansu što ga čini idealnim za diferencijala mjerenja malih signala, ne opterećujući dio električnog kola na koje je povezan. Navedenim zahtjevima vrlo dobro odgovara AD711 operacioni pojačavač, proizveden od strane "Analog Devices" proizvođača, sa driftom od 0.5 μ V/°C i gustini šuma izmjerenom pri 1 kHz od 10 $\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$ [34], zbog čega je i upotrebljen u datoj simulaciji. Otpornici

R3, R4, R5 i R6 sa slike 3.5 su jednakih vrijednosti, shodno dokazu na kraju poglavlja 3.1.

Sa druge strane, pored pomenutih performansi koje su neophodne za pomenutu primjenu, operacioni pojačavač u ulozi integratora mora imati i nisku ulaznu struju, obzirom da su na nju

osjetljivi [35], [36]. Takođe, niska ulazna struja sprečava akumulaciju odstupanja održavajući tačnost integralnog računa tokom dužeg vremena. Operacioni pojačavač OP113, takođe proizveden od strane "Analog Devices" proizvođača veoma dobro odgovara navedenim zahtjevima, sa driftom od samo $0.2 \,\mu\text{V/°C}$, šumom od $4.7 \, \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$ pri frekvenciji od 1 kHz i ulaznom strujom od samo $0.2 \,\mu\text{V/°C}$, šumom od $4.7 \, \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$ pri frekvenciji od 1 kHz i ulaznom strujom od samo $0.2 \,\mu\text{N/°C}$, šumom od $4.7 \, \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$ pri frekvenciji od 1 kHz i ulaznom strujom od samo $0.2 \,\mu\text{N/°C}$, šumom od $4.7 \, \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$ pri frekvenciji od 1 kHz i ulaznom strujom od samo $0.2 \,\mu\text{N/°C}$, šumom od $4.7 \, \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$ pri frekvenciji od 1 kHz i ulaznom strujom od samo $0.2 \,\mu\text{N/°C}$, šumom od $4.7 \, \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$ pri frekvenciji od 1 kHz i ulaznom strujom od samo $0.2 \,\mu\text{N/°C}$, šumom od $4.7 \, \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$ pri frekvenciji od 1 kHz i ulaznom strujom od samo $0.2 \,\mu\text{N/°C}$, šumom od $4.7 \, \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$ pri frekvenciji od 1 kHz i ulaznom strujom od samo $0.2 \,\mu\text{N/°C}$, šumom od $4.7 \, \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$ pri frekvenciji od 1 kHz i ulaznom strujom od samo $0.2 \,\mu\text{N/°C}$, šumom od $4.7 \, \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$ pri frekvenciji od 1 kHz i ulaznom strujom od samo $0.1 \,\mu\text{N}$.

Kod operacionog pojačavača u ulozi komparatora u kolu sa slike 3.5., najbitnije je da posjeduje izlaz koji operacionom pojačavaču omogućava da dostigne napon blizak svom napajanju, s obzirom na to da je iskorišćen nizak DC napon od 1 V. Pogodnost tog napona jeste ta da se na izlazu komparatora dobija blizu 0 V ili blizu 1 V, što se može reprezentovati kao 1-bitni digitalni izlaz sigma-delta modulatora. Takođe, komparator mora imati i brze reakcije što omogućuje jasne prelaze između visokog i niskog napona. Pomenutim karakteristikama, dobro odgovara AD8541 operacioni pojačavač takođe proizveden od strane "Analog Devices" proizvođača, koji osim što posjeduje mogućnost generisanja napona na izlazu blisko naponu napajanja i sa brzim i jasnim reakcijama [38], optimizovan je za niskonaponske operacije, čineći ga komponentom koja je iz tih razloga usvojena kao odgovarajuća u električnom kolu sa slike 3.5.

Veličine pasivnih komponenti koje su korišćene uz AD711, OP113 i AD8541 operacione pojačavače su prokomentarisane u poglavljima 3.1. i 3.2., dok su modeli pomenutih operacionih pojačavača već dostupni u LTSpice softveru, pa samim tim nije bilo potrebe za njihovim modelovanjem. Na slici 3.6 prikazan je rezultat simulacije kola sa slike 3.5. u trajanju od 25 ms.

Analogni signal koji je dat sigma-delta modulatoru su dvije sinusoide frekvencija od 100 Hz i 200 Hz, u trajanju od po 12.5 ms, doveden sa multipleksera prikazanom na slici 3.3. Sa slike se zapaža da su jedinice i nule 1-bitnog digitalnog izlaza "gušće" odnosno, učestanije pri maksimalnim vrijednostima analognog signala [39], pa će samim tim prouzrokovati porast vrijednosti na izlazu iz digitalnog filtera.



Slika 3.6. Rezultat simulacije sigma-delta modulatora

4. DIZAJN I FABRIKACIJA ŠTAMPANE PLOČE (PCB) SA INTEGRISANIM AD4111 ČIPOM I ESP8266 MIKROKONTROLEROM

Sistem opisan u ovom master radu je fizički razvijen fabrikacijom štampane ploče (skraćeno: PCB, *eng. printed circuit board*) na kojoj su integrisani AD4111 čip, ESP8266 mikrokontroler i njima neophodne pasivne komponente poput otpornika i kondenzatora. Štampane ploče predstavljaju odličan izbor kada su u pitanju konzistentne fizičke realizacije električnih kola koje zahtijevaju povezivanje mnoštvo komponenti malih gabarita na što kompaktnijoj površini. Glavna podjela štampanih ploča je izvršena po broju bakarnih slojeva kojih može biti od jednog do čak osam ili više slojeva, gdje se zahtjeva visok nivo kompaktnosti. Osim bakarnih slojeva, PCB sadrži jezgro, izolatore i završne slojeve.

U štampanoj ploči može postojati jedno ili više jezgara u zavisnosti od broja bakarnih slojeva, a uloga im je da pruže čvrstoću i mehaničku strukturu samoj ploči. Jezgro se sastoji od podloge i bakarnih slojeva sa obje strane. Preko bakarnih slojeva se ugrađuje izolator napravljen od staklene vune uronjene u epoksi smoli. Izolator, osim svojih dielektričnih karakteristika, pruža i svojstvo lijepka sjedinjujući slojeve štampane ploče tokom izlaganja viskoj temperaturi i pritisku. Na samoj površini PCB-a se nalazi završni sloj koji formira zaštitni omotač od uticaja spoljašnje sredine i na kojem se nalaze natpisi koji najčešće opisuju komponente postavljene po površini ploče. Razvijeni sistem je realizovan fabrikacijom štampane ploče koja sadrži dva bakarna sloja.

4.1. Dizajn električnog kola tipičnog načina povezivanja AD4111 čipa i namjene njegovih pinova

Kada je u pitanju AD4111 čip, njegov proizvođač je u tehničkoj dokumentaciji [29] dostavio izgled električne šeme u kojoj su implementirani sami čip i njemu neophodne pasivne komponente. Izgled te šeme je dat na slici 4.1.



Slika 4.1. Tipično kolo povezivanja AD4111 čipa dato od strane njegovog proizvođača

4.1.1. Naponski ulazi AD4111 čipa i njihova prenaponska zaštita

Pinovi sa oznakama VIN0-VIN7 i VINCOM predstavljaju naponske ulaze A/D konvertora, dok su pinovi COMPA i COMPB zaduženi za detekciju prekinutih žica naponskih senzora, čija upotreba nije obavezna za normalan rad. U svakom slučaju, COMPA i COMPB pinovi se povezuju sa naponskim ulazima preko kondenzatora od 680 pF i otpornika od 1 k Ω , kao što je i prikazano na slici 4.1. Obzirom da se u razvoju ovog sistema nije koristila opcija detektovanja prekinutih žica, pomenuti pinovi su ostali nepovezani. Pinovi VIN0-VIN7 i VINCOM su povezani u konfiguraciji sa TVS diodom, kondenzatorom od 4.7 nF i otpornikom od 180 Ω , koja predstavlja prenaponsku zaštitu naponskih ulaza. Veličine kondenzatora i otpornika u prenaponskoj zaštiti su uzete po primjeru evaluacione ploče na kojoj je integrisan AD4111 čip i koja je takođe dizajnirana od strane "Analog devices" proizvođača [40].

TVS dioda (*eng. transient voltage suppressor*) je poluprovodnička komponenta čija je namjena da osigura bezbjedni naponski nivo u slučaju pojavljivanja prenapona, koji mogu biti posljedica elektrostatičkog pražnjenja ili indirektnog dodira. Prilikom odabira TVS diode potrebno je voditi računa o probojnom i ograničavajućem naponu. Naime, probojni napon je onaj naponski nivo pri kojem TVS dioda počne provoditi prilikom čega obezbijedi ograničavajući napon komponentama koje štiti. Na slici 4.2. se mogu vidjeti grafički prikazani probojni i ograničavajući napon. U praksi se pojavljuju uni-polarne i bi-polarne TVS diode, koje mogu provoditi smo u jednom ili u oba smjera, respektivno.



Slika 4.2. Prikaz ulaznog i izlaznog napona na bi-polarnoj TVS diodi sa označenim probojnim i ograničavajućim naponskim nivoima [41]

U tehničkoj dokumentaciji čipa naveden je maksimalni dozvoljeni napon na naponskom ulazu pri jednostranom ili diferencijalnom mjerenju od 50 V. Zbog toga, potrebno je pomoću TVS diode, u slučaju pojavljivanja napona većeg od dozvoljenog, zaštititi naponski ulaz na čipu. Obzirom da se naponi koji se mogu mjeriti kreću u opsegu od -10 V do 10 V, u razvijenom sistemu je iskorišćena TVS dioda oznake SMAJ33CA, koja odvodi prenapone veće od 36.7 V [42].

Mjerenja se na naponskim ulazima mogu obavljati na dva načina: jednostrano ili diferencijalno. Jednostrano mjerenje napona podrazumijeva mjerenje gdje se jedan kraj naponskog

izvora priključuje na ulaze označene sa VIN0-VIN7, dok se drugi kraj priključuje na VINCOM. S druge strane, kod diferencijalnih mjerenja se oba kraja naponskog izvora priključuju na parove VIN0 i VIN1, VIN2 i VIN3, VIN4 i VIN5, VIN6 i VIN7. Dakle, moguće je sprovesti maksimalno osam jednostranih naponskih mjerenja ili četiri diferencijalna mjerenja, s tim što je moguće istovremeno vršiti oba tipa mjerenja.

S tim u vezi prilikom odabira konektora za naponske ulaze, najpogodnije je izabrati dva konektora od po osam ulaza, gdje će na jednom biti dovedeni pinovi VIN0-VIN7, dok je osam ulaza na drugom konektoru obezbijeđeno za VINCOM pin, za slučaj da je potrebno sprovesti maksimalnih osam jednostranih mjerenja. Izabrani konektor oznake TBL009-254-08GY-2GY, posjeduje na sebi ulaze koji su spregnuti oprugama preko dugmeta, čime je omogućen siguran kontakt i brzo povezivanje.

4.1.2. Strujni ulazi AD4111 čipa i njihova prekostrujna zaštita

Za dostupna četiri strujna ulaza na AD4111 čipu, obezbijeđeno je osam pinova, gdje su sa (IIN0+) – (IIN3+) označeni pinovi koji služe za ulaz struje koja se mjeri, dok oni označeni sa (IIN0-) – (IIN3-) služe za povrat te struje.

Strujna mjerenja se mogu obavljati u opsegu od 0 mA do 20 mA dok je, po tehničkoj dokumentaciji proizvođača, maksimalna dozvoljena vrijednost struje na tim pinovima 50 mA, pa je u skladu sa time izabran resetabilni strujni osigurač oznake MF-USMF005-2, koji stvara prekid u kolu pri strujama većim od 50 mA.

Osim toga, prekostrujna zaštita je realizovana pomoću TVS diode, kondenzatora i otpornika na sličan način kao kod naponskih ulaza. Međutim, sada je iskorišćena TVS dioda oznake SMAJ10CA, koja će izvršiti kratko spajanje sa uzemljenjem napona većeg od 11.1 V [42] koji se dobija u slučaju toka struje od 61 mA kroz otpornik od 180 Ω , izabran po primjeru evaluacione ploče na kojoj je integrisan AD4111 čip [40].

Strujna mjerenja je, za razliku od naponskih mjerenja, moguće sprovoditi samo koristeći parove IIN0+ i IIN0-, IIN1+ i IIN1-, IIN2+ i IIN2-, IIN3+ i IIN3-, pa je samim tim izabran konektor sa osam ulaza iste oznake kao i kod naponskih mjerenja.

4.1.3. SPI komunikacioni protokol i njegova vizualizacija pomoću LED indikatora

Kao što je ranije rečeno, AD4111 čip posjeduje mogućnost SPI komunikacije za šta su rezervisani pinovi CS, SCLK, DIN i DOUT.

SPI (*eng. serial peripherial interface*) je jedan od najkorišćenijih komunikacionih protokola između mikrokontrolera i perifernih integrisanih kola, poput A/D, D/A konvertora, pomjeračkih registara i sl. On predstavlja protokol baziran na glavnom i podređenom uređaju, gdje se podaci koji se šalju sinhronizuju sa taktom uzlazne ili silazne ivice pravougaonih signala, omogućavajući istovremeno slanje podataka u oba smjera.

SPI komunikacija je zasnovana na četiri pina: SCLK, MISO, MOSI i CS. SCLK pin predstavlja pravougaoni signal takta čije se uzlazne ili silazne ivice koriste za prenos ili prijem podataka, u zavisnosti od načina rada. CS pin se koristi da se omogući komunikacija ka određenom uređaju, s obzirom na to da se SPI komunikacija može koristiti sa više podređenih uređaja. Dakle, neposredno prije komunikacije sa jednim od podređenih uređaja, potrebno je njegov CS pin prebaciti iz visokog naponskog stanja u nisko naponsko stanje. MISO (*eng. Master input Slave output*) i MOSI (*eng. Master output Slave input*) su pinovi preko koji se podaci šalju, od podređenog uređaja ka glavnom uređaju ili obrnuto, respektivno.

Postoje četiri načina rada SPI komunikacionog protokola, koji se često označavaju kao Mode 0 – Mode 3. Razlike između tih načina rada definišu polaritet i faza takta pruženog od strane glavnog uređaja. Polaritet takta može biti 0 ili 1, što govori o naponskom stanju takta prilikom mirovanja, gdje nula označava nizak, a jedinica visok naponski nivo. Faza takta takođe može biti 0 ili 1, što govori da naponsko stanje takta treba biti nisko ili visoko u trenutku prenosa prvog bita, respektivno [43]. Na slici 4.3. se može vidjeti način povezivanja glavnog uređaja sa više podređanih uređaja zarad SPI komunikacije. Na podređenim uređajima, MISO i MOSI pinovi su nekada označeni kao DOUT i DIN, respektivno.

AD4111 čip koristi SPI Mode 3 način rada, sa maksimalnom frekvencijom takta do 2 MHz [29]. CS pin se u razvoju ovog sistema ne mora koristiti, s obzirom na to da mikrokontroler komunicira samo sa AD4111 čipom preko SPI protokola, te je njemu dovoljno obezbijediti nizak naponski nivo na početku rada. ESP8266 mikrokontroler za SPI komunikaciju ima rezervisane pinove D5, D6, D7, D8, što se moglo vidjeti na slici 2.10. D5 je potrebno povezati na SCLK pin na AD4111 čipu, D6 na DOUT (MISO) pin, D7 na DIN (MOSI) pin, D8 na CS pin na čipu.

Način rada	Polaritet takta	Faza takta	Namjena uzlaznih i silaznih ivica takta
SPI Mode 0	0	0	Pribavljanje bitova na uzlaznoj ivici i slanje bitova na silaznoj ivici
SPI Mode 1	0	1	Pribavljanje bitova na silaznoj ivici i slanje bitova na uzlaznoj ivici
SPI Mode 2	1	0	Pribavljanje bitova na silaznoj ivici i slanje bitova na uzlaznoj ivici
SPI Mode 3	1	1	Pribavljanje bitova na uzlaznoj ivici i slanje bitova na silaznoj ivici

Tabela 1: Načini rada SPI komunikacionog protokola [43]



Slika 4.3. Povezivanje glavnog uređaja sa više podređenih uređaja u SPI komunikacionom protokolu [43]

Radi lakše vizualizacije aktivnih linija SPI komunikacije sa četiri navedena pina, postavljen je četvorokanalni bafer sa Šmitovim okidnim kolom oznake SN74HCS125QPWRQ1 u kombinaciji sa četiri LED diode oznake SZYY1206G i njima pripadajućim otpornicima od 280 Ω . Dio kola za vizualizaciju aktivnih SPI linija dat je na slici 4.4.



Slika 4.4. Kolo za vizualizacija aktivnih linija SPI komunikacionog protokola korišćenjem četvorokanalnog bafera sa Šmitovim okidnim kolom i četiri LED indikatora

4.1.4. Napajanje AD4111 čipa i referentni napon za A/D konvertor

Napajanje AD4111 čipa je podijeljeno na dva dijela, tako da se posebno napajaju analogne i digitalne komponente unutar čipa. AVDD predstavlja pin za analogno napajanje na koje se može dovesti DC napon između 3 V i 5.5 V, dok je AVSS pin za analogno uzemljenje. S druge strane, IOVDD predstavlja pin za digitalno napajanje čipa na koje se može dovesti DC napon između 2 V i 5.5 V, dok je DGND pin za digitalno uzemljenje [29]. Imajući u vidu, naponske opsege analognog i digitalnog napajanja, na AVDD i IOVDD pinovima je moguće dovesti napon od 3.3 V sa ESP8266 mikrokontrolera. Taj naponski izvor je zapravo izlazni napon sa linearnog naponskog regulatora unutar ESP8266 mikrokontrolera, čime je obezbijeđen stabilan DC napon, osiguravajući precizan rad AD4111 čipa.

Dekaplovanje analognih i digitalnih pinova je izvršeno po preporuci proizvođača čipa, korišćenjem dva paralelno vezana keramička kondenzatora vrijednosti od 100 nF i 1 μ F između napojnih pinova i uzemljenja. Dodatno tome, na sličan način je izvršeno dekaplovanje u blizini DC naponskog izvora od 3.3 V, korišćenjem keramičkih kondenzatora vrijednosti od 100 nF i 10 nF, čime je obezbijeđen stabilan jednosmjerni napon sa minimizovanim šumom. Takođe, po preporuci proizvođača, dekaplovani su pomoću keramičkih kondenzatora vrijednosti od 1 μ F pinovi REGCAPA i REGCAPD koji predstavljaju naponske izlaze linearnih naponskih regulatora unutar čipa za analogne i digitalne komponente, respektivno.

Kao što je već rečeno, AD4111 čip ima interni linearni naponski regulator od 2.5 V koji služi kao referentni napon A/D konvertoru i čiji je napon dostupan na pinu REFOUT. Međutim, AD4111 posjeduje i mogućnost dovođenja eksternog naponskog regulatora od 2.5 V na pinove REF+ i REF-, čime korisnik može obezbijediti još precizniji referentni napon. U razvijanju ovog sistema, implementiran je i eksterni naponski regulator od 2.5 V oznake ADR4525ARZ, čije je napajanje obezbijeđeno preko istog naponskog izvora od 3.3 V dekaplovanog preko keramičkih kondenzatora vrijednosti od 100 nF i 1 μ F, dok je izlaz dekaplovan pomoću keramičkog kondenzatora od 1 μ F i doveden na REF+ pin preko kratko-spojnika. Time je omogućeno fizičko razdvajanje eksternog naponskog regulatora od AD4111 čipa, za slučaj da korisnik želi koristiti interni naponski regulator. Dio kola koji prikazuje implementaciju eksternog naponskog regulatora u ovom sistemu je dat na slici 4.5.



Slika 4.5. Dio kola u kojem je implementiran eksterni naponski regulator ADR4525ARZ preko kratko-spojnika

Razlog za implementaciju eksternog naponskog regulatora leži u njegovim boljim performansama u odnosu na interni naponski regulator AD4111 čipa. Naime, interni linearni naponski regulator ima preciznost od $\pm 0.12\%$ od nominalnog napona, dok efektivna vrijednost šuma od 0.1 Hz do 10 Hz iznosi 4.5 μ V [29], dok preciznost eksternog naponskog regulatora iznosi $\pm 0.02\%$ od nominalnog napona, dok šum od 0.1 Hz do 10 Hz iznosi 1.25 μ Vp-p [44].

4.2. Dizajn štampane ploče sa optimalnom pozicijom komponenti i njihovim međusobnim rutiranjem

Cjelokupna šema električnog kola sistema koji se razvija u ovom master radu, a čiji su djelovi predstavljeni na slikama 4.1., 4.4. i 4.5., takođe obuhvata i integraciju ESP8266 mikrokontrolera i prikazana je na slici 4.6.

Za dizajniranje PCB-a električnog kola datog na slici 4.6. je korišćen "EasyEDA" softver koji je dostupan korisnicima na online platformi ili kao program instaliran na računaru. Tokom odabira komponenti za električno kolo, korišćene su komponente na lageru iz LSCS biblioteke ugrađene unutar softvera, kako bi se izbjegao eventualni nedostatak komponenti prilikom fabrikacije štampane ploče. LSCS je globalni distributer komponenti koji između ostalog sarađuje i sa JLCPCB-om, firmom za izradu štampanih ploča, u čemu i leži razlog biranja komponenti iz LSCS biblioteke.

Prikaz optimalnog dizajna PCB-a u "EasyEDA" softveru je dat na slici 4.7. Nepravilno pozicioniranje komponenti na PCB-u može prouzrokovati neželjene interferencije, termalne probleme i poteškoće prilikom same izrade ploče. Za početak, prilikom razmještaja komponenti potrebno je sve komponente koje imaju vanjske konektore postaviti na prikladnom mjestu, odnosno na samoj granici ploče, okrenute ka spolja, čime se eliminiše problem nepristupačnih priključaka. U ovom sistemu, postoje tri konektora za senzore koji su spomenuti u poglavljima 4.1.1 i 4.1.2., kao i USB-C konektor na ESP82666 mikrokontroleru, koji služi za kodiranje mikrokontrolera i napajanje cijelog sistema. Dakle, poželjno je bilo razdvojiti te dvije grupe konektora, kako zbog praktičnosti, tako i zbog stvaranja intuitivnog načina povezivanja. S tim u vezi, tri konektora od po osam priključaka su postavljeni na jednoj strani štampane ploče, dok je konektor od ESP8266 mikrokontrolera postavljen na suprotnoj stranici PCB-a.

Sledeći korak u razmještaju komponenti je podrazumijevao pozicioniranje komponenti prenaponske i prekostrujne zaštite ulaza AD4111 čipa. Obzirom da se njima štiti čip od neželjenih pojava, poput elektrostatičkih pražnjenja i prevelikih struja, poželjno je bilo montirati ih što bliže samim konektorima, čime je eliminisan rizik od oštećenja ili uticaja na ostale osjetljive komponente na ploči. Stoga su TVS diode, njima pripadni otpornici, kondenzatori i resetabilni osigurači postavljeni što je bliže moguće senzorskim konektorima. AD4111 čip i ESP8266 mikrokontroler su kao dvije glavne komponente postavljene u centralnom dijelu štampane ploče. LED indikator, čija je namjena da vizualizuje aktivne linije SPI komunikacije između AD4111 čipa i ESP8266 mikrokontrolera, postavljen je iz tog razloga između te dvije komponente, kao pokazatelj njihove komunikacione povezanosti. ESP8266 mikrokontroler na ploči nije direktno montiran, već je to urađeno preko vertikalnog rupičastog priključka ženskog pola, kako bi bila moguća njegova zamjena drugim. Samim tim, ušteđeno je na prostoru obzirom da je sada mikrokontroler podignut na određenoj visini iznad ploče.



Slika 4.6. Kompletno električno kolo sistema za akviziciju podataka razvijenog u ovom master

radu

Time je omogućeno pozicioniranje četvorokanalnog bafera sa Šmitovim okidnim kolom ispod mikrokontrolera. Eksterni naponski regulator ADR4525ARZ je na ploči montiran u blizini AD4111 čipa, s obzirom na to da je njemu i namjenjen.

Na ploči je na kraju preostalo pozicionirati kondenzatore za dekaplovanje, koje je potrebno postaviti što bliže naponskom izvoru koji dekapluju. Kao što se može vidjeti sa slike 4.7. sedam kondenzatora za dekaplovanje je potrebno pozicionirati u blizini AD4111 čipa, dva u blizini ESP8266 mikrokontrolera i tri u blizini eksternog naponskog regulatora.



Slika 4.7. Prikaz PCB dizajna iz "EasyEDA" softvera

Ljubičasta linija na datoj slici predstavlja granice štampane ploče, u čijim su uglovima predviđene rupe za fizičko montiranje. Rute ove dvoslojne ploče su prikazane crvenom i plavom bojom i to za gornji i donji bakarni sloj, respektivno. S obzirom na to da se sve komponente nalaze na gornjoj površini ploče, ne mogu doći u kontakt sa donjim bakarnim slojem. Iz tog razloga se koriste provodne rupe (*eng. via*) koje su na slici prikazane sivim kružićima i služe da donji bakarni sloj, sprovedu do gornjeg. Dimenzije dizajnirane štampane ploče iznose 8 cm x 8.3 cm, čime je postignut kompaktan dizajn razvijenog sistema. U tabeli 2 dat je pregled svih korišćenih komponenti. Nakon završetka dizajniranja, od kompanije JLCPCB je poručena fabrikacija pet štampanih ploča. Konačni izgled štampane ploče je dat na slici 4.8.

Naziv	Oznaka na šemi	Model/Vrijednost		
Mikrokontroler		Wemos ESP8266 D1		
	C1, C2, C9, C11, C16, C17	1 μF		
	C3, C8, C10, C18, C24	100 nF		
Kondenzator	C4, C5, C6, C7, C12,	4.7 nF		
	C13, C14, C15			
	C19, C20, C21, C22	470 pF		
	C23	10 μF		
TVS dioda	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8	SMAJ33CA		
	D9, D10, D11, D12	SMAJ10CA		
Resetabilni strujni	F1, F2, F3, F4	MF-USMF005-2		
LED indikator	LED1, LED2, LED3, LED4	SZYY1206G		
0. 11	R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8,	180 Ω		
Otpornik	R9, R10, R11, R12			
	R13, R14, R15, R16	280 Ω		
Eksterni naponski	U1	ADR4525ARZ		
Konektor	U2, U4, U5	TBL009-254-08GY-2GY		
A/D konvertor	U3	AD4111BCPZ		
Četvorokanalni bafer	U6	SN74HCS125QPWRQ1		

Tabela 2: Pregled korišćenih komponenti u dizajniranju sistema za akviziciju podataka



Slika 4.8. Izrađena PCB ploča razvijenog sistema – pogled odozgo

AD4111 čip i ESP8266 mikrokontroler kao dvije glavne komponente ovog sistema rade sa ukupnom snagom od 96.35 mW [29], što čini ovaj sistem energetski efikasnim i pogodnim za moguće korišćenje sa baterijskim napajanjem.

5. KONFIGURACIJA RAZVIJENOG SISTEMA I TEST NJEGOVIH PERFORMANSI

U ovom poglavlju će najprije biti riječi o načinu konfiguracije AD4111 čipa za naponska i strujna mjerenja korišćenjem SPI komunikacionog protokola. Programiranje čipa je vršeno podešavanjem njegovih registara putem SPI komunikacionog protokola, od strane ESP8266 mikrokontrolera, dok je programiranje mikrokontrolera izvršeno otpremanjem C++ koda iz ArduinoIDE okruženja sa računara na USB-C port mikrokontrolera.

Test performansi je izvršen proračunom efektivnog broja bitova A/D konvertora AD4111 čipa na njegovim naponskim i strujnim ulazima. Testiranja su za cilj imala da uporede sistem razvijen u ovom master radu sa podacima koji su dati od strane proizvođača čipa, kao i da prikažu benefite upotrebe eksternog linearnog naponskog regulatora u odnosu na interni. Za to je bio neophodan softver koji će očitavati mjerenja razvijenog sistema korišćenjem USB porta na računaru, za šta je MATLAB programski paket iskorišćen. MATLAB je upotrebljen za akviziciju podataka sa USB porta računara, njihovu statičku analizu kao i za grafički prikaz prikupljenih mjerenja.

5.1. Uspostavljanje SPI komunikacije sa AD4111 čipom i njegovo podešavanje

AD4111 čip koristi SPI protokol za komunikaciju i to preko Mode 3 načina rada. To znači da, kao što je već rečeno u poglavlju 4.1.3., vrši pribavljanje bitova na uzlaznoj ivici i slanje bitova na silaznoj ivici pravougaonog napona koji mu je doveden na SCLK pinu od strane mikrokontrolera.

Komunikacija se ovim putem ostvaruje tako što se najprije u 8-bitnom komunikacionom registru čipa upiše adresa registra kojem treba pristupiti. Zatim se može obaviti akcija upisivanja ili čitanja željenog registra, nakon koje se komunikacioni interfejs vraća u početno stanje u kojem očekuje ponovnu akciju upisivanja u komunikacioni registar. Na slici 5.1. su dati slikoviti prikazi akcija upisivanja ili čitanja određenih registara prema datom objašnjenju. Sa datih slika se može vidjeti da se za uspostavljanje komunikacije najprije treba naponski nivo CS pina prebaciti iz visokog u nisko stanje, o čemu je i bilo riječi u poglavlju 4.1.3. Takođe, prilikom akcije upisivanja i čitanja vrijednosti određenog registra prvo dolazi do aktivnosti na DIN pinu, što je i bilo za očekivati, s obzirom na to da je rečeno da svaki vid komunikacije mora započeti interakcijom sa

komunikacionim registrom, gdje se čipu saopštava sljedeći korak u komunikaciji. Nakon toga, može doći do aktivnosti na DIN ili DOUT liniji u zavisnosti od toga da li se radi o upisivanju ili čitanju vrijednosti nekog registra.



Slika 5.1. Akcija upisivanja vrijednosti u određeni registar dato na slici a) i akcija čitanja vrijednosti iz određenog registra dato na slici b)

Inicijalizacija rada AD4111 čipa se sastoji iz neophodne sinhronizacije i resetovanja čipa. Sinhronizacija čipa podrazumijeva promjenu naponskog nivoa CS pina iz niskog u visoko i nazad u nisko naponskog stanje sa intervalima od 10 ms između tih promjena, dok resetovanje podrazumijeva slanje najmanje 64 jedinice na DIN pin čipa čime se postiže postavljanje čipa u početno stanje i brisanje sadržaja svih registara čipa. Nakon obavljene inicijalizacije, može se pristupiti podešavanju čipa, odnosno interakciji sa njegovim registrima.

U ArduinoIDE programskom okruženju potrebno je instalirati biblioteku *SPI.h* nakon čega se mogu koristiti njene funkcije potrebne za uspostavljanje SPI komunikacije. U dijelu za globalne promjenjive je potrebno definisati CS pin na ESP8266 mikrokontroleru što je odrađeno na sledeći način:

• const int csPin = D8;

U *setup* petlji koja se samo jednom izvršava potrebno je u dijelu za SPI komunikaciju napisati sledeće linije koda:

- SPI.begin();
- SPI.beginTransaction(SPISettings(1000000, MSBFIRST, SPI_MODE2));
- pinMode(csPin, OUTPUT);

Ovim naredbama je ESP8266 mikrokontroleru naglašeno da na svom SCLK pinu treba omogućiti pravougaoni signal frekvencije od 1 MHz, da binarne sadržine čita i piše sa strane bita najveće težine i da koristi Mode 3 način rada.

Za čitanje 16-bitnog registra, potrebno je sprovesti niz komandi:

- *uint16_t value = 0;*
- SPI.transfer(0x00);
- SPI.transfer(0x40 / reg);
- value = SPI.transfer16(0x00);

Datim komandama se prvo inicijalizuje 16-bitna promjenjiva *value* u kojoj će biti upisana pročitana vrijednost. Zatim se obavlja komunikacija sa komunikacionim registrom čija je adresa *0x00* i šalje mu se adresa registra koji se treba pročitati slanjem vrijednosti *0x40 / reg*, gdje je *reg* adresa pomenutog registra [45]. Zatim se može obaviti čitanje 16-bitnog registra pomoću funkcije *SPI.transfer16()*, čija će sadržina biti smještena u promjenjivu *value*. Čitanje 8-bitnog registra AD4111 čipa se obavlja na sličan način, osim što se u poslednjoj liniji koda ne mora koristiti *SPI.transfer16()*, već *SPI.transfer()* s obzirom na to da se radi o 8-bitnoj vrijednosti.

Upisivanje u 16-bitni registar se obavlja na sljedeći način:

- SPI.transfer(0x00);
- SPI.transfer(0x00 / reg);
- SPI.transfer16(value);

Datim komadama se prvo pristupa komunikacionom registru adrese 0x00, nakon čega mu se šalje komanda 0x00 / reg, gdje je reg adresa registra u koji se upisuje vrijednost [45]. Konačno, upisivanje 16-bitne vrijednosti value se obavlja komadom SPI.transfer16() koja izvršava slanje

16-bitne binarne vrijednosti. Dodjeljivanje vrijednosti 8-bitnom registru se kao i ranije razlikuje samo u funkciji *SPI.transfer16()*, koju je potrebno zamijeniti 8-bitnom funkcijom *SPI.transfer()*.

Čitanje i pisanje 24 ili 32-bitnih vrijednosti se obavlja kombinacijom *SPI.transfer()* i *SPI.transfer16()* funkcija, nakon istog načina komunikacije sa komunikacionim registrom.

Postoji ukupno 56 registara u mapi registara AD4111 čipa među kojima spadaju registri koji se tiču podešenja načina i brzine obrade analognih signala, kanala u upotrebi, njihovih pojačanja i ofseta itd.

Između ostalog tu je 16 registara za odabir kanala (*Channel register* 0 - 15), 8 registara za podešenja njihovog načina rada (*Setup register* 0 - 7), 8 registara za podešenja digitalnog filtera odabranih kanala (*Filter register* 0 - 7), 8 registara za podešavanje ofseta kanala (*Offset register* 0 - 7) i 8 registara za podešavanje pojačanja kanala (*Gain register* 0 - 7). Prilikom odabira registra kanala potrebno mu je i pridružiti podešen registar za način rada, filter, ofset i pojačanje, na osnovu kojih određeni kanal funkcioniše. Dakle, za 16 različitih kanala moguće je napraviti 8 različitih podešavanja, jer u trenutku kada se određenom kanalu pridruži *Setup register* određenog rednog broja, automatski su mu pridruženi i registri za filter, ofset i pojačanje sa istim rednim brojem.

U odabiru kanala potrebno je podesiti određene bitove unutar registra, čime je čipu saopšteno koji se *Setup register* izabranom kanalu pridružuje i na kojim naponskim ili strujnim ulazima se vrše mjerenja.

Odmah nakon toga je potrebno podesiti odabrani *Setup register* u kojem se postavljanjem bitova na 0 ili 1 saopštava čipu odabir između bipolarnog ili unipolarnog izlaza iz A/D konvertora, odabir između internog ili eksternog referentnog napona i omogućavanje ulaznih bafera i bafera internog naponskog regulatora.

U filter registru su ponuđene mogućnosti korišćenja Sinc5+Sinc1 ili Sinc3 filtera, kao i brzine odabiranja, koje se kreću u opsegu od 1.25 SPS do 31250 SPS.

Registri za podešavanje ofseta i pojačanja su veličine 24-bita i u njima se upisuje vrijednost koja utiče na grešku mjerenja i na skaliranje cjelokupnog opsega A/D konvertora, respektivno.

Osim njih, postoje *ADC Mode* i *IF Mode* registri u kojima je potrebno još jednom podesiti odabir izvora referentnog napona, kao i odabir izvora oscilatorskog kola i raznih funkcija za otkrivanje grešaka u radu koje AD4111 čip nudi.

U mjerenju napona između pinova VIN0 i VINCOM na kanalu *Channel 0*, korišćenjem *Setup register 0*, u kojem se koriste interni referentni napon i ulazni baferi za prikazivanje bipolarne vrijednosti mjerenja. Za filtriranje se koristi Sinc5+Sinc3 funkcija, pri maksimalnoj brzini odabiranja i sa upisanim nominalnim vrijednostima ofseta i pojačanja od *0x800000* i *0x500000* napisane su sledeće heksadecimalne vrijednosti u pomenute registre datim redosljedom:

- *Channel* 0 = 0x8010
- Setup register 0 = 0x0600
- Filter register 0 = 0x1320
- Offset register 0 = 0x800000
- Gain register 0 = 0x500000
- ADC Mode = 0x0000
- IF Mode = 0x0000

Čitanje vrijednosti A/D konvertora se vrši iz *Data* registra koji je može biti 24-bitne ili 32bitne veličine. Naime, u višekanalnom mjerenju osim podataka o A/D konverziji potrebno je čitati i vrijednosti iz *Status* registru, gdje je u prva četiri bita tog registra sadržana informacija o kanalu čija je konverzija trenutno dostupna u *Data* registru. Te dvije informacije, vrijednost konverzije i trenutni kanala, je moguće čitati odvojenim funkcijama, međutim, takvim pristupom može doći do neslaganja vrijednosti iz ta dva registra. Zbog toga, postavljanjem 7-og bita u *IF Mode* registru na vrijednost 1, dolazi do dodavanja *Status* registra na *Data* registar, čime on postaje registar od 32 bita.

5.2. Test performansi štampane ploče zasnovan na proračunu efektivnog broja bitova A/D konvertora upotrebom internog i eksternog linearnog naponskog regulatora

Efektivni broj bitova, kao što je već spomenuto u poglavlju 2.1., predstavlja komparaciju performansi između idealnog i realnog A/D konvertora iste rezolucije. Tipičan način proračuna ENOB-a je korišćenjem sinusoide, međutim po autoru rada [19] nelinearnosti A/D konvertora utvrđene pomoću sinusnog signala ne moraju direktno ukazivati na performanse konvertora. Zato se ENOB treba proračunavati korišćenjem i proizvoljnih signala poput stabilnih DC signala. Formula koja služi za proračun ENOB-a upotrebom proizvoljnih signala je bila data relacijom (2) u poglavlju 2.1.

U ovom testu performansi je izvršeno proračunavanje ENOB-a na uzemljenom naponskom i strujnom ulazu A/D konvertora, čime je osiguran što stabilniji naponski nivo od 0 V. Izvršeno testiranje je odrađeno korišćenjem internog i eksternog naponskog regulatora, zbog poređenja uticaja preciznosti oba naponska regulatora na šum i efektivan broj bitova A/D konvertora.

Očitavanje mjerenja, njihova vizualizacija i proračun performansi su realizovani uz pomoć MATLAB softvera, preko USB interfejsa računara. Performanse su proračunate za naponske i strujne ulaze, pri 24-bitnoj rezoluciji, korišćenjem internog i eksternog naponskog regulatora pri svakoj od dostupnih brzina odabiranja i istovremeno upoređene sa performansama datim od strane proizvođača AD4111 čipa.

Proračun efektivne vrijednosti šuma A/D konvertora, dat relacijom (3) u poglavlju 2.1., se može proračunati korišćenjem formule za proračun standardne devijacije zbog toga što su naponski i strujni ulazi uzemljeni, te im je srednja vrijednost napona jednaka nuli.

5.2.1. Proračun efektivnog broja bitova na naponskom ulazu A/D konvertora upotrebom internog i eksternog linearnog naponskog regulatora

Proračun performansi po pitanju šuma, odnosno efektivnog broja bitova je izvršen upotrebom MATLAB softvera koji služi za pribavljanje i obradu podataka sa USB porta ESP8266 mikrokontrolera. Pod obradom podataka se podrazumijeva proračun efektivne vrijednosti šuma, peak-to-peak šuma, kao i ENOB-a i peak-to-peak vrijednosti ENOB-a na osnovu 1000 uzoraka pri svim dostupnim brzinama odabiranja AD4111 čipa i 24-bitnoj rezoluciji. Dodatno tome, na slici 5.2. grafički su prikazana mjerenja i histogrami pri brzinama odabiranja od 31250 SPS, 15625 SPS i 1.25 SPS i internom naponskom regulatoru. Mjerenja su odrađena u jednostranoj konfiguraciji sa kratko-spojenim i uzemljnim ulazima, pri 24 bitnoj rezoluciji i internom referentnom naponu.

U tabeli 3 su prikazane izmjerene efektivne vrijednosti šuma, efektivna rezolucija i njihove peak-to-peak vrijednosti na kratko-spojenim i uzemljenim naponskim ulazom A/D konvertora u jednostranoj konfiguraciji, pri svim mogućim brzinama odabiranja, 24-bitnoj rezoluciji pri internim i eksternim referentnim naponom.



Slika 5.2. Izmjereni šum na naponskom ulazu A/D konvertora pri brzinama odabiranja od a) 31250 SPS, c) 15625 SPS, e) 1.25 SPS, kao i odgovarajući histogrami koji prikazuju izmjereni šum pri brzinama odabiranja od b) 31250 SPS, d) 15625 SPS, f) 1.25 SPS.

od	In	terni refei	rentni nap	oon	Eksterni referentni napon				
Brzi abir [SP	P	ENOB	P	ENOB	P	ENOB	P	ENOB	
na anja S]	[µVrms]	[bitova]	[µ∨թ-թ]	p-p [bitova]	[µVrms]	[bitova]	[µ∨ _{p-p}]	p-p [bitova]	
31250	121	17.4	736	14.7	107	17.5	736	14.7	
15625	95	17.6	657	14.9	95	17.6	634	14.9	
10417	79	17.9	488	15.3	79	17.9	482	15.3	
5208	59	18.3	371	15.7	61	18.3	460	15.4	
2597	54	18.4	346	15.8	52	18.5	346	15.8	
1007	29	19.3	177	16.7	31	19.3	219	16.4	
503.8	20	19.8	146	17	21	19.8	130	17.2	
381	17	20.1	114	17.4	17	20.1	111	17.4	
200.3	13	20.4	85	17.8	13	20.4	88	17.7	
100.2	10	20.9	63	18.2	10	20.9	66	18.2	
59.52	8	21.2	53	18.5	7	21.4	47	18.6	
49.68	7	21.3	47	18.6	7	21.4	44	18.7	
20.01	7	21.3	44	18.8	6	21.8	38	19.2	
16.63	6	21.6	44	18.8	4	22	28	19.4	
10	6	21.6	44	18.8	4	22	25	19.6	
5	5	21.7	34	19.1	3	22.1	22	19.7	
2.5	5	21.7	34	19.1	3	22.1	21	19.8	
1.25	5	21.7	28	19.4	3	22.1	17	20.1	

Tabela 3: Izmjerene efektivne vrijednosti šuma, efektivnog broja bita i njihovih peak-to-peak vrijednosti na kratko-spojenom i uzemljenom naponskom ulazu, pri 24-bitnoj rezoluciji, internim i eksternim referentnim naponom.

Očitana mjerenja pokazuju da je najveći šum prisutan pri najvećoj brzini odabiranja AD4111 čipa, a najmanji šum pri najmanjoj brzini odabiranja, što je i bilo za očekivati. Efektivna vrijednost šuma pri najvećoj brzini odabiranja iznosi 121 μ V, što rezultira u efektivnom broju bitova od 17.4. U slučaju brzina odabiranja 15625 SPS i 1.25 SPS, efektivna rezolucija iznosi 17.6 i 21.7 bitova, respektivno.

U ekstremnim slučajevima, odnosno, peak-to-peak efektivne vrijednosti bitova dobijene na osnovu peak-to-peak efektivne vrijednosti šuma pri 31250 SPS, 15625 SPS, 1.25 SPS iznose 14.7, 14.9 i 19.4 bitova, respektivno.

U poređenju sa vrijednostima dobijenim od strane proizvođača primjetna su odstupanja. Naime, u rasponu brzina odabiranja od 200 SPS do 31250 SPS, najveće odstupanje je izmjereno pri brzini od 2597 SPS i ono iznosi 1.63 %. S druge strane, u opsegu brzina od 1.25 SPS do 100.2 SPS, razlike između izmjerenih ENOB vrijednosti razvijenog sistema u odnosu na vrijednosti navedene od strane proizvođača se kreću u opsegu od 0.46 % do 6.45 %. Najveće odstupanje je zabilježeno pri brzini odabiranja od 1.25 SPS, gdje izmjereni ENOB sistema koji je razvijen u ovom master radu iznosi 21.7 bita, dok je vrijednost data od strane proizvođača jednaka 23.1 bitova.

Poređenjem peak-to-peak vrijednosti ustanovljeno je da pri brzinama odabiranja od 200.3 SPS do 31250 SPS nisu postignuta značajnija odstupanja, dok se odstupanja u opsegu brzina od 1.25 SPS do 100.2 SPS kreću od 3.12 % do 7.73 % i najveće je pri brzini odabiranja od 2.5 SPS.

Poređenjem mjerenja pomoću internog i eksternog naponskog regulatora, ENOB se mijenja u opsegu od 0 % do 2.34 % korišćenjem eksternog referentnog napona u odnosu na interni referentni napon. Pri manjim brzinama odabiranja, odnosno u opsegu brzina od 1.25 SPS do 100.2 SPS, ENOB se mijenja u opsegu od 0 % do 2.34 % korišćenjem eksternog referentnog napona u odnosu na interni.

Najveća razlika je izmjerena na brzini odabiranja od 20.01 SPS, gdje je ENOB, u slučaju eksternog referentnog napona, bio veći za 2.34 %, u odnosu na efektivnu rezoluciju izmjerenu sa internim referentnim naponom.

Može se zaključiti da je implementacija eksternog naponskog regulatora u razvijenom sistemu donijela određena poboljšanja u radu AD4111 čipa. Bolja preciznost eksternog naponskog regulatora se ogleda u ENOB-u koji je 0.69 % veći u odnosu na efektivnu rezoluciju izmjerenu sa internim referentnim naponom, čime su osigurana preciznija mjerenja.

5.2.2. Proračun efektivnog broja bitova na strujnom ulazu A/D konvertora upotrebom internog i eksternog linearnog naponskog regulatora

Kao i u testiranju obavljenom u prethodnom poglavlju, proračun efektivnog šuma, efektivne rezolucije i njihovih peak-to-peak vrijednosti je obavljen na kratko-spojenom i uzemljenom strujnom ulazu na osnovu 1000 mjerenja pri svim dostupnim brzinama odabiranja, 24-bitnoj rezoluciji, internom i eksternom naponskom regulatoru. Takođe, na slici 5.3. grafički su prikazana mjerenja i histogrami pri brzinama odabiranja od 31250 SPS, 15625 SPS i 1.25 SPS i internom naponskom regulatoru.



Slika 5.3. Šum mjerenja na strujnom ulazu A/D konvertora pri brzinama odabiranja od a) 31250 SPS, c) 15625 SPS, e) 1.25 SPS, kao i odgovarajući histogrami koji prikazuju izmjereni šum pri brzinama odabiranja od b) 31250 SPS, d) 15625 SPS, f) 1.25 SPS

U tabeli 4 su prikazane izmjerene efektivne vrijednosti šuma, efektivna rezolucija i njihove peak-to-peak vrijednosti na kratko-spojenim i uzemljenim strujnim ulazom A/D konvertora, pri svim mogućim brzinama odabiranja, 24-bitnoj rezoluciji i internom naponskom regulatoru.

Q	In	terni refei	entni nap	oon	Eksterni referentni napon					
Brzina dabiranja [SPS]	P [nA rms]	ENOB [bitova]	Р [nA p-p]	ENOB p-p [bitova]	P [nArms]	ENOB [bitova]	Р [nA p-p]	ENOB p-p [bitova]		
31250	195	16.6	1212	14	186	16.7	1187	13.8		
15625	180	16.7	1120	14.1	166	16.9	868	14		
10417	167	16.9	872	14.2	144	17.1	810	14.1		
5208	113	17.5	728	14.7	102	17.5	717	14.7		
2597	100	17.6	692	14.8	94	17.7	649	14.9		
1007	62	18.3	410	15.4	62	18.3	439	15.3		
503.8	41	18.9	244	16	39	19	237	16		
381	37	19	212	16.2	32	19.3	202	16.5		
200.3	23	19.7	166	17	23	19.7	150	17		
100.2	16	20.1	118	17.4	17	20.1	112	17.6		
59.52	12	20.5	82	18	12	20.6	82	17.8		
49.68	11	20.8	76	18.1	10	20.8	69	18.1		
20.01	7	21.4	68	18.2	7	21.4	47	18.7		
16.63	6	21.5	61	18.3	6	21.6	44	18.8		
10	5	21.9	38	19.2	4	22.2	38	19		
5	3	22.6	27	19.7	3	22.7	25	19.6		
2.5	3	22.6	17	20	3	22.7	15	20.3		
1.25	3	22.6	14	20.4	3	22.7	14	20.4		

Tabela 4: Izmjerene efektivne vrijednosti šuma, efektivnog broja bita i njihovih peak-to-peak vrijednosti na kratko-spojenom i uzemljenom strujnom ulazu, pri 24-bitnoj rezoluciji, internim i eksternim referentnim naponom

Očitana mjerenja pokazuju da je najveći šum prisutan kod brzine odabiranja od 31250 SPS i efektivna vrijednost šuma pri toj brzini iznosi 195 nA, što rezultira u efektivnom broju bitova od 16.6. Pri brzini odabiranja od 15625 SPS, efektivna rezolucija iznosi 16.7 bitova, dok je pri najmanjoj brzini odabiranja, odnosno pri 1.25 SPS jednaka 22.6 bitova. Takođe, u ekstremnim slučajevima, odnosno u slučaju najvećeg izmjerenog šuma za brzine odabiranja 31250 SPS, 15625 SPS, 1.25 SPS, ENOB iznosi 14, 14.1 i 20.4 bitova, respektivno.

Kao i kod naponskih mjerenja, povećanjem brzine odabiranja dolazi do smanjenja efektivne rezolucije A/D konvertora, međutim, strujna mjerenja su pokazala da je izmjereni ENOB

najbliži onome datom od strane proizvođača pri najmanjim brzinama odabiranja. Pri brzinama odabiranja od 1.25 SPS do 59.52 SPS, odstupanje ENOB-a razvijenog sistema u odnosu na onaj dat od strane proizvođača je u opsegu od 0.44 % do 1.95 %. S druge strane, pri brzinama odabiranja od 100.2 SPS do 31250 SPS, odstupanje se kreće u opsegu od 2.03 % do 4.73 %, gdje je najveće izmjereno odstupanje zabilježeno pri brzini od 381 SPS i iznosi 19 bita, dok je vrijednost data od strane proizvođača 19.9 bita.

Prilikom upoređivanja peak-to-peak vrijednosti, zaključeno je da izmjereni ENOB odstupa od ENOB-a navedenog od strane proizvođača u rasponu od 1.41 % do 7.11 %, pri čemu je najmanje odstupanje pri maksimalnoj brzini odabiranja, dok je najveće odstupanje pri 16.63 SPS.

Poređenjem izmjerenih vrijednosti upotrebom internog i eksternog naponskog regulatora, zapaža se da se prilikom korišćenja eksternog referentnog napona u opsegu brzina odabiranja od 200.3 SPS do 31250 SPS, ENOB mijenja od 0 % do 1.57 % u odnosu na interni naponski regulator, dok se pri manjim brzinama odabiranja, odnosno u opsegu od 1.25 SPS do 100.2 SPS, ENOB mijenja u opsegu od 0 % do 1.36 % korišćenjem eksternog referentnog napona u odnosu na interni. Najbolji rezultat je dobijen pri brzini odabiranja od 381 SPS, gdje je ENOB bio veći za 1.55 %, za slučaj korišćenja eksternog referentnog napona u odnosu na interni napon.

Kao i kod mjerenja napona, mjerenja struje su pokazala da precizniji referentni napon ipak donosi određena poboljšanja u radu AD4111 čipa. U ovom slučaju to se ogleda u ENOB-u koji je za 0.24 % veći, čime su još jednom osigurana preciznija mjerenja sa manjim šumom.

6. REALIZACIJA WEB STRANICE ZA KONFIGURACIJU RAZVIJENOG SISTEMA I IMPLEMENTACIJA MQTT PROTOKOLA ZA BEŽIČNO SLANJE MJERENJA

Sistem razvijen u ovom master radu je osmišljen u obliku "plug and play" koncepta, što omogućava njegovom korisniku rukovanje i konfigurisanje samog sistema bez prethodnog znanja o programiranju. Ovaj koncept je realizovan korišćenjem web stranica, čiji intuitivni izgled omogućava jednostavnu upotrebu predstavljenog rješenja krajnjem korisniku.

Nakon konfiguracije ovog DAQ sistema, ESP8266 mikrokontroler započinje bežično slanje mjerenja zadanih od strane korisnika preko MQTT protokola, dok istovremeno web stranicu održava dostupnom za slučaj da korisnik treba obaviti promjene konfiguracije sistema.

Na ovaj način, jedino što se od korisnika traži jeste da razvijenom sistemu dovede DC napajanje preko USB porta na mikrokontroleru, izvrši adekvatno povezivanje senzora na njima namijenjene konektore i koristeći uređaj koji posjeduje web pretraživač poveže sistem na dostupnu Wi-Fi mrežu i izvrši njegovu konfiguraciju.

6.1. Realizacija web stranica za povezivanje sistema na dostupnu Wi-Fi mrežu i za konfiguraciju sistema

ESP8266 D1 mini mikrokontroler, kao što je već rečeno u poglavlju 2.4.1., omogućava bežičnu Wi-Fi komunikaciju na dva načina: kao pristupnu tačku (*skraćeno:* AP, *eng. access point*) ili preko postojećeg Wi-Fi rutera (*skraćeno:* STA, *eng: station*).

Slikoviti opis razmjene podataka nekog uređaja i mikrokontrolera preko AP i STA režima je dat na slici 6.1.

Komunikacija pomoću AP režima se sprovodi tako što mikrokontroler, koristeći svoj Wi-Fi modul, formira svoju Wi-Fi mrežu vidljivu svim okolnim uređajima koji podržavaju Wi-Fi komunikaciju i koji se nalaze u dometu njegove antene. Na taj način je moguće izvršiti razmjenu podataka sa mikrokontrolerom bez upotrebe Interneta.

S druge strane, komunikacija pomoću STA režima obezbjeđuje razmjenu podataka preko Wi-Fi rutera iz okoline, odnosno preko dostupnog Interneta na tom ruteru zauzimajući slobodnu lokalnu IP adresu na njemu. Ovaj oblik komunikacije je pogodan u slučajevima kada uređaj koji komunicira sa mikrokontrolerom nije u dometu Wi-Fi antene mikrokontrolera, već se može nalaziti bilo gdje u dometu rutera na koji je mikrokontroler povezan.



Slika 6.1. Razmjena podataka upotrebom AP režima bežične Wi-Fi komunikacije prikazana na slici a) i razmjena podataka upotrebom STA režima bežične Wi-Fi komunikacije prikazana na slici b)

U razvijenom sistemu u ovom master radu su iskorišćena oba načina komunikacije. Prvi, AP režim omogućava korisniku koji se nalazi u neposrednoj blizini sistema da ga poveže na dostupnu Wi-Fi mrežu, ukucavajući njen naziv i šifru. To je obavljeno tako što je korisnik prvo svoj uređaj povezao na Wi-Fi mrežu koju je formirao mikrokontroler, a zatim je na web pretraživaču ukucao predefinisanu IP adresu: 192.168.4.1.

Nakon toga, na uređaju se pojavila web stranica sa rezervisanim mjestom za ukucavanje naziva i šifre Wi-Fi mreže sa dostupnim Internetom. Njen prikaz je dat na slici 6.2.

DAQ System Wi-Fi Configuration						
SSID:						
Enter Wi-Fi SSID						
Password:						
Enter Wi-Fi Password						
Submit						

Slika 6.2. Izgled web stranice u AP režimu za unos naziva i šifre dostupne Wi-Fi mreže

Nakon toga, ako su naziv i šifra tačno uneseni, na ESP8266 mikrokontroleru će se uključiti plava LED dioda, koja je definisana kao indikator uspješnog povezivanja. Nakon uspješnog povezivanja, korisnik može svoj uređaj raspariti od Wi-Fi mreže mikrokontrolera, nakon čega bi ga trebao povezati na istu Wi-Fi mrežu koju je unio na web stranici sa slike 6.2. Nakon povezivanja na novu Wi-Fi mrežu, od korisnika se zahtijeva da u web pretraživač unese predefinisanu IP adresu: 192.168.1.254. Ta IP adresa se nalazi izvan DHCP (*eng. Dynamic Host Configuration Protocol*) opsega rutera, čime se otklanja rizik da je već zauzeta od strane nekog drugog uređaja.

Proces konfigurisanja je intuitivan, potrebno je čekiranje polja za potvrdu pored kanala koji se koristi, nakon čega je omogućen opadajući meni tog kanala iz kojeg je potrebno izabrati naponske ili strujne ulaze na koje se senzori priključuju. Poslije odabranih kanala, korisnk ima mogućnost biranja brzine odabiranja i rezolucije konverzija, ukoliko se korisnik ne želi koristiti predefinisanu brzinu odabiranja od 1.25 SPS i rezoluciju od 24 bita. U sljedećem polju je potrebno unijeti broj koji definiše vremenske razmake između kojih DAQ sistem vrši bežično slanje podataka. U posljednjem polju je potrebno unijeti proizvoljni naziv identifikatora baze podataka, koji će korisniku kasnije poslužiti prilikom podešavanja akvizicije senzorskih mjerenja. Primjer konfiguracije sistema na web stranici je dat na slici 6.3.

Nakon podnošenja unijetih podataka, klikom da dugme *Submit* podaci pristižu na ESP8266 mikrokontroler, koji zatim izvršava adekvatno podešavanje registara AD4111 čipa i pokreće proces senzorskih mjerenja i njihovih slanja preko Wi-Fi mreže unijete u AP režimu. U tom trenutku, izvršava se automatsko osvježavanje web stranice u STA režimu, gdje se ona vraća na svoje početno stanje, omogućavajući korisniku ponovnu konfiguraciju sistema, ako je to potrebno.

	VIN0, VINCOM					
		~	Channel 8:		VIN0, VIN1	~
	VIN2, VIN3	~	Channel 9:		VIN0, VIN1	~
	VIN4, VINCOM	~	Channel 10:		VIN0, VIN1	~
	VIN0, VIN1	2	Channel 11:		VIN0, VIN1	~
	VINO, VIN1	~	Channel 12:		VIN0, VIN1	
	VIN0, VIN1	2	Channel 13:		VIN0, VIN1	
	VIN0, VIN1	Ŷ	Channel 14:		VIN0, VIN1	~
	VINO, VIN1	~	Channel 15:		VINO, VIN1	
Rate:						~
sion Reso	lution:					
						~
terval (see	conds):					
28						
D:						
	Rate: ion Reso erval (see	VIN4, VINCOM VIN0, VIN1 VIN0, VIN1	VIN4, VINCOM VIN0, VIN1 VIN0, VIN1	VIN4, VINCOM Channel 10: VIN0, VIN1 Channel 11: VIN0, VIN1 Channel 12: VIN0, VIN1 Channel 13: VIN0, VIN1 Channel 13: VIN0, VIN1 Channel 14: VIN0, VIN1 Channel 15: Rate:	VIN4, VINCOM Channel 10: VIN0, VIN1 Channel 11: VIN0, VIN1 Channel 12: VIN0, VIN1 Channel 13: VIN0, VIN1 Channel 13: VIN0, VIN1 Channel 13: VIN0, VIN1 Channel 14: VIN0, VIN1 Channel 15: rate:	Image: Second system Channel 10: Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Channel 11: Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Channel 12: Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Channel 13: Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Channel 13: Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Channel 15: Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1 Image: VINO, VIN1

Slika 6.3. Primjer konfiguracije DAQ sistema upotrebom web stranice

6.2. Implementacija MQTT komunikacionog protokola za bežično slanje mjerenja

Najvažniji dio sistema sa integrisanim "IoT" konceptom predstavlja komunikacioni protokol za razmjenu podataka. U sistemima čija se ograničenja ogledaju u nepouzdanim mrežama i izvorima napajanja, često se zahtijeva da komunikacioni protokol bude jednostavan i lak za izvršavanje sa što efikasnijom brzinom prenosa.

MQTT protokol je razvijen još 1999. godine i nerijetko predstavlja sinonim za brz i lagan komunikacioni protokol, sa minimalnim zahtijevom potrošnje električne energije. Ovaj način komunikacije je zasnovan na arhitekturi "objavi-pretplati" i pokazao se ekonomičnijim od HTTP protokola zasnovanim na "zahtjev-odgovor" arhitekturi. Arhitektura MQTT-a je zasnovana na postojanju brokera, koji prima sve podatke koji do njega dolaze i preusmjerava ih svima koji su se pretplatili na njegove teme.

S tim u vezi, da bi podaci stigli od pošiljaoca do primaoca, pošiljalac je u obavezi da taj podatak objavi na temu nekog brokera, dok je primalac u obavezi da se na tom brokeru pretplati na temu istog tog imena. Jasno je da broker zapravo predstavlja centralni dio ovog komunikacijskog protokola, s obzirom na to da vrši prijem svih podataka koji mu se šalju, vrši njihovo filtriranje i zadužen je za odlučivanje kome će podaci biti proslijeđeni. Među najpoznatijim brokerima su: Mosquitto, HiveMQ, RabbitMQ, Real Small Message Broker, CloudMQTT, VenereMQ itd [46].

Ilustrativni prikaz razmjene podataka između pošiljalaca i primalaca koristeći MQTT broker je dat na slici 6.4.



Slika 6.4. Primjer MQTT komunikacije zasnovanom na konceptu objava-pretplata

Teme na brokeru kojima pošiljalac šalje podatke mogu biti proizvoljnog imena i obično se sastoje od više podnivoa odvojenih kosim crtama, kao na primjer: kuća/kuhinja/temperatura i kuća/kuhinja/vlažnost. U ovom slučaju, kuća predstavlja korijen teme, kuhinja je podtema, dok su temperatura i vlažnost parametri koji se mjere. To su, dakle, hijerarhijske tekstualne putanje koje omogućavaju organizaciju i filtriranje podataka koji pristižu brokeru.

S tim u vezi, vrijednost očitana sa temperaturnog senzora koji se nalazi u kuhinji te kuće, treba biti poslata brokeru sa naznačenom putanjom: kuća/kuhinja/temperatura, dok vrijednost

očitana sa senzora za vlažnost vazduha treba biti poslata brokeru sa naznačenom putanjom koja glasi: kuća/kuhinja/vlažnost.

U sistemu koji je razvijen u ovom master radu, izabrani broker je HiveMQ, dok je uspostavljena dvoslojna hijerarhija tema. Korijen teme predstavlja riječ koju korisnik unosi u poslednjem polju sa slike 6.3. u STA režimu web stranice. Parametri te teme su automatski generisani u zavisnosti od toga koje je kanale korisnik omogućio prilikom konfiguracije. Recimo, za slučaj da je korisnik omogućio kanale 0, 1, 2, a da je za ime teme upisao "daq", ESP8266 mikrokontroler će vrijednosti sa senzora koji su priključeni na tim kanalima slati HiveMQ brokeru sa naznačenim putanjama koje glase: daq/ch0, daq/ch1, daq/ch2.

6.3. JSON formatiranje podataka i test njihovog slanja MQTT protokolom

Nakon izvršene konfiguracije sistema za akviziciju podataka sa senzora putem web stranice predstavljene u poglavlju 6.1., ESP8266 mikrokontroler započinje slanje podataka brokeru putem MQTT komunikacionog protokola. Ti podaci sadrže tri glavne informacije koje obuhvataju:

- da li se radi o naponskom ili strujnom mjerenju,
- vrijednost tog mjerenja izražena u voltima ili miliamperima
- i broj kanala na kojem su mjerenja izvedena.

Razlog zbog kojeg se vrši slanje svih ovih podataka, umjesto samo izmjerene vrijednosti, leži u lakšem sortiranju, obradi, analizi i vizualizaciji podataka kada budu sačuvani u bazi podataka. Dakle, s obzirom na to da je potrebno slati podatke u vidu objekta koji sadrži sve pomenute informacije, izabran je JSON (*eng. JavaScript Object Notation*) format za razmjenu podataka.

JSON je format koji je dizajniran da bude jednostavan, lak i svestran za korišćenje u aplikacijama koje komuniciraju putem mreže. JSON karakteriše format koji je lako struktuiran tako da ga razumiju i ljudi i programi. Ključ formata je string koji je okružen vitičastim zagradama i koji se sastoji iz kategorije, vrijednosti i dodatnih informacija. U nastavku je dat primjer JSON stringa poslat MQTT brokeru odakle se može lako zaključiti da je izmjeren napon od 4.74 V na trećem kanalu razvijenog DAQ sistema:

{

```
"measurement": "voltage",
"fields": {
"value": 4.747972012
},
"tags": {
"channel": "ch3"
}
```

}

Verifikacija ispravnog slanja podataka MQTT brokeru je izvršena konfiguracijom razvijenog DAQ sistema, na čije su ulaze dovedeni proizvoljni naponski nivoi:

- kanal broj 0 je kratko-spojen i uzemljen,
- kanalu broj 3 je doveden regulisani napon od 3.3 V sa Arduino UNO mikrokontrolera,
- kanalu broj 5 je doveden napon od blizu 5 V sa USB porta računara.

Na web stranici u STA režimu je nakon odabranih kanala, izabrana rezolucija od 24 bita, maksimalna brzina odabiranja, vremenski interval od 3 sekunde i unesen je korijen teme: "daq". Prikaz mjerenja je izvršen upotrebom open-source MQTT klijent softvera, koji je bilo potrebno pretplatiti na teme daq/ch0, daq/ch3, daq/ch5 na javnom brokeru HiveMQ i dat je na slici 6.5.

Topic: daq/ch0 QoS: 0	Topic: daq/ch3 QoS: 0	Topic: daq/ch5 QoS: 0
<pre>{ "measurement": "voltage", "fields": { "value": -0.000160039 }, "tags": { "channel": "ch0" } }</pre>	<pre>{ "measurement": "voltage", "fields": { "value": 3.250922203 }, "tags": { "channel": "ch3" } }</pre>	<pre>{ "measurement": "voltage", "fields": { "value": 4.677369595 }, "tags": { "channel": "ch5" } }</pre>
2024-12-01 14:27:02:222	2024-12-01 14:27:02:222	2024-12-01 14:27:02:222
a)	b)	c)



Slika 6.5. Prikaz pristiglih JSON stringova na teme MQTT brokera, prikazani na slikama a), b), c) i prikaz pristiglih JSON stringova na iste teme 3 sekunde kasnije prikazani na slikama d), e), f)

Testom izvršenim upotrebom open-source MQTT klijent softvera je utvrđeno da informacije koje obuhvataju mjerenja pristižu na broker u skladu sa konfiguracijom obavljenom na web stranici u STA režimu.

7. IMPLEMENTACIJA BAZE PODATAKA I SOFTVERA ZA VIZUALIZACIJU SENZORSKIH MJERENJA

Baze podataka omogućavaju strukturisano skladištenje velikih količina podataka, čineći ih lako dostupnim i preglednim. Omogućavaju brži pristup informacijama, kao i mogućnost grupisanja i organizovanja prema određenim parametrima podataka u poređenju sa nestrukturisanim čuvanjem. Osim toga, pružaju uvid u prošlost i stvaraju sliku o trendovima promjene podataka kroz istoriju čuvanja.

Baze podataka zasnovane na vremenski zavisnim podacima su optimizovane za čuvanje podataka koji sa sobom nose i informaciju o vremenskom trenutku kada su zabilježeni. Takvi podaci se najčešće susreću kod evidencija događaja ili u "IoT" zasnovanim sistemima. U takvim bazama podataka je veoma bitno da podaci budu svrstani hronološkim redosljedom.

7.1. InfluxDB baza podataka

Baze podataka zasnovane na vremenski zavisnim podacima (u daljem tekstu: TSDB, *eng. time series database*) su stekle posebnu popularnost porastom upotrebe sistema zasnovanim na "IoT". Radom [47] je predstavljen porast popularnosti ovih baza podataka od 2015. godine do 2016. godine u iznosu od 26.7 %. Glavni razlog leži u činjenici da TSBD predstavljaju daleko efikasniji i skalabilniji način čuvanja podataka, u odnosu na obične baze podataka, što omogućava istovremeni rad sa milionima "IoT" uređaja.

Među najkorišćenijim TSBD-ovima je InfluxDB baza podataka, formirana 2013. godine od strane "Influxdata", a koja i do danas važi za najpopularnijom. Tome svjedoči onlajn rangiranje TSBD-ova, zasnovano na opštem interesu korisnika, broju pominjanja na Internetu, učestanosti tehničkih diskusija, broju ponuda za posao u kojima se pominje baza podataka i relevantnosti na društvenim mrežama [48].

"InfluxDB" je open-source distribuirana baza podataka razvijena preko *Go* programiranja, čiji su korisnici u mogućnosti da upotrebom *HTTP API* i biblioteka rade sa bazom podataka. Koristi *SQL-nalik* jezike: "InfluxQL" i "Flux" za potraživanje podataka, koji mogu biti 64-bitni cijeli i decimalni brojevi, Bulovi podaci i stringovi [49], [50]. Ovi jezici omogućavaju interakciju korisnika sa bazom podataka preko korisničkog interfejsa ili komandnog interfejsa. "TICK Stack" je još jedna popularna open-source platforma osnovana 2013. godine, takođe od strane
"Influxdata", a koja predstavlja skup različitih i međusobno povezanih open-source softvera. "TICK Stack" je ubrzo spojen u jednu cjelinu koja je danas poznata kao "InfluxDB 2.0" baza podataka. Osnovna arhitektura "InfluxDB 2.0" baze podataka je data na slici 7.1.



Slika 7.1. Osnovna arhitektura InfluxDB baze podataka [51]

Arhitektura "InfluxDB 2.0" baze podataka se sastoji iz četiri softvera: Telegraf, InfluxDB, Hronograf i Kapacitor. Telegraf je open-source agent koji služi za pribavljanje podataka i trenutno podržava preko 300 različitih izvora podataka. Fleksibilan je po pitanju tipova podataka koje pribavlja i u mogućnosti je da formatira nestrukturisane podatke prije proljeđivanja bazi podataka, čime se ostvaruje ušteda na vremenu i memoriji. Hronograf predstavlja open-source web aplikaciju od InfluxDB-a koja služi za praćenje infrastrukture baze podataka, obavještava o greškama pri radu i služi za vizualizaciju i menadžment baza podataka. Kapacitor je open-source okvir za obradu informacija koji omogućava lako generisanje upozorenja i prepoznavanje anomalija. Karakterišu ga kvalitetno prilagođeno skladištenje podataka posebno dizajnirano za vremenski zavisne podatke, velika brzina unosa i konsolidacija podataka i jednostavan *HTTP API* za unos i upit podataka [51]. U ovom master radu je "InfluxDB 2.0" baza podataka realizovana preko korisničkog interfejsa koji je dostupan na onlajn platformi. Najprije je potrebno napraviti nalog na platformi nakon čega je potrebno formirati *bucket* u kojem će se čuvati podaci. *Bucket* predstavlja mjesto za čuvanje podataka, kojem je potrebno nakon formiranja dodijeliti proizvoljno ime.

Nakon formiranja *bucket*-a, potrebno je pristupiti Telegraf-u koji je predstavljen kao zaseban dio na "InfluxDB 2.0" platformi. Prilikom konfigurisanja Telegraf-a, potrebno je toj konfiguraciji dodijeliti *bucket* u kojoj će Telegraf smještati podatke i dati joj proizvoljno ime. Takođe, treba izabrati izvor podataka za Telegraf, koji će biti u slučaju ovog master rada "MQTT consumer".

Nakon toga, u predefinisanom kodu datom od strane Telegrafa za izabrani izvor podataka, potrebno je izmijeniti nekoliko promjenjivih. Potrebno je unijeti adresu i port MQTT brokera na koji pristužu podaci, kao i teme na koje će se Telegraf pretplatiti. Na kraju je potrebno izabrati i format podataka koji pristižu na teme MQTT brokera, što je u slučaju ovog master rada JSON format, o kojem je bilo riječi u poglavlju 6.3.

Telegraf, kao agent za prikupljanje podataka, mora biti pokrenut na nekoj lokalnoj mašini da bi radio. Najlakši način da se instalira i pokrene je upotrebom "Windows PowerShell" programa. Nakon što korisnik preuzme instalacione fajlove sa "InfluxDB" platforme i smjesti ih u odgovarajući folder, kao na primjer C:\Program Files\InfluxData\telegraf, potrebno je u komandom prozoru "Windows PowerShell"-a unijeti komande:

- cd "C:\Program Files\InfluxData\telegraf"
- .\telegraf.exe --service install

Instalirani Telegraf zatim treba povezati sa odrađenom konfiguracijom, što se postiže unošenjem dodatnih komandi koje u sebi sadrže jedinstvene tokene i putanje dodijeljene od strane Telegrafa na "InfluxDB 2.0" platformi:

 \$env:INFLUX_TOKEN="a8_e3Q4fWpmnCA-JXdSTACtociTfwO1QDLxF8Gg1D5FQbKBUMzfbPUs3rr_hKjj5vV99A1vWQ2EuiOK hliWjjQ==" & "C:\Program Files\InfluxData\telegraf\telegraf.exe" --config https://us-east-1-1.aws.cloud2.influxdata.com/api/v2/telegrafs/0deb5d530690f000

Tekst u komandama označen crvenom bojom treba zamijeniti za tekstom koji je korisniku pružen od strane Telegrafa na "InfluxDB 2.0" platformi u skladu sa podešenom konfiguracijom. Nakon izvršavanja navedenih komandi korisniku će u ranije definisanom *bucket*-u biti dostupni svi podaci koji pristižu na unesene teme MQTT brokera.

7.2. Grafana platforma za vizualizaciju podataka

"Grafana" je open-source softver koji je u ovom master radu iskorišćen za vizualizaciju podataka koji su uskladišteni u "InfluxDB 2.0" bazi podataka. Kada se pojavio 2014. godine, bio je kompatibilan sa "InfluxDB" i "Graphite" bazama podataka [49], da bi danas podržavao veliki broj najpopularnijih baza podataka iz [48].

Podešavanje ovog softvera je veoma jednostavno i intuitivno, jer obuhvata unošenje svega nekoliko parametara koji će ga povezati sa *bucket*-om u "InfluxDB 2.0"-u. Naime, nakon otvaranja naloga u ovom softveru, potrebno je u dijelu pod nazivom *Dashbords* podesiti novu konfiguraciju, koja obuhvata unošenje tipa podataka koji se nalaze u "InfluxDB 2.0"-u, ime vlasnika baze podataka i njenu web adresu. Pristup bazi podataka se ostvaruje unošenjem jedinstvenog API tokena, koji korisnik može dobiti na "InfluxDB 2.0" platformi u dijelu namijenjenom za generisanje tokena za pristup bazi podataka i njenim resursima.

Korisniku će biti dostupni svi podaci iz izabrane baze podataka, nakon čega može izgled grafika i ostalih alata u "Grafana"-i podesiti prema svojim potrebama.

7.3. Testno okruženje i prikaz višekanalnog mjerenja različitih senzora

Testno okruženje, prikazano na slici 7.2. a) je korišćeno za testiranje sistema za akviziciju podataka razvijenog sistema u ovom master radu. Sastojalo se od DC napajanja od 24 V oznake SPDM241201 i Belimo 22RTM-19-1 senzorskog modula koji sadrži senzore za mjerenje temperature, vlažnosti vazduha i koncentracije CO₂ gasa. Na ulaz DC napajanja je doveden naizmjenični napon od 230 V, da bi se na njegovom izlazu ostvario DC napon od 24 V iskorišćen za napajanje Belimo 22RTM-19-1 senzorskog modula. Analogni izlazi sa senzorskog modula su

dovedeni na naponske ulaze DAQ sistema. Tri analogna izlaza Belimo 22RTM-19-1 senzorskog modula, koji sadrže informaciju o temperaturi, vlažnosti vazduha i koncetraciji CO₂ gasa su naponskog su opsega od 0 V do 10 V koji odgovara vrijednostima:

- temperature od 0 $^{\circ}C 50 ^{\circ}C$,
- vlažnosti vazduha od 0 % rh 100 % rh,
- koncentraciji CO₂ gasa od 0 ppm 2000 ppm.



Slika 7.2. a) Testno okruženje za akviziciju podataka sa Belimo 22RTM-19-1 senzorskog modula i 7.2. b) Dijagram pinova Belimo 22RTM-19-1 senzorskog modula

Nakon adekvatnog povezivanja senzora kao na slici 7.2., razvijeni sistem se najprije povezao na dostupnu lokalnu WiFi mrežu rutera. Nakon toga je ostvaren pristup web stranici za podešavanje konfiguracije sistema, gdje su senzori priključeni na kanale 0, 1 i 2, sa ulazima: VINO i VINCOM, VIN1 i VINCOM, VIN2 i VINCOM, respektivno. Izabrani su i brzina odabiranja koja iznosi 100 SPS, rezolucija od 24 bita, intervali mjerenja od 5 sekundi, a kao korijen teme MQTT brokera je unesena riječ "daq".

Konfiguracijom Telegrafa objašnjenom u poglavlju 7.1. je ostvareno čuvanje izmjerenih naponskih vrijednosti na "InfluxDB 2.0" platformi u bazi podataka nazvanoj *Mjerenja senzora*. Nakon uvjerenja o dobro izvršenoj akviziciji podataka, obavljena je konfiguracija "Grafana" softvera u kojem je potrebno prije vizualizacije podataka, izvršiti konvertovanje vrijednosti iz naponskih u fizičke veličine. S obzirom na to da naponski nivo korespondira temperaturi od 0 °C – 50 °C, vlažnosti vazduha od 0 % – 100 % i koncentraciji CO₂ gasa od 0 ppm – 2000 ppm, izvedene su formule za konverziju napona u pomenute fizičke veličine:

$$T = V^* 5 \tag{10}$$

$$RH = V*10 \tag{11}$$

$$CO_{2konc.} = V * 200$$
 (12)

gdje je V napon izmjeren na tom senzoru, T je temperatura, RH je vlažnost vazduha i CO_2 konc. je koncentracija CO_2 gasa.

Nakon konverzije napona u fizičke veličine, obavljeno je uređivanje "Grafana" vizualizacije upotrebom predefinisanih panela poput istorijskog praćenja promjene podatka i mjerača koji vrši ulogu pokazivanja trenutne izmjerenje vrijednosti. Prikaz vizualizacije je dat na slici 7.3.



Slika 7.3. Vizualizacija višekanalnog mjerenja sa Belimo 22RTM-19-1 senzorskog modula

Testiranje u ovom poglavlju pokazuje mogućnost implementacije ovog sistema kao uređaja za kontinualnu upotrebu, koje omogućava pregled istorijskog i trenutnog višekanalnog očitavanja senzora.

Na "Grafana" platformi sa slike 7.3. je prikazano mjerenje u trajanju od 50 minuta, vizualizovano pomoću tri grafika koji prikazuju promjene temperature, vlažnosti vazduha i koncentracije CO₂ gasa u sobnim uslovima u proteklom vremenu. Osim toga, implementirana su i tri mjerača za iste fizičke veličine koji prikazuju njihove trenutne vrijednosti u realnom vremenu. Na njima je moguće konfigurisati i alarmne sisteme, koji će se aktivirati kada fizičke veličine koje se mjere premaše predefinisane granice kritičnih vrijednosti, predstavljene crvenom bojom na mjeračima. Granice kritičnih vrijednosti temperature, vlažnosti vazduha i koncentracije CO₂ gasa su definisane na: 30 °C, 80 % rh i 1400 ppm, respektivno.

Na graficima koji prate promjene mjerenih fizičkih veličina može se zapaziti da se u intervalu mjerenja od 50 minuta, temperatura kreće u opsegu od 21.9 °C do 20.7 °C, što odgovara naponskom opsegu temperaturnog senzora od 4.38 V do 4.14 V. S druge strane, za isti vremenski interval vlažnost vazduha se u sobi mijenjala u opsegu od 53.4 % rh do 54.6 % rh, a koncentracija CO_2 gasa u opsegu od 1040 ppm do 1260 ppm.

7.4. Testno okruženje i prikaz izvršenog višekanalnog očitavanja više senzora istog tipa

Za razliku od prethodnog testiranja, u ovom poglavlju će biti izvršeno mjerenje koje prikazuje mogućnost implementacije ovog sistema kao uređaja za testiranje međusobnog odstupanja senzora istog tipa. Naime, testno okruženje uključuje razvijeni višekanalni sistem, DC napajanje senzora, temperaturne senzore i računar. Ulogu DC napajanja obavlja dodatni ESP8266 mikrokontroler koji je postavljen na proto-ploči i koji se napaja sa USB porta računara. Senzori koji su iskorišćeni u testiranju su naponski temperaturni LMT87LPGM senzori mjernog opsega od -50 °C do 150 °C sa tipičnom preciznošću od ± 0.4 °C i maksimalnom preciznošću od ± 2.7 °C. Opisano testno okruženje je prikazano na slici 7.4.



Slika 7.4. Testno okruženje za prikaz višekanalne akvizicije i vizualizacije senzorskih mjerenja

Senzor LMT87LPGM se može napajati DC naponom od 2.7 V do 5.5 V. Dijagram pinova je dat na slici 7.5. odakle se može vidjeti da se na njegovim VDD i GND pinovima dovodi napajanje, a izlazni napon je prisutan na OUT pinu senzora. U ovom testu su iskorišćena tri ova senzora kako bi se i ujedno analizirala njihova preciznost posmatrajući njihova međusobna odstupanja pri istim temperaturnim uslovima. Doveden im je napon od 3.3 V sa ESP8266 mikrokontrolera na proto-ploči.



Slika 7.5. Dijagram pinova naponskog temperaturnog senzora oznake LMT87LPGM

Povezvanje senzora je obavljeno na kanalima 0, 1 i 2, sa ulazima: VIN0 i VINCOM, VIN1 i VINCOM, VIN2 i VIN3, respektivno, čime su pokrivena i jednostrana i diferencijalna mjerenja. Izabrani su i brzina odabiranja koja iznosi 100 SPS, rezolucija od 24 bita, intervali mjerenja od 5 sekundi, a kao korijen teme MQTT brokera je unesena riječ "daq".

Za konverziju naponskih vrijednosti u temperaturne vrijednosti, iskorišćena je formula data u tehničkoj dokumentaciji LMT87LPGM senzora prikazana relacijom (13):

$$T = \frac{13.582 - \sqrt{184.47072 + 0.01732 * (2230.8 - V * 1000)}}{-0.00866} + 30$$
(13)

gdje je T temperatura izražena u Celzijusovoj skali, a V napon izražen u voltima.

Nakon izvršene transformacije mjernih veličina, u "Grafana" softveru se može vidjeti grafik mjerenja prikazan na slici 7.6. Sa grafika se može zapaziti da se izmjerena temperatura tokom 10 minuta u sobnim uslovima na kanalu br. 0 kretala od 22.01 °C do 22.6 °C, na kanalu br. 1 od 22.22 °C do 22.82 °C, dok se na drugom kanalu temperatura kretala od 21.98 °C do 22.59 °C. Izmjerene temperature na kanalima 0, 1 i 2 odgovaraju naponskim opsezima od 2.331 V do 2.339 V, od 2.328 V do 2.3362 V i od 2.3312 V do 2.3394 V, respektivno.



Slika 7.6. Temperaturna mjerenja tri LMT87LPGM senzora u 10-minutom intervalu

Međusobna odstupanja senzora se mogu proračunati međusobnim oduzimanjem vrijednosti mjerenja sa slike 7.6. i njihovim prikazivanjem na grafiku čime se može utvrditi njihova preciznost, što je i prikazano na slici 7.7. i u tabeli 5.



Slika 7.7. Međusobna odstupanja tri LMT87LPGM senzora u 10-minutnom intervalu

LMT87 senzor	Minimalna	Maksimalna
	vrijednost	vrijednost
Δ (CH0-CH1)	-0.365 °C	0.155 °C

0.144 °C

0.322 °C

Tabela 5. Minimalne i maksimalne tri LMT87LPGM senzora u 10-minutom intervalu

Sa date slike i tabele 5, može se zaključiti da međusobna odstupanja senzora u istim vremenskim trenucima ne prelazi -0.365 °C i 0.322 °C, što je unutar okvira tipične preciznosti senzora od ± 0.4 °C date od strane proizvođača. Ovim testiranjem je pokazano korišćenje razvijenog sistema u svrhu otkrivanja preciznosti LMT87LPGM senzora iz iste serije proizvodnje.

 Δ (CH0-CH2)

8. ZAKLJUČAK

Ovaj master rad se bavio razvojem ekonomski isplativog, autonomnog sistema niske potrošnje za akviziciju podataka sa senzora u naponskom opsegu od 0-10 V i u strujnom opsegu od 0-20 mA i njegovom integracijom u "IoT" metodom selekcije odgovarajućeg A/D konvertora, mikrokontrolera, baze podataka i softvera za njihovu vizualizaciju.

Sprovedenom komparativnom analizom A/D konvertora, zaključeno je da je za svrhe ovog sistema pogodno koristiti sigma-delta konvertor, s obzirom na to da ga karakteriše 24-bitna rezolucija odabiranja, koja osigurava precizna mjerenja. Iz tog razloga je izabran AD4111 čip, koji u sebi sadrži 24-bitni sigma-delta A/D konvertor sa 8 naponskih i 4 strujna ulaza. Svaki naponski ulaz je u mogućnosti očitavanja napona od ±10 V, dok strujni ulazi mogu očitavati struje u opsegu od 0-20 mA. Tim naponskim i strujim ulaznim opsezima je omogućeno očitavanje velikog broja senzora koji se danas koriste kako u industriji, tako i u svakodnevnoj primjeni. Osim velike fleksibilnosti po pitanju senzora, mogućnost priključenja do 8 naponskih i do 4 strujna senzora omogućava ovom sistemu da sprovodi višekanalno mjerenje većih razmjera.

Imajući u vidu da je sistem potrebno implementirati u mrežu "IoT", bilo je potrebno izabrati i mikrokontroler koji osim što mora biti sposoban da šalje podatke putem Interneta, mora imati i mogućnost komunikacije sa AD4111 čipom. Za tu svrhu je izabran ESP8266 mikrokontroler, koji pored povezivanja na lokalnu Wi-Fi mrežu, komunicira i sa AD4111 čipom pomoću SPI komunikacionog protokola.

Sistem za akviziciju podataka je razvijen na štampanoj ploči dimenzija 8 cm x 8.3 cm, gdje dvije glavne komponente predstavljaju pomenuti mikrokontroler i čip. Na PCB-u je dizajnirana prenaponska i prekostrujna zaštita, koja štiti AD4111 čip od mogućih elektrostatičkih pražnjenja i neželjenih naponskih i strujnih nivoa. Zaštita je realizovana upotrebom odgovarajućih TVS dioda, otpornika, kondenzatora i resetabilnih osigurača. Osim toga, na štampanoj ploči je implementiran i eksterni linearni naponski regulator koji služi kao referentni napon od 2.5 V za A/D konvertor. Razlog njegove implementacije leži u njegovoj preciznosti od ± 0.02 % u odnosu na preciznost od ± 0.12 % internog naponskog regulatora unutar AD4111 čipa.

Sprovođenjem testa performansi koji je zasnovan na proračunu ENOB-a A/D konvertora mjerenjem šuma na kratko-spojenim i uzemljenim ulazima na osnovu 1000 uzoraka i pri svim brzinama odabiranja, dolazi se do zaključka da je ENOB dat od strane proizvođača veći u opsegu

0 % do 6.45 % u odnosu na efektivan broj bitova sistema razvijenog u ovom master radu. S druge strane, kod strujnih ulaza se može zaključiti da je ENOB dat od strane proizvođača veći u opsegu 0.44 % do 4.73 % u odnosu na efektivan broj bitova razvijenog sistema.

Implementacija eksternog naponskog regulatora, koji služi kao zamjena internom naponskom regulatoru, donijela je određena poboljšanja u pogledu smanjivanja šuma na naponskom i strujnom ulazu, odnosno u pogledu povećanja efektivnog broja bitova. Naime, na naponskom ulazu se ostvaruje povećanje ENOB-a u opsegu od 0 % do 2.34 % upotrebom eksternog naponskog regulatora u odnosu na interni, dok se na strujnom ulazu to povećanje ogleda u opsegu od 0 % do 1.57 %.

Implementacija ovog sistema u mrežu "IoT" je postignuta bežičnim slanjem izmjerenih vrijednosti MQTT protokolom putem Interneta bazi podataka koja je optimizovana za čuvanje vremenski zavisnih podataka. Time je omogućeno softveru za vizualizaciju da koristi sačuvane podatke iz baze podataka i prikaže ih korisniku na najpogodniji način. Višekanalnom akvizicijom podataka sa Belimo senzorskog modula koji u sebi ima integrisane senzore za temperaturu, vlažnost vazduha i koncentraciju CO₂ gasa je u sobnim uslovima demonstriran rad čitavog sistema, gdje je prikazana mogućnost pregleda istorijskih vrijednosti tih podataka, kao i očitavanje njihove trenutne vrijednosti u realnom vremenu. U ovom radu su se razvijeni sistem i softver za vizualizaciju koristili i za određivanje preciznosti LMT87LPGM temperaturnog senzora višekanalnim mjerenjem tri takva senzora u sobnim uslovima.

Razvijeni sistem predložen u ovom master radu predstavlja rješenje široke primjene koje je kompatibilno sa velikim brojem analognih senzora, a čije konfigurisanje može brzo i efikasno obaviti korisnik koji ne posjeduje ranije znanje o programiranju. Mali šum pri radu osigurava precizna mjerenja, dok mu niska potrošnja električne energije pruža mogućnost napajanja baterijom. Dalja istraživanja i poboljšanja se mogu baviti problematikom razvoja aplikacije za pametne uređaje koja bi omogućila još brži pristup i konfiguraciju predloženog sistema, kao i problematikom mogućeg gubitka veze sa lokalnom Wi-Fi mrežom.

LITERATURA

- [1] M. Haizad, R. Ibrahim, A. Adnan, T. D. Chung, i S. M. Hassan, "Development of low-cost real-time data acquisition system for process automation and control", u 2016 2nd IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation (ROMA), Ipoh, Malaysia: IEEE, ruj. 2016, str. 1–5. doi: 10.1109/ROMA.2016.7847826.
- [2] G. Annino i sur., "A DAQ System Suited for Olympic Sprint Canoeing Performances Monitoring", u 2023 IEEE International Workshop on Sport, Technology and Research (STAR), Cavalese - Trento, Italy: IEEE, ruj. 2023, str. 81–84. doi: 10.1109/STAR58331.2023.10302443.
- [3] S. Lakshmanachari, C. Srihari, S. Ajmera, i P. Nalajala, "Design and implementation of cloud based patient health care monitoring systems using IoT", u 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS), Chennai, India: IEEE, kol. 2017, str. 3713–3717. doi: 10.1109/ICECDS.2017.8390157.
- [4] J. K. Francis, "Cloud-based multi-sensor remote data aquisition system for precision agriculture (CSR-DAQ)", Master thesis, Iowa State University, Ames, Iowa, 2019.
- [5] M. K. Priyanka, A. A. Chowdhury, B. Mahmud, S. J. Chowdhury, i A. Azad, "Real-time monitoring of Solar Battery Charging Station", u 2016 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication (ICCPEIC), Melmaruvathur, Chennai, India: IEEE, tra. 2016, str. 311–316. doi: 10.1109/ICCPEIC.2016.7557249.
- [6] S. Sinha, "State of IoT 2024: Number of connected IoT devices growing 13% to 18.8 billion globally". [Na internetu]. Dostupno na: https://iot-analytics.com/number-connectediot-devices/
- [7] A. Riahi, Y. Challal, E. Natalizio, Z. Chtourou, i A. Bouabdallah, "A Systemic Approach for IoT Security", u 2013 IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems, Cambridge, MA, USA: IEEE, svi. 2013, str. 351–355. doi: 10.1109/DCOSS.2013.78.
- [8] B. L. Risteska Stojkoska i K. V. Trivodaliev, "A review of Internet of Things for smart home: Challenges and solutions", J. Clean. Prod., sv. 140, str. 1454–1464, sij. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.006.
- [9] N. Ahmad, "Internet of Things Tapping into Security and Privacy issues associated with internet of things", Master thesis, Linaeus University, Sweden, 2024.
- [10] B. Glover i H. Bhatt, *RFID Essentials*, 1st edition. Erscheinungsort nicht ermittelbar: O'Reilly Media, Inc, 2006.
- [11] V. Suryawanshi i M. Khandekar, "Design and Development of Wireless Sensor Network (WSN) for Water Quality Monitoring Using Zigbee", u 2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), Madurai, India: IEEE, lip. 2018, str. 862–865. doi: 10.1109/ICCONS.2018.8663131.
- [12] M. Navarro, "Arduino based acquisition system for control applications", Master thesis, Universistat politecnica de Catalunya, 2012.
- [13] M. George, Akash J B, A. Hussain, i S. P. Sreelal, "A compact multichannel data acquisition and processing system for IoT applications", u 2015 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), Kochi, India: IEEE, kol. 2015, str. 1263–1267. doi: 10.1109/ICACCI.2015.7275786.

- [14] G. L. Rajora, "Development of a Wireless Sensor Network for agricultural monitoring for internet of things (IoT)", Master thesis, Universitat politecnica de Catalunya, Barcelona, Spain, 2020.
- [15] V. Gupta, M. Sharma, R. K. Pachauri, i K. N. D. Babu, "A Low-Cost Real-Time IOT Enabled Data Acquisition System for Monitoring of PV System", *Energy Sources Part Recovery Util. Environ. Eff.*, sv. 43, izd. 20, str. 2529–2543, lis. 2021, doi: 10.1080/15567036.2020.1844351.
- [16] L. G. Villar, "Design project of a low-cost data acquisition system for electromechanical testing of smart materials", Master thesis, Universitat politecnica de Catalunya, Barcelona, Spain, 2023.
- [17] Texas Instruments, "Principles of Data Acquisition and Conversion", Application report SBAA051A, 2015.
- [18] D. Ingenieur Eugenio Di Gioia, "An 11-bit, 12.5-MHz, Low-Power, Low-Voltage, Continuous-Time Sigma-Delta Modulator in 0.13 μm CMOS", Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik an der Technischen Universität Berlin, Berlin, 2011.
- [19] R. A. Belcher, "ADC Standard IEC 60748-4-3: Precision Measurement of Alternative ENOB Without a Sine Wave", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, sv. 64, izd. 12, str. 3183–3200, pros. 2015, doi: 10.1109/TIM.2015.2450296.
- [20] H. Inose, Y. Yasuda, i J. Murakami, "A Telemetering System by Code Modulation Δ-ΣModulation", *IRE Trans. Space Electron. Telem.*, sv. SET-8, izd. 3, str. 204–209, ruj. 1962, doi: 10.1109/IRET-SET.1962.5008839.
- [21] S. Park, *Principles od Sigma-Delta Modulation for Analog-to-Digital Converters*. Motorola.
- [22] J. Candy, "Decimation for Sigma Delta Modulation", *IEEE Trans. Commun.*, sv. 34, izd. 1, str. 72–76, 1986, doi: 10.1109/TCOM.1986.1096432.
- [23] S. R. Norsworthy, R. Schreier, G. C. Temes, i IEEE Circuit & Systems Society, Ur., *Delta-Sigma data converters: theory, design, and simulation*. New York: IEEE Press, 1997.
- [24] R. Schreier i G. C. Temes, *Understanding delta-sigma data converters*. Piscataway, NJ : Hoboken, N.J.; Chichester: IEEE Press; Wiley, 2005.
- [25] Maxim integrated, "Understanding SAR ADCs: Their Arhitecture and Comparison with other ADCs". Analog Devices, 02. listopad 2001. [Na internetu]. Dostupno na: https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/Understanding-SAR-ADCs-Architecture-Comparison.pdf
- [26] Maxim integrated, "Understanding Pipelined ADCs". Analog Devices, 02. listopad 2001. [Na internetu]. Dostupno na: https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN1023.pdf
- [27] Maxim integrated, "Understanding Flash ADCs". Analog Devices, 16. rujan 2010. [Na internetu]. Dostupno na: https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN810.pdf
- [28] Hi. R. Pashine i J. Murthy, "12 Bit, 80 MHz, 230 mW Pipeline ADC using 3 Bit Flash ADC", *Int. J. Sci. Res.*, sv. 4, izd. 4, str. 4, tra. 2015.
- [29] Analog Devices, "AD4111 datasheet". 2021. [Na internetu]. Dostupno na: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad4111.pdf
- [30] Nettigo Odkryj tajniki elektroniki, "Wemos D1 mini V2 WiFi module", Wemos D1 mini V2 WiFi module.
- [31] Last Minute Engineers, "ESP8266 D1 mini pinout diagram", WeMos D1 Mini Pinout Reference. [Na internetu]. Dostupno na: https://lastminuteengineers.com/wemos-d1-minipinout-reference/

- [32] P. Tapashetti, A. Gupta, C. Mithlesh, i A. S. Umes, "Design and SImulation of Op Amp Integrator and Its Applications", *IJEAT*, sv. 1, izd. 3, str. 8, velj. 2012.
- [33] H. Kumar, A. Kumar, i A. Islam, "Comparative analysis of D flip-flops in terms of delay and its variability", u 2015 4th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (ICRITO) (Trends and Future Directions), Noida, India: IEEE, ruj. 2015, str. 1–6. doi: 10.1109/ICRITO.2015.7359339.
- [34] Analog Devices, "AD711 datasheet". Analog Devices, 2002. [Na internetu]. Dostupno na: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD711.pdf
- [35] Texas Instruments, "AN-20 An Application Guide for Op Amps". Texas Instruments, 2013. [Na internetu]. Dostupno na: https://www.ti.com/lit/an/snoa621c/snoa621c.pdf
- [36] J. M. Fiore, *Operational amplifiers and linear integrated circuits: theory and applications*, Version 3.2.6, 07 May 2021. Utica: James M. Fiore, 07.
- [37] Analog Devices, "OP113 datasheet". Analog Devices, 2007. [Na internetu]. Dostupno na: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/OP113_213_413.pdf
- [38] Analog Devices, "AD8541 datasheet". Analog Devices, 2024. [Na internetu]. Dostupno na: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad8541_8542_8544.pdf
- [39] E. Ogier, "Delta Sigma modulator". [Na internetu]. Dostupno na: Eric Ogier (2024). Delta Sigma modulator (https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/56166-delta-sigma-modulator), MATLAB Central File Exchange. Retrieved October 12, 2024.
- [40] Analog Devices, "EVAL-AD4111SDZ User Guide". Analog Devices. [Na internetu]. Dostupno na: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/userguides/EVAL-AD4111SDZ-UG-1124.pdf
- [41] Amazing Microelectronic Corp., "The Most Important Parameter of TVS Vclamp (Clamping Voltage)", The Most Important Parameter of TVS - Vclamp (Clamping Voltage). [Na internetu]. Dostupno na: https://www.amazingic.com/en/application/article/The-Most-Important-Parameter-of-TVSVclamp-Clamping-Voltage
- [42] Littelfuse, Inc, "TVS Diodes Datasheet SMAJ Series". Littelfuse, Inc, 2022. [Na internetu]. Dostupno na: https://www.littelfuse.com/media?resourcetype=datasheets&itemid=b8a0edb7-864f-408faf88-92f4e5ac7919&filename=littelfuse-tvs-diode-smaj-datasheet
- [43] P. Dhaker, "Introduction to SPI Interface", Analog Dialogue, sv. 52–09, str. 5, ruj. 2018.
- [44] Analog Devices, "ADR4525ARZ datasheet". Analog Devices, 2023. [Na internetu]. Dostupno na: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/adr4520_4525_4530_4533_4540_4550.pdf
- [45] S. Kuusik, "AD7173 Arduino", AD7173 Arduino. [Na internetu]. Dostupno na: https://github.com/brain-duino/AD7173-Arduino/blob/master/AD7173.cpp
- [46] I. Perović, "Internet of Things i MQTT protokol". [Na internetu]. Dostupno na: https://developers-lab.me/internet-of-things-i-mqtt-protokol/
- [47] S. N. Z. Naqvi i S. Yfantidou, "Time Series Databases and InfluxDB", Semestral work, Universite libre de Bruxelles, 2017. [Na internetu]. Dostupno na: https://cs.ulb.ac.be/public/_media/teaching/influxdb_2017.pdf

- [48] DB-Engines, "DB-Engines Ranking of Time Series DBMS", DB-Engines Ranking of Time Series DBMS. [Na internetu]. Dostupno na: https://dbengines.com/en/ranking/time+series+dbms
- [49] M. Chakraborty, *Monitoring Cloud-Native Applications: Lead Agile Operations Confidently Using Open Source Software*. Berkeley, CA: Apress L. P, 2021.
- [50] Department of Computing and Informatics, Mazoon College, Muscat, Sultanate of Oman., M. Nasar, M. A. Kausar, i Department of Information Systems, University of Nizwa, Nizwa, Sultanate of Oman., "Suitability Of Influxdb Database For Iot Applications", *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.*, sv. 8, izd. 10, str. 1850–1857, kol. 2019, doi: 10.35940/ijitee.J9225.0881019.
- [51] Influxdata, "InfluxDB 1.x", InfluxDB 1.x. [Na internetu]. Dostupno na: https://www.influxdata.com/time-series-platform/