



UNIVERZITET U NIŠU
ELEKTRONSKI FAKULTET



Milan D. Stojanović

**RAZVOJ I PRIMENA AUTONOMNIH
SENZORA U STRUKTURAMA
PAMETNIH GRADOVA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Niš, 2025.



UNIVERZITET U NIŠU
ELEKTRONSKI FAKULTET



Milan D. Stojanović

RAZVOJ I PRIMENA AUTONOMNIH SENZORA U STRUKTURAMA PAMETNIH GRADOVA

DOKTORSKA DISERTACIJA

Tekst ove doktorske disertacije stavlja se na uvid javnosti,
u skladu sa članom 30., stav 8. Zakona o visokom obrazovanju
("Sl. glasnik RS", br. 76/2005, 100/2007 - autentično tumačenje, 97/2008, 44/2010,
93/2012, 89/2013 i 99/2014)

NAPOMENA O AUTORSKIM PRAVIMA:

Ovaj tekst smatra se rukopisom i samo se saopštava javnosti (član 7. Zakona o autorskim i srodnim pravima, "Sl. glasnik RS", br. 104/2009, 99/2011 i 119/2012).

Nijedan deo ove doktorske disertacije ne sme se koristiti ni u kakve svrhe,
osim za upoznavanje sa njenim sadržajem pre odbrane disertacije.

Niš, 2025.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING



Milan D. Stojanović

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF AUTONOMOUS SENSORS IN SMART CITY STRUCTURES

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2025.

Podaci o doktorskoj disertaciji

Mentor:	dr Ljubomir Vračar, vanredni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
Naslov:	Razvoj i primena autonomnih senzora u strukturama pametnih gradova
Rezime:	Neke od struktura pametnih gradova, čiji se rad zasniva na različitim autonomnim sensorima, su inteligentni transportni sistemi i sistemi za monitoring parametara životne sredine. Kvantitativna i kvalitativna detekcija vozila jedna je od osnovnih operacija inteligentnih transportnih sistema. U disertaciji je opisan proces projektovanja generatora magnetnog polja na dva različita načina kojim se vrši rekonstrukcija magnetnih potpisa vozila u cilju simulacije saobraćajnog toka i testiranja ispravnosti rada dektora vozila. Projektovanje parametara kalema kojim se vrši generisanje magnetnog polja izvršeno je analitički i numerički. Takođe, projektovan je i detektor vozila baziran na senzoru za merenje magnetnog polja, baziran na algoritmu automata konačnih stanja realizovanog korišćenjem mikrokontrolera. Drugi primer autonomnog senzora realizovan u disertaciji predstavlja senzorski čvor za monitoring kvaliteta vazduha. Pri tome je izvršena optimizacija potrošnje energije primenom TEEN protokola rutiranja i prikazan princip određivanja ST graničnih vrednosti. Realizovan je senzorski čvor za merenje temperature sa direktnom komunikacijom sa serverom implementacijom MQTT protokola. Autonomnost senzora ogleda se, pre svega, u samostalnom napajanju, u čijoj realizaciji superkondenzatori imaju značajnu ulogu. U disertaciji su prikazani ekperimentalni rezultati poređenja efikasnosti punjenja superkondenzatora na različite načine korišćenjem solarnih ćelija male snage. Pored autonomnog napajanja pojedinačnih čvorova, u okviru senzorske mreže je potrebno obezbediti odgovarajući nivo bezbednosti prilikom slanja podataka za šta se najčešće koriste enkripcioni algoritmi. Izvršeno je poređenje performansi između hardveske i softverske implementacije AES enkripcionog algoritma u okviru senzorskog čvora.
Naučna oblast:	Elektrotehničko i računarsko inženjerstvo
Naučna disciplina:	Mikroelektronika i mikrosistemi
Ključne reči:	Autonomni senzor, generator magnetnog polja, detekcija vozila, TEEN protokol, superkondenzator, AES enkripcioni algoritam
UDK:	629.056.6+(004.6:351.777)

CERIF
klasifikacija:

T171 Mikroelektronika

Tip licence
Kreativne
zajednice:

CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	PhD Ljubomir Vračar, Associate Professor, University of Niš, Faculty of Electronic Engineering
Title:	Development and application of autonomous sensors in smart city structures
Abstract:	Some of the structures of smart cities, whose operation is based on various autonomous sensors, are intelligent transport systems and systems for monitoring environmental parameters. Quantitative and qualitative detection of vehicles is one of the basic operations of intelligent transport systems. The dissertation describes the process of designing a magnetic field generator in two different ways, which reconstructs the vehicle's magnetic signature in order to simulate the traffic flow and test the correctness of the vehicle's detector. The design of the parameters of the coil used to generate the magnetic field is performed analytically and numerically. Also, a vehicle detector based on a sensor for measuring the magnetic field, based on a finite state automaton algorithm implemented using a microcontroller, was designed. Another example of an autonomous sensor implemented in the dissertation is a sensor node for air quality monitoring. At the same time, energy consumption was optimized using the TEEN routing protocol and the principle of determining ST limit values was presented. A sensor node for temperature measurement with direct communication with the server by implementing the MQTT protocol was realized. The autonomy of the sensor is reflected, first of all, in its independent power supply, in the implementation of which supercapacitors play a significant role. The dissertation presents the experimental results of comparing the efficiency of supercapacitor charging in different ways using low-power solar cells. In addition to the autonomous power supply of individual nodes, within the sensor network it is necessary to ensure an appropriate level of security when sending data, for which encryption algorithms are most often used. A performance comparison between the hardware and software implementation of the AES encryption algorithm within the sensor node was performed.
Scientific Field:	Electrical and Computer Engineering
Scientific Discipline:	Microelectronics and Microsystems
Key Words:	Autonomous sensor, magnetic field generator, vehicle detection, TEEN protocol, supercapacitor, AES encryption algorithm
UDC:	629.056.6+(004.6:351.777)

CERIF
Classification:

T171 Microelectronics

Creative
Commons
License Type:

CC BY-NC-ND

ZAHVALNICA

Neizmernu zahvalnost dugujem svom mentoru, prof. dr Ljubomiru Vračaru, na pruženom znanju, posvećenosti, savetima, idejama i pomoći tokom izrade ove disertacije i mog dosadašnjeg istraživačkog rada.

Zahvaljujem se prof. dr Zoranu Prijiću na ukazanom poverenju koje mi je pružio kao rukovodilac projekta, čime je omogućio da započnem svoj rad u okviru akademske zajednice.

Zahvaljujem se svim profesorima sa katedre za Mikroelektroniku Elektronskog fakulteta u Nišu na pruženom znanju i profesionalnom odnosu, a naročito mlađim članovima katedre na kolegijalnosti i podršci.

Zahvaljujem se Iliji Neden Dimitriju, iz JP “Putevi Srbije”, na omogućenoj opremi i uspešnoj saradnji iz koje su proizašli neki od rezultata prikazani u disertaciji.

Zahvaljujem se prof. dr Dragani Živaljevim i doc. dr Dejanu Jovanoviću sa katedre za Teorijsku elektrotehniku Elektronskog fakulteta u Nišu, na izdvojenom vremenu i pomoći pri izradi disertacije.

Naročito se zahvaljujem svom bratu Marku, majci Marini i ocu Draganu, na podršci i pomoći koja mi je bila neophodna tokom studija, naročito na samom početku.

Posebnu zahvalnost dugujem svojoj verenici Anđeli, na strpljenju, razumevanju, безусловnoj podršci i svakodnevnoj motivaciji, čime je neizmerno doprinela mom dosadašnjem radu i usavršavanju.

Milan Stojanović

Sadržaj

Spisak slika	xiii
Spisak tabela	xxi
1 Uvod	1
1.1 Predmet istraživanja, metodologija i struktura disertacije	2
2 Pametan grad	5
2.1 Definicija pametnog grada	6
2.2 Struktura Pametnog grada	8
2.2.1 Inteligentni transportni sistemi	8
2.2.2 Sistemi za monitoring parametara životne sredine	10
2.2.3 Sistemi za monitoring potrošnje energije	11
2.2.4 Sistemi pametnih kuća/zgrada	12
2.2.5 Sistemi pametne industrije	12
2.2.6 Ostali sistemi u strukturi pametnog grada	13
2.3 Pametni gradovi u svetu	14
2.4 Ograničenja pri realizaciji pojedinačnih sistema pametnih gradova	16
3 Projektovanje i razvoj generatora magnetnih potpisa	18
3.1 Snimanje magnetnih potpisa vozila	19
3.2 Generisanje magnetnih potpisa korišćenjem signal generatora i kalema	24
3.2.1 Izračunavanje geometrijskih parametara kalema	25
3.2.2 Konfigurisanje signal generatora	33
3.2.3 Generator magnetnog polja realizovan korišćenjem signal generatora i rekonstrukcija magnetnih potpisa	35
3.3 Generisanje magnetnih potpisa korišćenjem mikrokontrolera i kalema	37
3.3.1 Generisanje PWM signala mikrokontrolerom	40
3.3.2 Izračunavanje kapacitivnosti filtarskih kondenzatora i dizajn štampane ploče	45

3.3.3	Generator magnetnog polja realizovan korišćenjem mikrokontrolera i rekonstrukcija magnetnih potpisa	55
4	Detekcija vozila analizom magnetnih potpisa	61
4.1	Detektor vozila zasnovan na senzoru za merenje jačine magnetnog polja . . .	63
4.1.1	Algoritam detekcije baziran na automatu konačnih stanja	65
4.1.1.1	Vremenski interval t_{21}	69
4.1.1.2	Vremenski interval t_{23}	71
4.1.1.3	Vremenski interval t_{31}	72
4.1.1.4	Vremenski interval t_{34}	74
4.1.2	Rezultati detekcije vozila	75
5	Sistemi za monitoring parametara životne sredine	79
5.1	Senzorski čvor za monitoring parametara kvaliteta vazduha	80
5.1.1	Senzori za merenje kvaliteta vazduha	82
5.1.2	Prenos podataka upotrebom LoRa radio modula	86
5.1.3	Rezultati merenja kvaliteta vazduha	89
5.1.4	Primena protokola rutiranja u cilju uštede energije	92
5.1.4.1	TEEN protokol	92
5.1.4.2	Određivanje ST vrednosti u okviru TEEN protokola	93
5.1.4.3	Ušteda energije pri implementaciji TEEN protokola	96
5.2	Senzorski čvor za merenje temperature sa direktnom komunikacijom sa serverom	100
5.2.1	Arhitektura senzorskog čvora	100
5.2.2	MQTT protokol	102
5.2.2.1	Organizacija podataka u MQTT protokolu	103
5.2.2.2	Implementacija MQTT protokola i rezultati merenja	105
6	Primena superkondenzatora u okviru napajanja autonomnih senzora	107
6.1	Napajanje autonomnih senzora korišćenjem solarnih ćelija	108
6.2	Električna kola za punjenje superkondenzatora iz solarnih ćelija	110
6.3	Izmerene vrednosti vremena punjenja superkondenzatora	112
7	Zaštita podataka u autonomnim sensorima	118
7.1	Metode zaštite podataka - pregled literature	119
7.2	AES enkripcioni algoritam	125
7.3	Implementacija AES enkripcionog algoritma	129
7.3.1	Hardverska implementacija	129

7.3.2	Softverska implementacija	130
7.3.3	Eksperimentalno određivanje performansi enkripcionog algoritma . .	130
7.4	Analiza performansi hardverske i softverske implementacije AES algoritma .	132
8	Zaključak	137
Dodaci		
A	Izračunavanje magnetnog polja višeslojnog cilindričnog kalema	139
B	Određivanje struje kalema korišćenjem diferencijalnih jednačina	146
C	Određivanje struje kalema metodom superpozicije	148
	Literatura	154
	Biografija autora	170

Spisak slika

Slika 1:	Struktura pametnog grada.	8
Slika 2:	Emisija CO ₂ u svetu i Srbiji po sektorima, prema podacima Međunarodne agencije za energiju (<i>International Energy Agency</i> - IEA) [8].	9
Slika 3:	Prikaz koncepta dela infrastrukture inteligentnog trasportnog sistema [14].	10
Slika 4:	Primena senzora u sistemu pametne rasvete [20].	11
Slika 5:	Šematski prikaz sistema pametne industrije [25].	13
Slika 6:	Blok šema sistema za merenje magnetnog polja i akviziciju podataka.	19
Slika 7:	Električna šema i štampana ploča sa senzorom za merenje magnetnog polja.	20
Slika 8:	Električna šema sistema za merenje magnetnog polja.	21
Slika 9:	Praktična realizacija sistema za merenje magnetnog polja.	21
Slika 10:	Merenje magnetnog polja pri prolasku vozila i lokacija na kojoj su merenja vrešena.	23
Slika 11:	Promene magnetnog polja pri prolasku vozila iznad senzora.	23
Slika 12:	Snimljeni magnetni potpisi vozila.	24
Slika 13:	Blok šema generatora magnetnog polja sastavljenog od signal generatora i kalema, i sistema za merenje generisanog magnetnog polja.	25
Slika 14:	Struktura višeslojnog cilindričnog kalema.	26

Slika 15: Projektovanje kalema u softveru COMSOL i prikaz raspodele magnetnog polja.	28
Slika 16: Magnetno polje na aksijalnoj osi višeslojnog cilindričnog kalema formiranog od 1000 namotaja.	29
Slika 17: Raspodela magnetnog polja na aksijalnoj osi višeslojnih cilindričnih kalemova sa različitim brojem namotaja.	29
Slika 18: Izračunata vrednost magnetnog polja na delu aksijalne ose višeslojnih cilindričnih kalemova sa različitim brojem namotaja.	30
Slika 19: Držać kalema i senzora za merenje magnetnog polja.	30
Slika 20: Izmerena vrednost magnetnog polja na delu aksijalne ose višeslojnih cilindričnih kalemova sa različitim brojem namotaja.	31
Slika 21: Izračunate i izmerene vrednosti spoljašnjeg poluprečnika kalemova sa različitim brojem namotaja.	32
Slika 22: Magnetno polje generisano kalemom od 800 namotaja, na rastojanju $z = 11$ mm od centra kalema ($V = 5$ V, $I = 20,05$ mA).	34
Slika 23: Snimljeni i rekonstruisani magnetni potpisi vozila <i>VW Polo9N</i> pri različitim vrednostima koeficijenta k_1	35
Slika 24: Realizacija generatora magnetnog polja korišćenjem signal generatora i kalema.	35
Slika 25: Snimljeni i rekonstruisani magnetni potpisi vozila. Rekonstrukcija je izvršena korišćenjem generatora magnetnog polja baziranog na signal generatoru.	36
Slika 26: Blok šema generatora magnetnog polja sastavljenog od mikrokontrolera i kalema.	38
Slika 27: Električno kolo prekidača kojim se vrši kontrola proticanja struje kroz kalem.	39
Slika 28: Promena magnetude magnetnog polja pri prolasku vozila <i>VW Polo9N</i>	41
Slika 29: Struja sinusnog oblika generisana PWM signalom promenljivog faktora ispunje korišćenjem mikrokontrolera.	43

Slika 30: Električna šema generatora magnetnog polja.	46
Slika 31: Rezultati simulacija struje kalema u zavisnosti od kapacitivnosti kondenzatora u softveru <i>Mathematica</i>	50
Slika 32: Tačke kojima se definišu frekvencija i faktor ispune PWM signala PWL generatora u softveru <i>LTspice</i>	51
Slika 33: PWM signali generisani u softveru <i>LTspice</i> kojima se pobuđuje kalem kako bi se rekonstruisao magnetni potpis vozila <i>VW Polo9N</i>	52
Slika 34: Rezultati simulacija struje kalema u zavisnosti od kapacitivnosti kondenzatora u softveru <i>LTspice</i>	53
Slika 35: Električna šema kola za povezivanje kondenzatora u kolo generatora. Radi preglednosti, sa slike su izostavljena četiri releja i četiri kondenzatora.	54
Slika 36: <i>Layout</i> i finalni izgled štampane ploče sa kondenzatorima koji se povezuju na krajeve kalema u kolu generatora magnetnog polja.	55
Slika 37: Realizacija generatora magnetnog polja korišćenjem mikrokontrolera i kalema.	55
Slika 38: Zavisnost induktivnosti kalema napravljenog od 3000 namotaja od frekvencije.	56
Slika 39: Snimljeni magnetni potpisi vozila <i>VW Polo9N</i> pri kretanju različitim brzinama.	56
Slika 40: Snimljeni i rekonstruisani magnetni potpisi vozila <i>VW Polo9N</i> upotrebom generatora magnetnog polja baziranog na mikokontroleru.	57
Slika 41: Snimljeni i rekonstruisani magnetni potpisi vozila <i>Peugeot307</i> upotrebom generatora magnetnog polja baziranog na mikokontroleru.	57
Slika 42: Snimljeni i rekonstruisani magnetni potpisi vozila <i>Fiat Grande Punto</i> upotrebom generatora magnetnog polja baziranog na mikokontroleru.	58
Slika 43: Snimljeni i rekonstruisani magnetni potpisi vozila <i>KIA Stonic</i> upotrebom generatora magnetnog polja baziranog na mikokontroleru.	58
Slika 44: Rekonstrukcija magnetnih potpisa vozila u cilju simulacije realnog saobraćaja.	60

Slika 45: Izobličenja magnetnog polja planete Zemlje pod uticajem vozila.	63
Slika 46: Magnetni potpis vozila <i>VW Polo9N</i> , osnovna vrednost magnetnog polja, gornja i donja granična vrednost magnetnog polja.	65
Slika 47: Blok šema algoritma detekcije vozila.	66
Slika 48: Magnetni potpis vozila <i>VW Polo9N</i> sa označenim promenama stanja FSM -a i obeleženim karakterističnim vremenskim intervalima.	67
Slika 49: Promena magnetnog polja u prisustvu feromagnetnog materijala u oblasti osetljivosti senzora i promene stanja FSM-a.	68
Slika 50: Dijagram promena stanja konačnog automata sa označenim uslovima pri kojima dolazi do promene stanja.	69
Slika 51: Promene stanja konačnog automata usled kratkotrajne promene magnetnog polja i prolaska vozila.	70
Slika 52: Promene stanja konačnog automata usled dve uzastopne kratkotrajne promene magnetnog polja.	70
Slika 53: Određivanje vrednosti vremenskog intervala t_{23} u odnosu na t_{23min} , i njegov uticaj na promene stanja konačnog automata.	71
Slika 54: Određivanje vrednosti vremenskog intervala t_{23} u odnosu na t_{23max} , i njegov uticaj na promene stanja konačnog automata.	72
Slika 55: Snimljeni magnetni potpis vozila <i>VW Polo9N</i> sa označenim amplitudama.	72
Slika 56: Određivanje vrednosti vremenskog intervala t_{31} u odnosu na t_{31min} , i njegov uticaj na promene stanja konačnog automata.	73
Slika 57: Određivanje vrednosti vremenskog intervala t_{31} u odnosu na t_{31max} , i njegov uticaj na promene stanja konačnog automata.	74
Slika 58: Određivanje vrednosti vremenskog intervala t_{34} u odnosu na t_{34min} , i njegov uticaj na promene stanja konačnog automata.	74

Slika 59: Magnetni potpis vozila <i>VW Polo9N</i> i promene stanja konačnog automata u zavisnosti od granične vrednosti B_{th}	75
Slika 60: Uspešnost detekcije vozila u zavisnosti od brzine kretanja.....	76
Slika 61: Različite topologije bežičnih senzorskih mreža.....	81
Slika 62: Blok šema sistema za merenje kvaliteta vazduha.....	82
Slika 63: Električna šema i štampana ploča sa senzorom HIH6130.....	82
Slika 64: Električna šema i štampana ploča sa senzorom ICP 10100.....	83
Slika 65: Struktura elektrohemijskog senzora sa dve (levo) i tri (desno) elektrode.....	83
Slika 66: Unutrašnja struktura integrisanog kola LMP91000.....	84
Slika 67: Električna šema i štampana ploča sa senzorima 3SP CO 1000 i 3SP NO ₂ 20.....	85
Slika 68: Električna šema i štampana ploča RN2483 LoRa modula.....	87
Slika 69: Pojednostavljena električna šema sistema za monitoring kvaliteta vazduha.....	88
Slika 70: Algoritam rada sistema za monitoring kvaliteta vazduha.....	89
Slika 71: Praktična realizacija sistema za monitoring kvaliteta vazduha i lokacija na kojoj su merenja vršena.....	90
Slika 72: Rezultati merenja temperature, relativne vlažnosti vazduha i vazdušnog pritiska.....	90
Slika 73: Rezultati merenja CO i NO ₂	91
Slika 74: Rezultati merenja temperature bez primene protokola rutiranja.....	94
Slika 75: Vrednosti merenja temperature na strani prijemnika bez primene protokola rutiranja i sa primenom TEEN protokola (ST vrednost određena je na osnovu razlike između poslednje izmerene i poslednje poslate vrednosti).....	95

Slika 76: Vrednosti merenja temperature na strani prijemnika bez primene protokola rutiranja i sa primenom TEEN protokola (ST vrednost određena je na osnovu brzine promene merene vrednosti).	96
Slika 77: Broj poslatih paketa pri implementaciji TEEN protokola (ST vrednost određena na osnovu razlike između poslednje izmerene i poslednje poslate vrednosti).	97
Slika 78: Ušteda energije pri implementaciji TEEN protokola (ST vrednost određena na osnovu razlike između poslednje izmerene i poslednje poslate vrednosti).	97
Slika 79: RMSE i Pirsonov koeficijent korelacije između rekonstruisanih i originalnih podataka u zavisnosti od ST vrednosti određenoj na osnovu razlike između poslednje izmerene i poslednje poslate vrednosti.	98
Slika 80: Broj poslatih paketa pri implementaciji TEEN protokola u zavisnosti od ST vrednosti određenoj na osnovu brzine promene merene vrednosti.	98
Slika 81: Ušteda energije pri implementaciji TEEN protokola u zavisnosti od ST vrednosti na osnovu brzine promene merene vrednosti.	99
Slika 82: RMSE i Pirsonov koeficijent korelacije između rekonstruisanih i originalnih podataka u zavisnosti od ST vrednosti određenoj na osnovu brzine promene merene vrednosti.	99
Slika 83: Blok šema senzorskog čvora za merenje temperature koji ima mogućnost komunikacije sa serverom.	101
Slika 84: Pojednostavljena električna šema senzorskog čvora za merenje temperaure koji ima mogućnost komunikacije sa serverom.	101
Slika 85: Arhitektura i primer entiteta u MQTT protokolu.	102
Slika 86: Struktura MQTT paketa kojim uređaj uspostavlja konekciju sa brokerom.	103
Slika 87: Strukture MQTT paketa kojim se podaci šalju brokeru (<i>Publish</i>) i preuzimaju sa brokera (<i>Subscribe</i>).	104
Slika 88: Senzorski čvor za merenje temperature i slanje podataka na server korišćenjem MQTT protokola.	105
Slika 89: Rezultati merenja temperature realizovanim senzorskim čvorom i njegova lokacija tokom merenja.	105

Slika 90:	Izgled solarne ćelije IXYS 17-04x3.	109
Slika 91:	Električno kolo za punjenje seprkondenzatora iz redno povezanih solarnih ćelija.	110
Slika 92:	Električna kola za punjenje seprkondenzatora iz paralelno povezanih solarnih ćelija.	111
Slika 93:	Električna šema kola naponskog regulatora MCP1640.	111
Slika 94:	Eksperimentalna postavka za merenje vremena punjenja superkondenzatora.	112
Slika 95:	Vreme punjenja superkondenzatora iz redno povezanih solarnih ćelija.	113
Slika 96:	Vreme punjenja superkondenzatora iz paralelno povezanih solarnih ćelija pri izlaznom naponu regulatora od 3,3 V.	113
Slika 97:	Napon na SV kontaktu regulatora MCP1640 pri aktivnom režimu rada.	114
Slika 98:	Vreme punjenja superkondenzatora iz paralelno povezanih solarnih ćelija pri izlaznom naponu regulatora od 5 V.	115
Slika 99:	Napon na SV kontaktu regulatora MCP1640 pri neaktivnom režimu rada.	115
Slika 100:	Vreme punjenja superkondenzatora pri osvetljenosti od 3 klux.	116
Slika 101:	Vreme punjenja superkondenzatora pri osvetljenosti od 4 klux.	116
Slika 102:	Vreme punjenja superkondenzatora pri osvetljenosti od 5 klux.	117
Slika 103:	AES - strukturni algoritam.	126
Slika 104:	AES - operacija <i>Add Round Key</i>	126
Slika 105:	AES - operacija <i>Sub Bytes</i>	127
Slika 106:	AES - operacija <i>Shift Rows</i>	127
Slika 107:	AES - operacija <i>Mix Columns</i>	128

Slika 108: AES - operacija <i>Key Schedule</i>	128
Slika 109: Električna šema povezivanja integrisanog kola ATECC608A sa mikrokontrolerom pri hardverskoj implementaciji AES enkripcionog algoritma.	129
Slika 110: Komunikacija između mikrokontrolera i ATECC608A pri procesu enkripcije.	130
Slika 111: Električna šema kola za merenje struje - DUT (<i>Device Under Test</i> potrošač kroz koji se meri jačina struje. Pri hardverskoj impementaciji enkripcije to je električno kolo prikazano na slici 109, a pri softverskoj implementaciji mikrokontroler).	131
Slika 112: Talasni oblik struje kroz autonomni senzor tokom enkripcije podataka pri hardverskoj implementaciji AES algoritma.	133
Slika 113: Talasni oblik struje kroz autonomni senzor tokom enkripcije podataka pri softverskoj implementaciji AES algoritma.	133
Slika 114: Vreme izvršavanja u zavisnosti od radne frekvencije pri hardverskoj i softverskoj implementaciji AES algoritma.	134
Slika 115: Potrošnja energije u zavisnosti od radne frekvencije pri hardverskoj i softverskoj imple- mentaciji AES algoritma.	135
Slika 116: Električna šema generatora negativnih promena magnetnog polja.	149
Slika 117: Električna šema generatora pozitivnih promena magnetnog polja.	150
Slika 118: Impuls perioda T predstavljen preko razlike Hevisajdovih funkcija.	151

Spisak tabela

Tabela 1: Karakteristike vozila za koja je izvršeno snimanje magnetnih potpisa.	22
Tabela 2: Rastojanje od centra kalema do tačke na aksijalnoj osi u kojoj je jačina magnetnog polja 100 μ T.	32
Tabela 3: Poređenje snimljenih i rokonstrisanih magnetnih potpisa različitih vozila. Rekonstrukcija je izvršena generatorom magnetnog polja (signal generator i kalem).	37
Tabela 4: Kapacitivnosti kondenzatora u zavisnosti od trajanja pobude kalema PWM signalom, tj. brzine kretanja vozila čiji magnetni potpis se simulira.	51
Tabela 5: Poređenje snimljenih i rokonstrisanih magnetnih potpisa različitih vozila - Pirsonov korelacioni koeficijent. Rekonstrukcija je izvršena generatorom magnetnog polja (mikrokontroler i kalem).	59
Tabela 6: Poređenje snimljenih i rokonstrisanih magnetnih potpisa različitih vozila - RMSE. Rekonstrukcija je izvršena generatorom magnetnog polja (mikrokontroler i kalem).	59
Tabela 7: Prednosti i nedostaci različitih metoda detekcije vozila.	61
Tabela 8: Promene stanja FSM-a i uslovi pri kojima dolazi do promena.	68
Tabela 9: Parametri FSM-a pri različitim vrednostima B_{th}	76
Tabela 10: Poređenje efikasnosti detekcije različitih algoritama.	77
Tabela 11: Karakteristike različitih metoda zaštite podataka, koje se koriste u autonomnim senzorima.	121
Tabela 12: S-Box tabela na osnovu koje se vrši operacija <i>Sub Bytes</i>	127

Tabela 13: Poređenje potrošnje energije pri enkripciji podataka upotrebom hardverski i softverski implementiranog AES algoritma	136
--	-----

Glava 1

Uvod

Senzori su elektronske komponente kojima se vrši detekcija određenog fizičkog parametra (temperatura, vlažnost vazduha, koncentracija gasova, itd.), merenje njegovog intenziteta kao i konverzija izmerene vrednosti u neku od električnih veličina (napon, struja, frekvencija). Prema vrsti električnog signala koji se dobija na njihovom izlazu senzori se mogu podeliti na analogne i digitalne. Analogni senzori se u sklopu električnih uređaja koriste zajedno sa analogno-digitalnim konvertorima, dok je pri implementaciji digitalnih senzora, koji se poslednjih godina intenzivnije razvijaju, neophodno koristiti specijalizovana integrisana kola. U većini slučajeva su to mikrokontroleri koji pored ugrađenog analogno-digitalnog konvertora imaju mogućnost razmene podataka preko različitih komunikacionih protokola (UART, I²C, SPI). Pored mogućnosti obrade signala dobijenih od analognih i digitalnih senzora, sa mikrokontrolerom se mogu povezati različiti moduli za bežični prenos podataka. Tokom godina postignut je značajan napredak u razvoju samih senzora i mikrokontrolera, prvenstveno po pitanju potrošnje električne energije. To je omogućilo da se za napajanje uređaja sastavljenih od ovih komponentata koriste baterije ili neki od metoda konverzije energije okoline u električnu (*Energy Harvesting*). Drugi bitan faktor u razvoju jeste unapređenje komunikacionih modula, ne samo u pogledu smanjenja potrošnje energije, već i po pitanju dometa komunikacije. Zahvaljući unapređenju ovih karakteristika uređaji za merenje i prenos podataka se mogu postaviti na različitim lokacijama, uključujući i one manje pristupačne u pogledu električne i komunikacione mreže. Spekter primena ovih uređaja je jako širok prvenstveno zato što mogu da rade potpuno autonomno, tj. bez potrebe za nadzorom od strane operatera i nezavisno od postojeće električne mreže. Upravo je autonomnost njihova glavna karakteristika i prednost u odnosu na neke složenije sisteme koji obavljaju istu funkciju, pa se zbog toga nazivaju autonomni senzori.

Dakle, termin autonomni senzor, koji se danas često upotrebljava kako u govoru tako i u literaturi, zapravo se ne odnosi na sam senzor kao zasebnu komponentu, već na uređaj koji samostalno obavlja procese merenja, obrade i slanja podataka. Autonomni senzor može da sadrži više senzora kojima se vrši merenje različitih fizičkih parametara. Instalacijom više

autonomnih senzora na različitim lokacijama dobija se mreža autonomnih senzora koja se naziva bežična senzorska mreža (*Wireless Sensor Network* - WSN), a autonomni senzori koji formiraju mrežu nazivaju se senzorski čvorovi. Implementacijom senzorske mreže omogućava se monitoring određenih parametara u posmatranoj oblasti. Senzorska mreža prikupljene podatke do korisnika prenosi preko radio modula ili interneta preko bazne stanice, tj. senzorskog čvora koji ima mogućnost pristupa internetu i prikuplja podatke sa ostalih čvorova. Na taj način se sama mreža integriše u složeniji sistem poznat pod nazivom internet stvari (*Internet of Things* - IoT). Senzorske mreže se koriste u različitim aplikacijama radi monitoringa različitih sistema i uslova okoline.

Struktura koji se intenzivno razvija, a čija se funkcionalnost zasniva na upotrebi bežičnih senzorskih mreža i samih autonomnih senzora, je pametan grad (*Smart City*). Pametan grad predstavlja urbano okruženje u kome su sistemi pružanja usluga kao i sistemi održavanja opremljeni autonomnim sensorima u cilju povećanja funkcionalnosti i efikasnijeg obavljanja svakodnevnih aktivnosti stanovnika. Iako je ovaj koncept uveliko zastupljen i implementiran u brojnim gradovima u svetu, i dalje se intenzivno radi na realizaciji novih i unapređenju postojećih sistema.

1.1 Predmet istraživanja, metodologija i struktura disertacije

Osnovni cilj istraživanja ove disertacije je prikazati mogućnost implementacije i značaj primene različitih autonomnih senzora u strukturama pametnih gradova. To uključuje: razvoj uređaja za detekciju vozila, čiji rad je zasnovan na primeni senzora za merenje magnetnog polja, i sastavni je deo inteligentnih transportnih sistema; primenu senzora za merenje temperature, vlažnosti vazduha i vazdušnog pritiska u uređajima za monitoring parametara životne sredine; uređaj za merenje zagađenosti vazduha baziran na elektro-hemijskim sensorima za merenje koncentracija ugljen-monoksida i azot-dioksida. Takođe, istraživanje obuhvata razvoj solarnog *Energy Harvesting* napajanja sa akcentom na primeni superkondenzatora, kao i implementaciju nekih od načina za prenos podataka i prikaz rezultata. Pored toga, jedan deo disertacije biće posvećen zaštiti podataka primenom enkripcije.

Ovi problemi su trenutno neki od najaktuelnijih u strukturama pametnih gradova, a u okviru disertacije su prikazane mogućnosti za njihovo rešavanje, bilo da je reč o razvoju novih ili unapređenju već postojećih sistema. Porast broja vozila koja učestvuju u saobraćaju dovodi do čestih gužvi i zastoja, a na osnovu broja detektovanih vozila može se vršiti preporučivanje alternativnih putnih pravaca, kontrola saobraćajne signalizacije ili omogućiti

vozačima brže pronalaženje slobodnih parking mesta. Monitoring parametara životne sredine jedan je od osnovnih karakteristika pametnih gradova, koji omogućava građanima realne podatke o kvalitetu okruženja u kome žive. Slanje prikupljenih podataka se može vršiti na različite načine, pri čemu treba voditi računa o potrošnji električne energije, kako bi sama struktura bila samoodrživa u toku što dužeg vremenskog intervala. Senzorskim čorovima se često vrši monitoring specifičnih parametara na mestima bez postojeće električne mreže, pa *Energy Harvesting* tehnologija može biti jedini način za napajanje autonomnih senzora. Bitan aspekt prenosa podataka je i njihova bezbednost, pa se zbog toga treba pronaći optimalan način za njihovu zaštitu.

Nakon uvoda, u drugoj glavi je dat kratak istorijski pregled razvoja pametnih gradova i prikazane neke od opšteprihvaćenih definicija pametnog grada. U okviru istog poglavlja će biti opisana struktura pametnog grada i neke od najznačajnijih sistema koji su njegovi sastavni delovi.

U trećoj glavi je prikazan primer upotrebe simulatora u razvoju autonomnih senzora kroz realizaciju generatora magnetnog polja kojim se mogu rekonstruisati magnetni potpisi vozila. Generator se može iskoristiti za testiranje rada realizovanog detektora u laboratorijskim uslovima, čime se omogućava ušteda ljudskih i materijalnih resursa prilikom razvoja detektora i otklanjanje eventualnih nedostataka u njegovom radu. Generisanje magnetnog polja u cilju rekonstrukcije magnetnih potpisa vozila vrši se višeslojnim kalemom formiranim namotavanjem provodnika oko kalemskog tela napravljenog korišćenjem 3D štampača. Određivanje geometrijskih parametara kalema izvršeno je korišćenjem analitičkih jednačina, simulacijama baziranim na metodu konačnih elemenata (*Finite Element Method* - FEM) u softveru COMSOL, kao i eksperimentalno dobijenih podataka izmerenih senzorom za merenje magnetnog polja. Induktivnost napravljenih kalemova merena je laboratorijskim uređajem LCR Meter - BK Precision 891. Pobuda kalema vrši se na dva načina. Prvi, signal generatorom RIGOL DG1022Z kojim se kreira naponski signal proizvoljnog talasnog oblika, i drugi u kome se kalem pobuđuje PWM (*Pulse Width Modulation*) signalom koji se kreira mikrokontrolerom, uz dodatne kondenzatore za filtriranje signala. Vrednosti kondenzatora izračunate su u softveru *Mathematica* korišćenjem Laplasove transformacije, i softverom za simulaciju analognih električnih kola *LTspice*. Magnetni potpisi vozila dobijeni su eksperimentalno. Glavne komponente sistema za merenje su senzor magnetnog polja i mikrokontroler. Merenje je izvršeno pri prolasku vozila preko sistema koji je bio postavljen na kolovoz.

U četvrtoj glavi je opisan sistem za detekciju vozila koji se može iskoristiti u inteligentnim transportnim sistemima. Hardverski deo sistema čine senzor za merenje magnetnog polja i mikrokontroler, dok je softverska komponenta sistema algoritam detekcije, koji vrši obradu izmerenih vrednosti i izvršava se u mikrokontroleru. Algoritam rada detektora vozila je

baziran na automatu konačnih stanja. Realizovani detektor predstavlja unapređenje već postojećih sistema u pogledu jednostavnosti algoritma detekcije.

Peta glava sadrži opis hardverske i softverske realizacije sistema za merenje parametara životne sredine (temperatura, relativna vlažnost vazduha i vazdušni pritisak) i koncentracije štetnih gasova u vazduhu (ugljen-monoksid i azot-dioksid). Realizovani sistem, posmatran kao deo bežične senzorske mreže, podatke prenosi korišćenjem LoRa (*Long Range*) radio veze. Pored razvoja softvera mikrokontrolera kojim se vrši merenje, prikazana su i softverska rešenja za optimizaciju potrošnje energije prilikom slanja podataka, implementacijom odgovarajućih protokola rutiranja. Pri tome je posebna pažnja posvećena načinu određivanja broja paketa koje autonomni senzor treba da pošalje kako bi se na strani prijelnika verodostojno rekonstruisale originalne vrednosti. Takođe, u ovoj glavi je prikazan i razvoj sistema za merenje temperature, pri čemu je akcenat na slanju podataka GSM (*Global System for Mobile Communication*) modulom i softverskoj implementaciji MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) protokola. To obuhvata implementaciju softvera kojim se podaci organizuju po pravilima MQTT protokola i šalju GSM modulom do servera, kao i prikaz podataka korišćenjem dostupnih servera.

Kao što je ranije spomenuto, drugo ograničenje koje se javlja kao posledica specifičnosti lokacije senzorskih čvorova je nemogućnost korišćenja postojećeg mrežnog napajanja. U šestoj glavi je prikazan princip konverzije solarne energije u električnu i njeno skladištenje unutar superkondenzatora korišćenjem elektronskih komponenata i kola specifične namene. Analiza efikasnosti punjenja superkondenzatora izvršena je na osnovu eksperimentalno dobijenih podataka koristeći diskretne elektronske komponente kao i realizovane laboratorijske prototipove.

Porast broja senzorskih čvorova poslednjih godina značajno raste, a još više količina podataka koja se razmenjuje između uređaja i korisnika. Kako je jedan od ključnih problema u ovakvim sistemima zaštita podataka, u sedmoj glavi disertacije prikazana je primena AES (*Advanced Encryption Standard*) enkripcionog algoritma u autonomnim senzorima. To obuhvata enkripciju podataka upotrebom integrisanog kola ATTEC608A, kao i implementaciju enkripcionog algoritma u okviru softvera mikrokontrolera. Pri tome je analizirano vreme izvršavanja enkripcionog algoritma kao i potrošnja električne energije neophodna za njegovo izvršavanje. Izračunavanje potrošnje energije izvršeno je analitički, na osnovu izmerenih vrednosti jačine struje koja protiče kroz sistem tokom izvršavanja enkripcionog algoritma.

Na kraju, u zaključku su sumirani najvažniji rezultati koji pokazuju ulogu prikazanih autonomnih senzora u strukturama pametnih gradova. Takođe, predloženi su i pravci daljih istraživanja.

Kako bi se izbeglo opterećivanje teksta tehničkim detaljima, delovi disertacije kojima su obuhvaćena kompleksnija izračunavanja su prikazani u Dodatku.

Glava 2

Pametani grad

Tokom svog istorijskog i egzistencijalnog razvoja, ljudska civilizacija je kreirala određene vrste naselja, koja su oduvek bila pokretač inovacija, razvoja i ekonomske, socijalne i kulturne evolucije. Vremenom su se iz kreiranih naselja razvijali gradovi različitog oblika i veličina. Njihova struktura bila je određena međusobnim uticajem između primarnih delatnosti i društvenih struktura, kao i različitim kulturnim nasleđem koju to društvo obrazuje [1].

Zahvaljujući kolektivno sinhronizovanim i produktivnim delatnostima gradovi su danas glavni pokretači rasta u okviru globalne ekonomije. Od početka industrijalizacije i tokom naredne faze koja obuhvata uvođenje električne energije, upotrebu računara i digitalizaciju, širenje internet mreže, kao i početak masovne primene automatizacije i veštačke inteligencije (*Artificial Intelligence*), gradovi progresivno postaju centralizovaniji i bitniji nego ranije. U 2016. god. 1,7 milijardi ljudi (oko 23 % svetske populacije) je živelo u gradovima sa preko milion stanovnika. Pretpostavlja se da će do 2030. god. ta vrednost biti 27 %, a do 2050. god. dve trećine svetskog stanovništva će živeti u urbanom okruženju.

Međutim, pored pozitivnog uticaja na razvoj, gradovi su takođe i najveći potrošači. Čak 75 % Zemljinih resursa se troši u gradovima. Posledica toga je 60-80 % ukupne emisije gasova, što ima negativan uticaj na neke od globalnih ciljeva održivosti. To bi mogli dovesti do niza problema za koje treba blagovremeno obezbediti efikasna rešenja. Na primer, kako olakšati putovanje miliona stanovnika, garantovati izdrživost infrastrukture, osigurati dovoljnu količinu hrane, efikasno upravljati njihovim otpadom, smanjiti uticaj na životnu sredinu i sve češće klimatske promene, itd.

Digitalna revolucija doprinela je brojnim promenama u urbanim oblastima koje su dovele do opipljivih rešenja za niz socijalnih, ekonomskih, političkih i ekoloških pitanja. Na društvenom polju postoji veliki napredak u postizanju jednakosti u pogledu stanovanja, pružanja usluga poput upravljanja otpadom, distribucije resursa poput vode, energije kao i pružanja zdravstvenih usluga. Ekonomski, digitalna revolucija je inspirisala brojne inovacije kao što su deljenje automobila, digitalne transakcije, inovacije u turističkoj industriji, očuvanje kulturnog nasleđa i umetnosti. Sa druge strane, ove revolucije su uticale na stvaranje novih

preduzeća što je dovelo do otvaranja novih radnih mesta i omogućilo lokalnim i nacionalnim samoupravama proširenje baze prihoda. Na ekološkom polju postoje brojne inicijative koje pomažu u očuvanju životne sredine. To su usvajanje alternativne energije, ozelenjavanje gradova, mogućnost praćenja i predviđanja vremenskih prilika u realnom vremenu. Ti pozitivni uticaji su se postepeno razvijali počevši od kocepta globalnog grada (*Global City*), preko održivog grada (*Sustainable City*), otpornog grada (*Resilient City*), do kreativnog grada (*Creative City*) i najnovijeg koncepta pametnog grada (*Smart City*), koji se smatra najnaprednijim od navedenih [2]. Pametan grad predstavlja koncept za razvoj urbanih naselja koji se poslednjih godina široko primenjuje u svetu. Ovaj koncept obuhvata različite aspekte i delatnosti društva u celini, a njegova funkcionalnost bazira se na razvoju nauke, tehnologije i inženjerstva.

Korak ispred pametnog grada je koncept autonomnog grada (*Autonomous City*), u kome bi različiti pametni uređaji i tehnologije ne samo prikupljani podatke, već bi imali sposobnost da na osnovu prikupljenih podataka donose odluke [3]. Međutim ovaj koncept nailazi na još veću prepreku u zakonodavstvu, jer bi to značilo omogućiti pametnim uređajima i sistemima da rešavaju probleme bez intervencije ljudi. Iako bi automatizacija gradova donela brojne prednosti poput povećanja efikasnosti, povećanja potencijala za pametne tehnologije, razvoj novih poslova i turizma, postoje i neki negativni faktori koje treba rešiti. Kao što je napomenuto treba propisati zakonske regulative u okviru kojih se takav koncept može ostvariti. Među glavnim dobitima automatizacije treba istaći smanjenje otpada, recikliranje otpadnih materijala i racionalno korišćenje resursa, što bi povoljno uticalo na životnu sredinu. Očekuje se da bi primena veštačke inteligencije omogućila postizanje takvih ciljeva i da će imati ključnu ulogu u automatizaciji gradova [4].

2.1 Definicija pametnog grada

Ne postoji jedinstvena definicija kojom se može objasniti pojam pametan grad. Jedan od razloga za to je različitost sistema od kojih se sastoji struktura pametnog grada, kao i različitost funkcija koje pruža. U literaturi se mogu pronaći brojne definicije, a neke formulisane od strane različitih institucija, su date u nastavku [5]:

Evropska komisija (*European Comission*): Pametan grad je mesto gde se tradicionalne mreže i usluge čine efikasnijim korišćenjem digitalnih i telekomunikacionih tehnologija za dobrobit njegovih stanovnika i poslovanja. To znači pametnije mreže gradskog saobraćaja, unapređeno vodosnabdevanje i postrojenja za odlaganje otpada, kao i efikasnije načine za osvetljenje i grejanje zgrada. To takođe znači interaktivniju i odgovorniju gradsku administraciju, bezbednije javne prostore i jednostavnije zadovoljavanje potreba stanovništva.

Institut za inženjere elektrotehnike i elektronike, zajednica pametnih gradova (*Institute of Electrical and Electronics Engineers Smart Cities Community*): Pametan grad obuhvata implementaciju napredne tehnologije i društvenu interakciju kroz odluke i regulative propisane od strane nadležnih institucija, kako bi se postiglo poboljšanje svakodnevnog života stanovnika. To obezbeđuje efikasniju mobilnost, produktivniju ekonomiju, unapređeno održivo okruženje, optimalnije korišćenje resursa, bolju kontrolu upravljanja otpadom, itd.

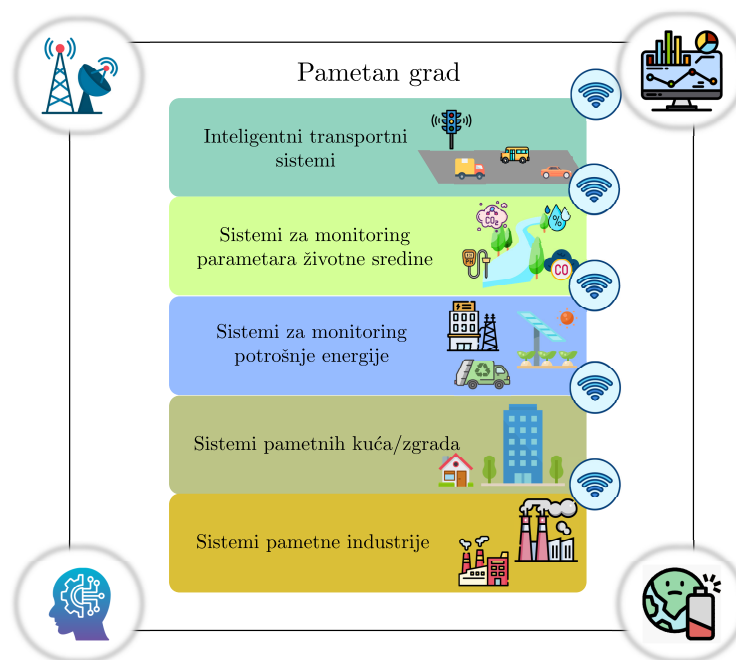
Asocijacija nacija jugoistočne Azije (*Association of Southeast Asian Nations - ASEAN*): Pametan grad koristi tehnološka i digitalna rešenja, kao i inovativna netehnološka sredstva za rešavanje urbanih izazova, kontinuirano poboljšavajući živote ljudi i stvarajući nove mogućnosti. Pametan grad je takođe ekvivalentan pametnom održivom gradu koji promoviše ekonomski i društveni razvoj uz zaštitu životne sredine kroz efikasne mehanizme za suočavanje sa trenutnim i budućim izazovima.

Japanski savez pametne zajednice (*Japan Smart Community Alliance*): U Japanu je izraz pametna zajednica rasprostranjeniji nego pametan grad. Pametna zajednica je zajednica u kojoj su različite tehnologije i napredni društveni sistemi efikasno integrisani i iskorišćeni. To prvenstveno obuhvata sisteme za efikasno korišćenje energije, sa akcentom na korišćenju toplote i drugih neiskorišćenih izvora energije, poboljšanje transportnih sistema i dr.

Konceptualizacija pametnog grada, dakle, varira od grada do grada i od države do države, u zavisnosti od nivoa razvoja, spremnosti za promene i reforme, resursa i težnji stanovnika grada. Uzevši u obzir navedene definicije može se reći da pametan grad predstavlja tehnološki naprednu urbanu sredinu u kojoj se korišćenjem različitih sistema, zasnovanih na elektronici, sensorima i informaciono-komunikacionim tehnologijama, postiže mogućnost rešavanja različitih problema kojima se olakšava život njegovih stanovnika, unapređuje životna sredina i servisi potrebni građanima [6, 7].

2.2 Struktura Pametnog grada

Struktura pametnog grada obuhvata nekoliko sistema koji obavljaju različite funkcije. Ovi sistemi se često primenjuju za rešavanje zajedničkih problema, tako da je teško uspostaviti jasnu granicu između njihovih uloga. U literaturi se mogu pronaći različito koncipirane strukture pametnog grada, a jedna od njih je prikazana na slici 1.



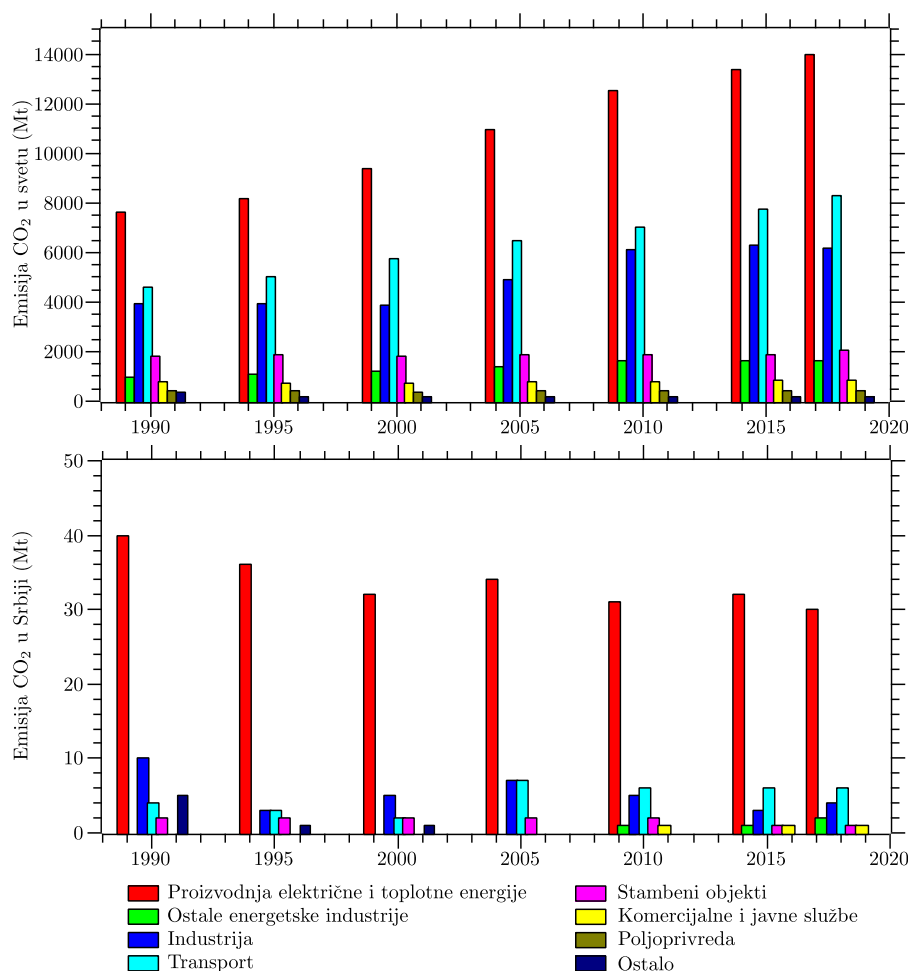
Slika 1: Struktura pametnog grada.

Sistemi imaju mogućnost međusobne komunikacije radi efikasnije analize i obrade podataka. Prikupljeni podaci se najčešće bežičnim putem prenose do zajedničkog centra za obradu ili servera kako bi bili dostupni građanima. U procesu obrade podataka koriste se različite metode među kojima je i, u poslednje vreme sve više zastupljena, veštačka inteligencija. Realizacija napajanja za određene delove sistema jedna od stvari koja može biti problem, jer se oni često mogu naći na mestima gde nije moguće iskoristiti postojeću mrežnu infrastrukturu.

2.2.1 Inteligentni transportni sistemi

Usled rasta broja stanovnika i uvećane potrebe za transportom, privatni automobili su postali dominantan način prevoza u velikim gradovima. S obzirom da se urbanizacija nastavlja, može se pretpostaviti da će se problemi drumskog saobraćaja i njegov negativan uticaj na životnu sredinu, samo pogoršati. Prema procenama Međunarodnog transportnog

forumu (*International Transport Forum* - ITF), promet drumskog i železničkog putničkog saobraćaja će se povećati za 120 - 230 % do 2050. god. (procene variraju u zavisnosti od budućih cena goriva i politike gradskog transporta). Kao rezultat toga, očekuje se dodatno povećanje emisija ugljen-dioksida (CO_2) iz putničkog saobraćaja u svetu (30 - 110 %), uz već postojeću tendenciju rasta prikazanu na slici 2.



Slika 2: Emisija CO_2 u svetu i Srbiji po sektorima, prema podacima Međunarodne agencije za energiju (*International Energy Agency* - IEA) [8].

Zbog toga je potreban napredniji saobraćajni sistem koji vrši kontinuirano praćenje saobraćaja u realnom vremenu i na osnovu analize prikupljenih podataka učesnicima u saobraćaja omogućava sigurnije i efikasnije kretanje [9]. Inteligentni transportni sistem (*Intelligent Transportation System* - ITS) je deo strukture pametnih gradova zasnovan na integraciji informaciono-komunikacionih tehnologija, u cilju poboljšanja sigurnosti, efikasnosti i održivosti u saobraćaju [10, 11]. U literaturi se kao sinonim za ITS može pronaći sintagma Pametna mobilnost (*Smart Mobility*) ili Pametan transport (*Smart Transportation*) [12].

Intelligentni transportni sistemi zasnovani su na senzorima i IoT tehnologijama, koje se implementiraju radi razmene podataka između vozila (*Internet of Vehicle* - IoV), vozila i infrastrukture i pojedinačnih delova infrastrukture [13], čiji koncept je prikazan na slici 3.



Slika 3: Prikaz koncepta dela infrastrukture inteligentnog transportnog sistema [14].

Osnovna infrastruktura ITS-a obuhvata tri celine: prikupljanje podataka, obradu podataka i isporuku informacija. Prikupljanje podataka o saobraćaju obuhvata meteorološke podatke, stanje na putevima, detekciju pojedinačnih vozila i monitoring protoka saobraćaja, koristeći uređaje opremljene različitim senzorima [15, 16]. Obrada podataka vrši se korišćenjem algoritama baziranih na različitim tehnologijama, koje između ostalih obuhvataju veštačku inteligenciju i fazi-logiku (*fuzzy logic*) [17]. Isporuka informacija podrazumeva obaveštavanje učesnika u saobraćaju putem namenskih servera, kontrolnih panela ili aplikacija na pametnim uređajima.

2.2.2 Sistemi za monitoring parametara životne sredine

Jedan od značajnijih problema koji nastaje usled povećanja broja stanovnika na jednom području je promena mikroklimе i emisija štetnih gasova [18]. Sistemi za monitoring parametara životne sredine se u literaturi na engleskom jeziku mogu pronaći pod nazivom *Smart Environment*. Ovi sistemi obuhvataju mnogobrojne autonomne senzore koji pružaju građanima korisne informacije za planiranje svakodnevnih aktivnosti. Preciznim monitoringom vazduha mogu se obezbediti informacije kojima se smanjuju zdravstveni rizici ljudi. To obuhvata uređaje za praćenje osnovnih parametara, kao što su temperatura, vlažnost vazduha i vazdušni pritisak, a takođe i uređaje kojima se vrši detekcija različitih gasova kao što su ugljen-monoksid, ugljen-dioksid, nitrid-dioksid, sumpor-dioksid, vodonik-sulfid i dr. [19].

Drugu grupu čine uređaji kojima se vrši monitoring parametara zemljišta i vode. Ovi uređaji su bazirani na senzorima za merenje vlažnosti zemljišta, koncentracije soli u zemljištu

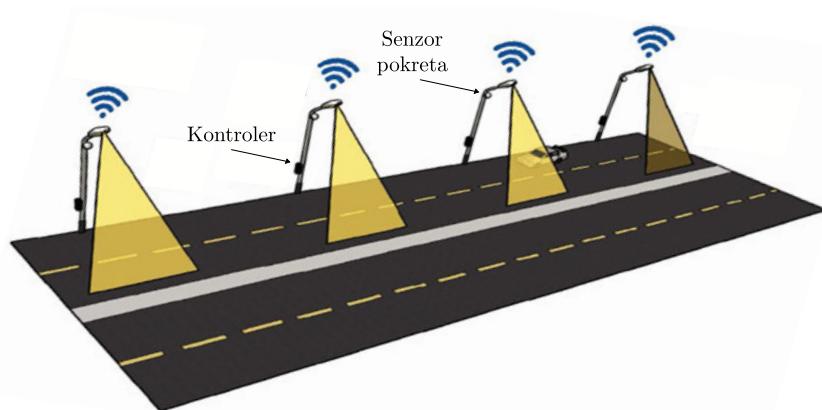
i/ili vodi, kao i za detekciju i kontrolu otpadnih materija u vodi. U sistemu za detekciju zemljotresa, senzori se koriste za praćenje seizmičke aktivnosti u realnom vremenu, sa ciljem blagovremenog preduzimanja odgovarajućih mera predostrožnosti.

Podaci dobijeni uređajima koji čine sistem za monitoring parametara životne sredine su od značaja, ne samo za stanovnike već i za druge sisteme pametnog grada. Na primer: merenje koncentracije štetnih gasova je neophodno u inteligentnim transportnim sistemima, naročito u tunelima; merenje vlažnosti zemljišta je takođe sastavni deo sistema koji se koriste u poljoprivrednoj proizvodnji; kontrola kvaliteta vode neophodna je u sistemima vodosnabdevanja i navodnjavanja.

2.2.3 Sistemi za monitoring potrošnje energije

Pametni senzorski sistemi povećavaju efikasnost i iskorišćenja električne energije, što može dovesti do napretka u rešavanju problema klimatskih promena sa kojima se pametni gradovi suočavaju. Koristeći senzore, može se konstruisati efikasna i sigurna pametna mreža koja detektuje i analizira podatke vezane za napajanje i obezbeđuje efikasnu kontrolu u očitavanju brojila, mesečnih računa, potrošnje energije, itd.

Jedan od sistema pametnog grada koji značajno doprinosi smanjenu potrošnje energije je pametno osvetljenje. Kod konvencionalno korišćenih svetiljki ne postoji mogućnost regulacije intenziteta kada nema prolaznika, što dovodi do povećane potrošnje električne energije. Jedno od alternativnih rešenja automatske kontrole intenziteta osvetljenosti i optimizacije potrošnje energije prikazano je na slici 4.



Slika 4: Primena senzora u sistemu pametne rasvete [20].

Automatizacija sistema ulične rasvete može smanjiti potrošnju energije i troškove održavanja, a takođe pomaže u indentifikaciji kriminalnih aktivnosti i pruža bezbedno noćno okruženje za

sve učesnike u saobraćaju [21]. Pametno osvetljenje je takođe od koristi i drugim strukturama pametnog grada kao što su praćenje saobraćaja u realnom vremenu i pametni parking sistemi.

2.2.4 Sistemi pametnih kuća/zgrada

Termin pametna kuća (*Smart Home*) nije striktno ograničen na kuće, već ima širi spektar tehnoloških aplikacija koje obuhvataju sve oblike stanovanja. Sistemi pametnih kuća obuhvataju integraciju tehnoloških rešenja sa ciljem da ljudima pruže usluge koje odgovaraju njihovim potrebama stanovanja, nudeći automatizovanu i daljinsku kontrolu i usluge kućnih aparata [22]. To su pre svega udobnost, bezbednost i ušteda energije.

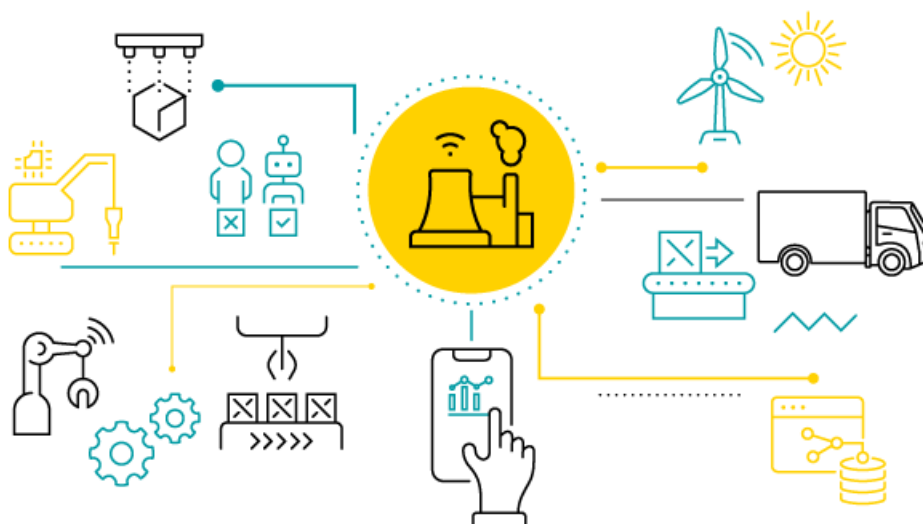
Upotrebom IoT tehnologije korisnici mogu da nadgledaju i kontrolišu različite uređaje u svojoj kući sa bilo kog mesta. Putem mašinskog učenja (*Machine Learning*) i veštačke inteligencije, pametni domovi sada mogu da prepoznaju obrasce ponašanja stanovnika i automatizovati svakodnevne aktivnosti, čineći tako stanovanje udobnijim. Takođe, doprinose i značajnoj uštedi energije time što omogućavaju centralizovano upravljanje ventilacijom, grejanjem, klimatizacijom i osvetljenjem [23]. Da bi se pružile takve usluge, svi sistemi pametnih kuća su izgrađeni prema strukturi koja uključuje tri faze:

- Prikupljanje informacija putem senzora, kamera, mikrofona i drugih kućnih aparata;
- Čuvanje i obradu prikupljenih informacija uz pomoć glavne procesorske jedinice;
- Kreiranje rezultata i pružanje usluga u zavisnosti od obrađenih informacija.

Neki od senzora koje sistemi pametnih kuća koriste uključuju detekciju kretanja, merenje temperature i vlažnosti vazduha, kao i senzore za merenje osvetljenja. Pored toga, podaci se mogu prkupljati preko kućnih aparata koji se mogu povezati na internet. Ovi sistemi omogućavaju da korisnik može daljinski da kontroliše kućne aparate sa bilo kog mesta i može da obavlja zadatke pre nego sto stigne kući. Pametni senzori mogu pratiti temperaturu i vlažnost u kući i održavati optimalnu atmosferu prema potrebama korisnika. Takođe, pomoću sistema za detekciju dima ili gasova kao i detekciju pokreta, pametne kuće imaju povećanu bezbednost i sigurnost.

2.2.5 Sistemi pametne industrije

Paralelno sa razvojem informaciono-komunikacionih tehnologija, interneta, bežičnih komunikacija, proizvodnih mreža, razvijena je i industrijska proizvodnja koja je doživela snažne i duboke promene u odnosu na svoj početak [24]. Pametna industrija predstavlja koncept proizvodnje koji na fleksibilan i efikasan način treba da zadovolji potrebe današnjeg tržišta, a



Od strane ekonomskih i akademskih stručnjaka je 2011. god. usvojen novi termin, Industrija 4.0, kao naziv za četvrtu industrijsku revoluciju. Industrija 4.0 povezuje IoT i IIoT (*Industrial Internet of Things*) sa proizvodnim sistemom što omogućava interakciju sa mašinama radi razmene informacija i donošenja inteligentnih odluka na osnovu sistemskog algoritma. Ova promena uključuje primenu veštačke inteligencije, automatizovanih robota i aditivnu proizvodnju [26].

Proizvodni sektori razvili su sopstvene tehnologije kako bi postigli viši kvalitet i bržu proizvodnju. Postoji mnogo senzora koji se koriste u automatizovanoj industriji, kao što su senzori temperature, senzori pritiska, mikroelektromehanički sistemi (*Micro-ElectroMechanical System* - MEMS), senzori detekcije pokreta, senzori obrtnog momenta, i dr. [27].

Sistemi koji su prikazani na slici 1 i opisani u predhodnom delu, predstavljaju samo deo ukupnog broja sistema u strukturi pametnog grada. Među značajnijim, koji nisu navedi, spadaju pametni bezbednosni sistemi (*Smart Security and Safety*), sistemi koji se koriste u poljoprivredi (*Smart Agriculture*), sistemi koji se koriste u zdravstvu (*Smart Health*), itd.

Bezbedonosni sistemi se koriste za nadzor kuća, zgrada, ulica, kancelarija i poljoprivrede. Uvođenjem video nadzora može se ostvariti smanjenje stope kriminala i bezbednije kretanje građana. Takođe, ublažavanje posledica koje mogu nastati u slučaju udesa, požara ili drugih incidenata može se postići obaveštenjem nadležnih službi putem instaliranih senzorskih sistema. Prenosivi uređaji bazirani na biosenzorima mogu u realnom vremenu pratiti zdravstveno stanje pacijenata, što može omogućiti blagovremenu intervenciju lekara. Neadekvatno korišćenje resursa u tradicionalno korišćenim načinima poljoprivredne proizvodnje može se rešiti upotrebom automatizovanih sistema koji prate uslove zemljišta, kao i količinu padavina.

Broj sistema u strukturi pametnog grada ne može se precizno definisati. Svaki pametan grad ima svoju jedinstvenu strukturu, koja prvenstveno zavisi od cilja koji treba postići. Takođe, funkcije koju jedan sistem obavlja ne moraju biti ograničene na konačan skup aktivnosti, već to zavisi od celokupne strukture pametnog grada, tj. međusobne povezanosti primenjenih sistema.

2.3 Pametni gradovi u svetu

Smatra se da je koncept pametnog grada započet u Santanderu, gradu u Španiji, kada je 2009. god. 20000 senzora raspoređeno i instalirano na teritoriji grada [28]. Međutim, njegovo usvajanje je bilo sporo, i kritikovano iz raznoraznih razloga. Ideologija je bila suočena sa konceptom o održivosti i ostalim karakteristikama pametnih gradova. Tačnije, smatrano je da su tradicionalni i dobro osmišljeni koncepti ugroženi novinama koje treba uvesti, jer se na taj način ograničava interakcija među ljudima.

Jedna od kritika odnosi se na Rio De žaneiro, grad u Brazilu u čijem centru i okolini živi preko 12 miliona stanovnika [29]. Navodi se da ceo grad kontroliše nekoliko ljudi gledajući u monitore na kojima se prikazuju fotografije dobijene sa kamera i senzora instaliranih na teritoriji grada. Međutim, da bi se grad brže i efikasnije učinio pametnim neophodno je da i njegovi stanovnici prihvate novi način života, i da za svoje odluke koriste podatke dostupne svima. Ovaj koncept je sada prihvaćen na globalnom nivou, i uspešno implementiran u nekim od najvećih svetskih gradova.

U nastavku su date neke od karakteristika gradova koji se trenutno ubrajaju u najrazvijenije po pitanju implementacije različitih pametnih sistema [30].

Singapur: Na vrhu većine listi kada su u pitanju pametni gradovi nalazi se Singapur. Počevši od 2014. god., Singapur je uveo širok spektar pametnih tehnologija u svoj javni i privatni sektor. Tehnologija beskontaktnog plaćanja je široko prihvaćena za efikasno usmeravanje kretanja i plaćanja za oko 7,5 miliona putnika u Singapuru koji koriste javni prevoz.

Uveden je digitalni zdravstveni sistem koji omogućava video konsultacije, kao i prenosivi IoT uređaji za praćenje zdravstvenog stanja pacijenata. Takođe, Singapur je 2021. god. objavio planove za novi eko-pametan grad koji je u potpunosti bez vozila.

Helsinki: Helsinki je sebi postavio cilj da do 2035. god. postane neutralan po pitanju emisije ugljen-dioksida. Do 2017. god. emisija štetnih gasova u gradu je smanjena za 27 % u poredjenju sa 1990. god. Još jedan cilj na kojem Helsinki radi je smanjenje emisija iz saobraćaja za 69 % u roku od tri decenije, do 2035. god., uz mere poput prelaska čitavog voznog parka gradskih autobusa na električne, i širenje mreže za punjenje električnih automobila. Pošto sistemi grejanja uzrokuju više od polovine emisija u Helsinkiju, grad je fokusiran na sprovođenje mera energetske efikasnosti tokom renoviranja, koje bi mogle da smanje emisije iz zgrada za 80 %, kao i na uključivanje više obnovljivih izvora energije.

Cirih: Razvoj pametnog grada u Cirihu je počeo projektom ulične rasvete. Grad je uveo seriju uličnih svetiljki koje korišćenjem senzora prilagođavaju nivo osvetljenosti u zavisnosti od intenziteta saobraćaja. Ovaj projekat je doprineo uštedi električne energije do 70 %. Od tada, pametne ulične svetiljke instalirane su na celoj teritoriji grada. Takođe, uspostavljeni su dodatni senzorski sistemi koji mogu prikupljati podatke o životnoj sredini i meriti protok saobraćaja. Uz to, razvijen je pametan sistem upravljanja zgradama, koji povezuje gradsko grejanje, potrošnu električne energije i hlađenje.

Oslo: Norveška prestonica ima tendenciju da do 2025. god. sva vozila u celom gradu budu električna, što je impresivno s obzirom na populaciju od oko 670.000 stanovnika. Podsticaji za automobile sa nultom emisijom su već uvedeni, uključujući besplatno parkiranje, korišćenje autobuskih traka i niže takse i cene putarine. Kao deo gradskog cilja da do 2050. god. postane neutralan po pitanju emisije ugljenika, drugi pametni projekti su takođe već uveliko u toku. To uključuje izgradnju zgrada sa nultom emisijom, rekonstrukciju postojećih, kao i razvoj kružnog upravljanja otpadom i sisteme obnovljive energije.

Amsterdam: Projekat pametnog grada u Amsterdamu započeo je 2009. god. i obuhvata više od 170 različitih operacija širom grada. Ono što se posebno ističe za Amsterdam su inovativnost po pitanju korišćenja obnovljive energije za električne kamione za skupljanje otpada, instaliranje autobuskih stajališta sa solarnim napajanjem, i napredni sistemi rasvete. Hiljade preduzeća i domaćinstava širom grada su već modifikovani energetske efikasnom krovnom izolacijom, pametnim brojilima i ultra-niskoenergetskim LED svetlima.

Njujork: Stotine pametnih senzora i tehnologija su testirane i postavljene u različitim okruzima Njujorka 2020. god., kao deo pilot programa pametnih gradova. Senzori prikupljaju podatke sa ciljem efikasnijeg upravljanja uslugama kao što su upravljanje otpadom i sakupljanje istog. Usluge deljenja automobila su takođe veoma razvijene, što doprinosi smanjenju ukupne emisije gasova i gužvi u saobraćaju. U pokušaju da uključi više lokalnih ideja,

Njujork održava godišnje takmičenje za aplikacije koje najbolje koriste otvorene gradske skupove podataka.

Seul: Seul je poznat i kao prvi pametan grad na svetu. Kroz prikupljanje i analizu podataka dobijenih senzorima raspoređenim širom grada, kreirana je snažna osnova za pametnu infrastrukturu i usluge. Neki od instaliranih senzora pružaju podatke o protoku saobraćaja i kvalitetu vazduha. Jedan deo sistema predodređen je pružanju pomoći starijim građanima koji žive sami. Kada se u određenom vremenskom periodu ne otkrije kretanje ili ako senzori životne sredine primete abnormalnu temperaturu, vlažnost ili osvetljenje, kontaktiraju se relevantne hitne službe. Isto tako, Seul istražuje upotrebu platforme podataka za stvaranje detektiva sa veštačkom inteligencijom za otkrivanje potencijalnih obrazaca kriminala. Takođe, korejska prestonica je među prvim gradovima koji koriste 5G tehnologiju u mobilnosti i transportu.

2.4 Ograničenja pri realizaciji pojedinačnih sistema pametnih gradova

Svaki sistem u okviru strukture pametnog grada realizuje se preko bežičnih senzorskih mreža i/ili IoT sistema, koji se sastoje se međusobno povezanih senzorskih čvorova (senzorski sistem ili autonomni senzor). Kao što je ranije rečeno, autonomni senzori mogu samostalno da vrše merenja, obradu i slanje podataka, ali imaju određena ograničenja po pitanju resursa neophodnih za njihov rad. To se odnosi na električnu energiju neophodnu za njihovo napajanje, memorijski prostor za skladištenje podataka, kao i ograničen domet komunikacije.

Ograničenje po pitanju dostupnosti električne energije predstavlja glavni problem pri projektovanju i implementaciji ovih sistema. Uzrok toga je neisplativost instaliranja tradicionalne infrastrukture za veliki broj pojedinačnih autonomnih senzora, a ponekad i nedostupnosti korišćenja postojećeg mrežnog napajanja. Razlog tome je najčešće sama lokacija senzorskih čvorova, jer se često nalaze na mestima bez dostupne električne energije. To su, na primer, senzorski čvorovi kojima se meri nivo radioaktivnosti, nivo zagađenosti vode, različiti parametri kvaliteta vazduha i zemljišta, senzori koji se koriste za detekciju požara, itd. Sa druge strane, očekuje se da svi senzorski čvorovi kontinualno rade u toku dugog vremenskog intervala.

Zbog toga je neophodno obezbediti neki alternativni način napajanja električnom energijom. Prva opcija je upotreba baterija. Međutim, iako baterije obezbeđuju pouzdan izvor električne energije, treba imati na umu da njihova proizvodnja, recikliranje, pa i sama zamena nije ni jednostavna niti jeftina. Druga opcija je realizacija *Energy Harvesting* sistema

kojima se energija okoline kao što je svetlosna, toplotna, mehanička, i dr. konvertuje u električnu [31, 32]. Ovim načinom napajanja se može obezbediti dovoljno električne energije za rad samog uređaja, ali se takođe višak dostupne energije može iskoristiti za punjenje baterije. Superkondenzator je komponenta koja ima bitnu ulogu u realizaciji ovih sistema napajanja. Upotrebljava se kao primarni izvor energije za napajanje uređaja ili za skladištenje viška energije (*buck-up*) koja se koristi da se pošalje informacija da je baterija prazna ili da će se uskoro isprazniti.

Pored realizacije adekvatnog napajanja, značajno je redukovati potrošnju energije prilikom slanja podataka ili tokom neaktivnog stanja uređaja, tj. kada nema prikupljanja niti slanja podataka. Osnovna razlika između bežične senzorske mreže i IoT sistema je u načinu prenosa podataka. Bežična senzorska mreža je mreža bez pristupa Internetu i u okviru nje se podaci od čvora do bazne stanice prenose radio modulima, dok mreža sa pristupom Internetu predstavlja tzv. IoT sistem. LoRa (*Long Range*) radio moduli predstavljaju jedan od najkorišćenijih načina komunikacije u bežičnim senzorskim mrežama zbog mogućnosti slanja podataka na velikim rastojanjima uz malu potrošnju električne energije [33]. Prenos podataka u IoT sistemima vrši se od bazne stanice ili direktno od senzorskog čvora do odabranog servera.

Potencijalni problem prilikom prenosa i skladištenja je zaštita podataka [34]. Sve složenija mrežna struktura sistema pametnih gradova često je manje bezbedna. Ovi uređaji međusobno komuniciraju koristeći otvorene mrežne protokole koji su podložni napadima. Bezbedonosni zahtevi uključuju zaštitu privatnosti, autentifikaciju i poverljivost podataka. Tehnologije kao što su enkripcija, biometrija i mašinsko učenje mogu se koristiti za održavanje bezbednosti i privatnosti sistema. Enkripcija je najčešće korišćena bezbednosna tehnika. Postoje propisi doneti od strane različitih institucija, među kojima su Evropski institut za telekomunikacione standarde (*European Telecommunications Standards Institute* - ETSI), Nacionalni institut za standarde i tehnologiju (*National Institute of Standards and Technology* - NIST), Međunarodna organizacija za standardizaciju/Međunarodna elektrotehnička komisija (*International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission* - ISO/IEC), kojima se definiše potreba za enkripcijom podataka u IoT sistemima.

Glava 3

Projektovanje i razvoj generatora magnetnih potpisa

Simulatori saobraćaja koriste se za pronalaženje najprikladnijih rešenja za specifične okolnosti. Prema oblastima primene i nivou detalja simulatori saobraćaja se mogu klasifikovati u tri grupe: mikroskopski, makroskopski i mezoskopski. Makroskopski simulatori koriste modele kojima se opisuju glavne karakteristike saobraćaja kao što su, protok i gustina, bez razlikovanja pojedinačnih vozila. Sa druge strane, modeli koji se koriste u mikroskopskim simulatorima predstavljaju saobraćaj prema karakteristikama pojedinačnih vozila i njihovi parametri, kao što su brzina, vreme putovanja i kašnjenja, zaustavljanja, emisija gasova i potrošnja goriva. Mezoskopski simulatori su slični mikroskopskim, i koriste se za simulaciju pojedinačnih vozila na pojednostavljen način.

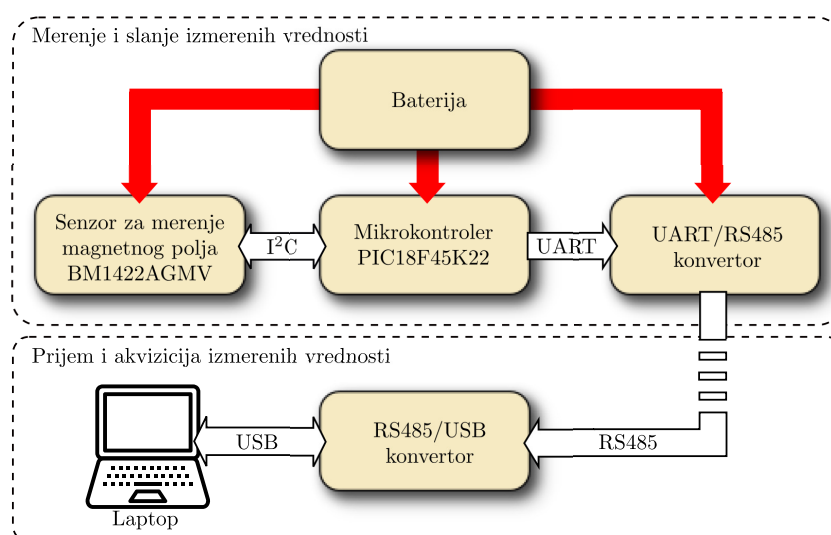
U naučnim radovima i tehničkoj dokumentaciji postoji veliki broj simulacionih modela saobraćaja koji se koriste u eksperimentima sa ciljem repliciranja stvarnih događaja [35, 36]. Simulatori su dizajnirani da budu deo distribuiranog sistema upravljanja saobraćajem i da simuliraju čitavu saobraćajnu mrežu [37]. Virtuelno simulaciono okruženje obezbeđuje podatke koji se ne mogu lako dobiti u realnim uslovima i autentičnim okruženjima [38]. Softverom za modeliranje saobraćaja izračunava se optimalno vreme promena stanja semafora kako bi se povećao broj automobila koji prelaze raskrsnicu [39]. Simulacije se takođe koriste da se ukaže na moguće smanjenje kašnjenja vozila i potrošnju goriva [40, 41], kao i za praćenje vozila na putu, tj. određivanje njegovog položaja i brzine [42]. Takođe, metode zasnovane na simulaciji se primenjuju za upravljanje autonomnim vozilima [43, 44], predviđanje kretanja vozila [45], izračunavanje optimalne brzine [46] ili simulaciju strategija preusmeravanja u slučaju incidenata [47]. Simulacije saobraćaja obuhvataju i neka hardverska rešenja, kao što je okruženje za procenu vertikalnog ubrzanja koja izazivaju neravnine na putu [48]. Simulaciono okruženje, predstavljeno u [49] obuhvata različite kompleksne modele kojima se vozilo karakteriše kao skup metalnih ploča različitih veličina i masa, čime se pojednostavljuje analiza promena magnetnog polja. Simulacijom se može odrediti magnetno polje feromagnetnih

objekata koji se kreću, pri čemu se objekat predstavlja kao skup magnetnih dipola [50].

Radi kontrole i unapređenja saobraćajnog toka neophodna je kvantitativna i kvalitativna detekcija vozila koja učestvuju u saobraćaju. Uređaji kojima se utvrđuje prisustvo vozila na ulici ili parkingu nazivaju se detektori vozila. Pored samog prisustva vozila, detektorima se može odrediti smer kretanja, brzina, kao i tip vozila. Simulacija magnetnih potpisa (promena magnetnog polja izazvana vozilom), koja će biti opisana u nastavku, vrši se generatorom magnetnog polja, a ima za cilj da rekonstruiše kretanje pojedinačnih vozila, kao i realni saobraćajni tok. Razvijeni generator se koristi za testiranje rada detektora vozila. Kada se vrši simulacija magnetnih potpisa pojedinačnih vozila ulazni parametri generatora su model i brzina kretanja vozila. Ovim karakteristikama vozila određeni su talasni oblik magnetnog potpisa i njegovo trajanje. Parametri na osnovu kojih se vrši rekonstrukcija realnog saobraćajnog toka su proizvoljni broja različitih vozila koja se kreću različitim brzinama u zadatom opsegu, kao i nasumično zadati vremenski intervali između prolaska dva uzastopna vozila.

3.1 Snimanje magnetnih potpisa vozila

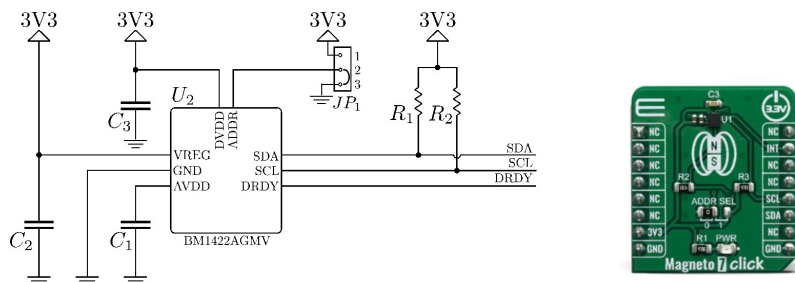
Kako bi se izabrao odgovarajući dizajn generatora, najpre je potrebno snimiti magnetne potpise različitih vozila. Izbor potrebnih komponenata za razvoj generatora može se izvršiti analizom talasnih oblika snimljenih magnetnih potpisa. Za snimanje je iskorišćen sistem za merenje magnetnog polja i akviziciju podataka, čija je blok šema prikazana na slici 6.



Slika 6: Blok šema sistema za merenje magnetnog polja i akviziciju podataka.

Kao što se može videti, sistem se sastoji od dve celine. Prva, koja se postavlja na kolovoz, koristi se za merenje magnetnog polja i slanje izmerenih vrednosti. Promene magnetnog polja

planete Zemlje koje se dešavaju prilikom prolaska vozila se detektuju senzorom za merenje magnetnog polja. Za ova merenja, kao i za razvoj samog detektora vozila, izabran je senzor BM1422AGMV [51]. Pri samoj realizaciji sistema upotrebljena je štampana ploča na kojoj se nalazi senzor sa ostalim potrebnim komponentama (slika 7), razvijena od strane firme Mikroelektronika.



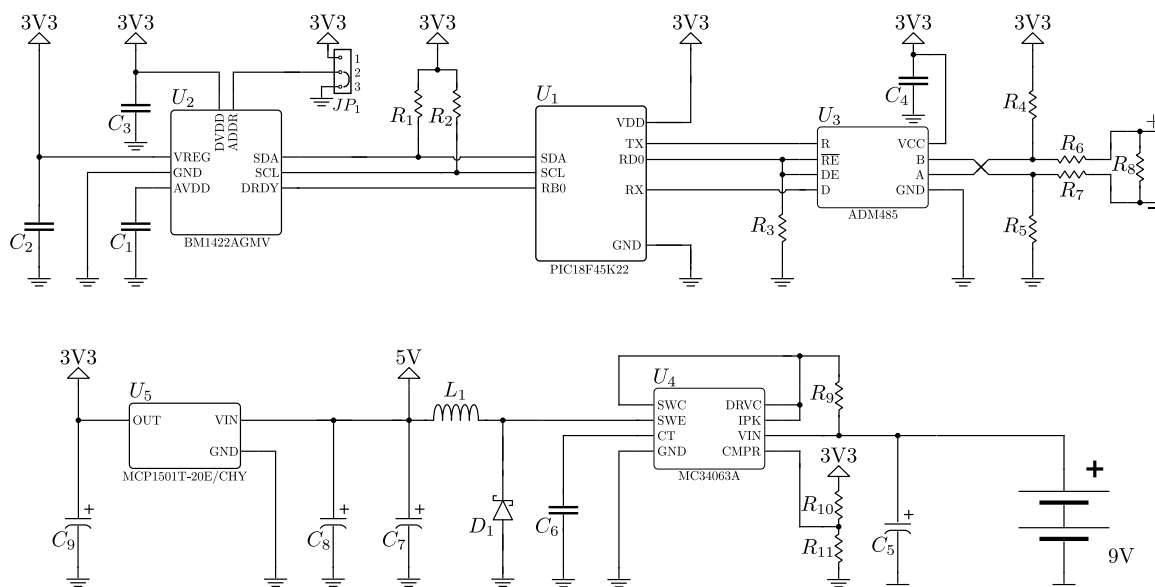
Slika 7: Električna šema i štampana ploča sa senzorom za merenje magnetnog polja.

Rad ovog senzora bazira se na promeni impedanse pod uticajem magnetnog polja. Sadrži tri osetljiva elementa tako da se može koristiti za istovremeno merenje magnetnog polja po x , y i z osi, a najniža vrednost promene koja se može detektovati je $0,042 \mu\text{T}$. Izmerene vrednosti se dobijaju u digitalnom obliku (12/14-bitne vrednosti), a one zapravo predstavljaju vrednost magnetne indukcije. U nastavku teksta se koriste termini magnetno polje i intenzitet magnetnog polja, ali treba imati u vidu da se sve analize vrše na osnovu magnetne indukcije koja zapravo predstavlja klalativnu meru magnetnog polja.

Mikrokontroler vrši konfiguraciju senzora i čitanje izmerenih vrednosti preko I²C (*Inter-Integrated Curcuit*) protokola. Nakon transformacije u odgovarajući format, izmerene vrednosti se šalju do dela sistema kojim se vrši njihova akvizicija. Na osnovu tehničkih karakteristika koje sistem treba da ispuni, a i prethodnog iskustva, izabran je mikrokontroler PIC18F45K22 [52], koji se nalazi na razvojnom okruženju *Ready for PIC* [53]. Takođe, na samom okruženju je realizovan i regulator napajanja kao i konektori za povezivanje mikrokontrolera sa ostalim komponentama koje se koriste. Ovaj mikrokontroler pruža dovoljno računarskih i memorijskih resursa za pouzdano obavljanje potrebnih funkcija, tako da je upotrebljen i prilikom razvoja ostalih sistema opisanih u disertaciji.

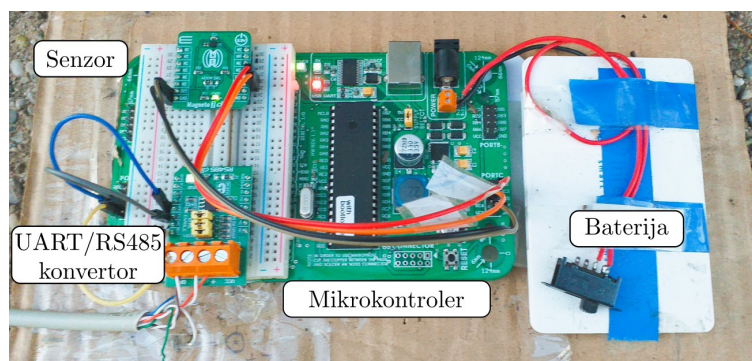
Kako bi bilo moguće izmerene podatke poslati do dela sistema za akviziciju podataka, koji je na rastojanju od nekoliko metara (prvenstveno zbog bezbednosti), iskorišćen je RS485 standard za slanje podataka. Naime, mikrokontroler šalje podatke preko UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) protokola, koji su na TTL (*Transistor-Transistor Logic*) naponskom nivou njegovog napajanja, a oni se upotrebom UART/RS485 konvertora konfigurišu prema specifikacijama RS485 standarda.

Sve komponente ovog dela se napajaju baterijom izlaznog napona 9 V kako be se izbeglo korišćenje dodatnih provodnika za napajanje. Izlazni napon baterije se preko naponskog regulatora na razvojnom okruženju postavlja na 3,3 V, koliko je potrebno za napajanje senzora, mikrokontrolera i konvertora. Električna šema ovog dela sistema prikazana je na slici 8.



Slika 8: Električna šema sistema za merenje magnetnog polja.

Na slici 9 je prikazan praktično realizovan deo sistema koji se postavlja na kolovoz i kojim se vrši merenje magnetnog polja.



Slika 9: Praktična realizacija sistema za merenje magnetnog polja.

Akvizicija, tj. čuvanje izmerenih vrednosti radi dalje analize obavlja se laptop računom. Pre samog upisa u fajl, kako bi računar mogao da prihvati podatke neophodno je da oni budu organizovani prema pravilima USB (*Universal Serial Bus*) protokola. Za to se koristi RS485/USB konvertor.

Merenje magnetnog polja izvršeno je pri prolasku četiri različita vozila, čije su karakteristike date u tabeli 1. Intenzitet promene magnetnog polja zavisi od mase vozila (m), tj.

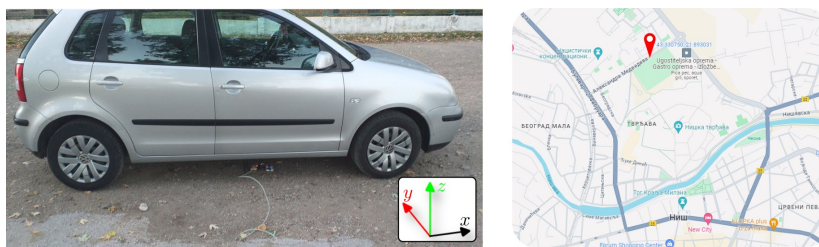
od mase feromagnetnog materijala unutar njegove strukture, kao i od rastojanja između senzora i samog vozila. Kako je sistem za merenje postavljen na kolovoz na intenzitet magnetnog polja ima uticaj rastojanje od kolovoza do podnožja vozila (d). Niža vozila veće mase izazvaće veće promene u intenzitetu magnetnog polja. Trajanje promena magnetnog polja (t) određeno je dužinom samog vozila (l) i brzinom kojoj se vozilo kreće (v). Povećanje brzine kretanja vozila uzrokuje kraće trajanje promena, dok će promene trajati duže za vozila veće dužine pri istoj brzini kretanja.

Tabela 1: Karakteristike vozila za koja je izvršeno snimanje magnetnih potpisa.

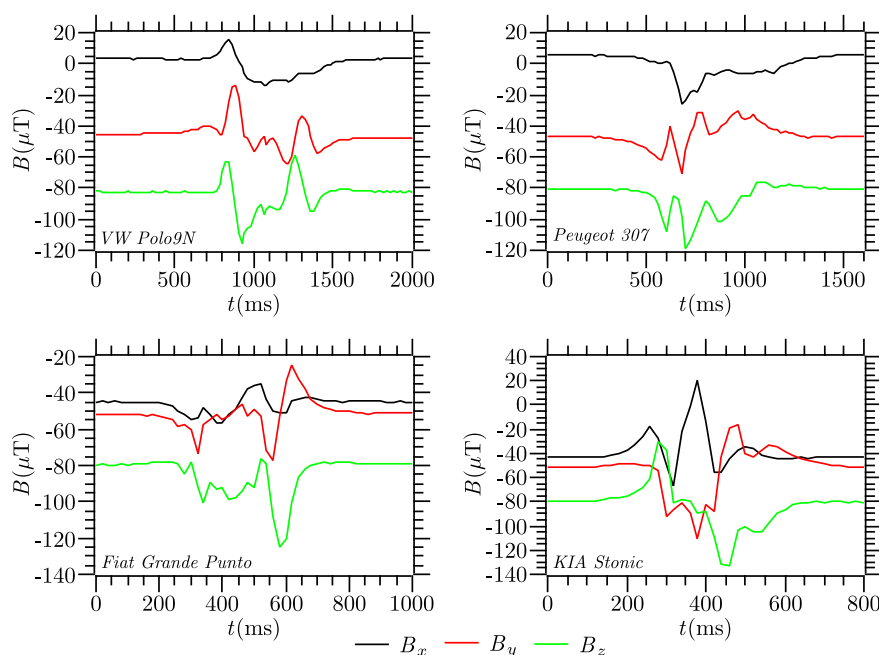
Vozilo	$m(\text{kg})$	$d(\text{mm})$	$l(\text{mm})$	$v(\text{km/h})$	$t(\text{ms})$
 <i>VW Polo9N</i>	960	165	3743	20	840
 <i>Peugeot 307</i>	1243	120	4202	30	920
 <i>Fiat Grande Punto</i>	1155	185	4030	40	460
 <i>KIA Stonic</i>	1157	165	4140	50	540

U toku snimanja magnetnih potpisa, deo sistema kojim se vrši merenje magnetnog polja bio je postavljen na kolovoz. Senzor je postavljen tako da se pravac i smer njegove x ose poklapaju sa pravcem i smerom kretanja vozila, a y osa je normalna u odnosu na pravac kretanja vozila. Ove dve ose leže u ravni kolovoza, dok z osa senzora leži u ravni koja je normalna na ravan kolovoza i orjentisana je vertikalno naviše. Merenje magnetnog polja pri prolasku sva četiri vozila vršeno je na isti način, a postupak i lokacija merenja (Aleksandra Medvedeva 4, Niš) prikazani su na slici 10.

Merenje magnetnog polja vršeno je frekvencijom od 100 Hz, a dobijene vrednosti prikazani su na slici 11. Sa prikazane slike se vidi da promene magnetnog polja prilikom prolaska vozila postoje po svim osama merenja.



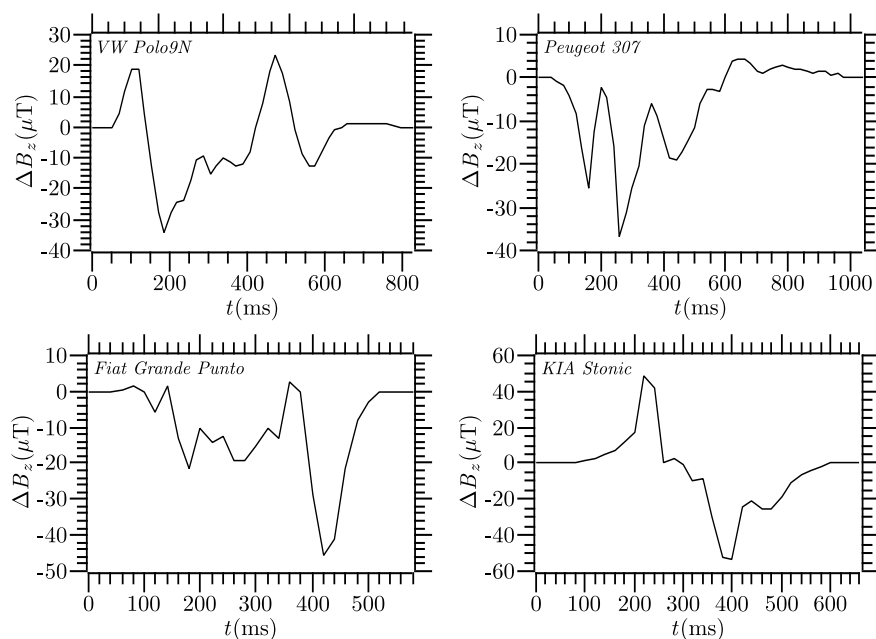
Slika 10: Merenje magnetnog polja pri prolasku vozila i lokacija na kojoj su merenja vrešena.



Slika 11: Promene magnetnog polja pri prolasku vozila iznad senzora.

Kako bi postupak projektovanja generatora magnetnih potpisa i proces detekcije vozila, koji će kasnije biti prikazan, bili realizovani na najjednostavniji način, treba odabrati i analizirati promene magnetnog polja po jednoj osi. Veliki uticaj na magnetno polje koje se meri y osom senzora imaće vozila koja se kreću susednom kolovoznom trakom, s obzirom da je ona postavljena u ravni kolovoza normalno na pravac kretanja vozila. Iz tog razloga se vrednosti dobijene merenjem po ovoj osi ne mogu iskoristiti za preciznu detekciju vozila koja se kreću iznad senzora. Uzevši u obzir magnetne potpise svih vozila, može se videti da intenzivnije promene magnetnog polja postoje po z osi, nego po x osi. Zbog toga su u nastavku razmatrane promene magnetnog polja po z osi.

Od interesa su promene magnetnog polja pri prolasku vozila u odnosu na intenzitet magnetnog polja kada iznad senzora, ili u njegovoj blizini, nema vozila. Ove promene zapravo predstavljaju magnetni potpis vozila i prikazane su na slici 12.



Slika 12: Snimljeni magnetni potpisi vozila.

3.2 Generisanje magnetnih potpisa korišćenjem signal generatora i kalema

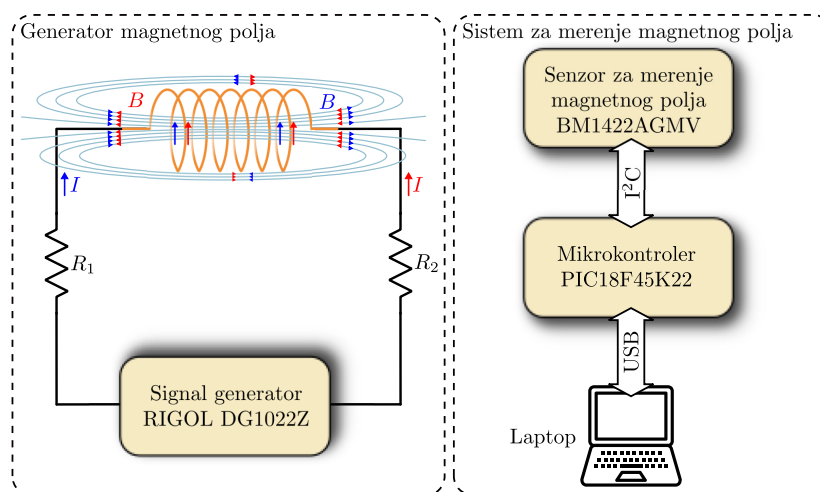
Generatori magnetnog polja imaju veoma široku primenu, a u zavisnosti od oblasti primene koriste se različite topologije za njihovu realizaciju. Generator uniformnog i konstantnog magnetnog polja u kombinaciji sa senzorom magnetnog polja se koristi u sistemima za procenu pozicije zaostale magnetne nanočestice [54]. Promenljivo magnetno polje po jednoj osi, koje se stvara dipolnim parovima, primenjuje se u eksperimentima sa polarimetrima i magnetometrima [55]. Spektar primena generatora magnetnog polja naizmeničnog talasnog oblika je širok, a jedna od njih je trodimenzionalno praćenje položaja medicinske opreme, kao v sto je kardiovaskularni kateter [56].

S obzirom da su snimljeni magnetni potpisi bazirani na promenama magnetnog polja po jednoj osi, kako bi se izvršila njihova rekonstrukcija dovoljno je da generator sadrži jednu komponentu kojom se generiše magnetno polje. Komponenta kojom se može generisati magnetno polje, a da se pri tome njegov intenzitet kontroliše električnom pobudom je kalem. Kalem je pasivna elektronska komponenta koja u idealnom slučaju poseduje samo reaktivnu otpornost (reaktansu), čija je vrednost direktno proporcionalna frekvenciji signala koji se dovodi na njegove električne kontakte. Koeficijent proporcionalnosti između reaktanse i frekvencije predstavlja iduktivnost kalema. Kada se na kalem dovede napon, protok struje kroz njega se ne uspostavlja trenutno, zbog magnetnog polja koje se stvara u njemu. Ovo

magnetno polje indukuje elektromotornu silu suprotnog polariteta od dovedenog napona, pa samim tim ne dozvoljava trenutno uspostavljanje struje. Nakon nekog vremena, magnetno polje postaje konstantno i dalje ne utiče na protok struje.

Za generisanje magnetnih potpisa vozila korišćen je višeslojni cilindrični kalem. Intenzitet generisanog magnetnog polja zavisi od jačine struje koja protiče kroz kalem i njegovih geometrijskih parametara [57]. Struja koja protiče kroz kalem dobija se signal generatorom, a njena jačina zavisi od amplitude generisanog napona [58].

Na slici 13 je predstavljena blok šema generatora magnetnog polja realizovanog korišćenjem signal generatora i kalema, kao i sistem za merenje magnetnog polja koji se sastoji od mikrokontrolera i senzora. Laptop se koristi za skladištenje i obradu izmerenih vrednosti.



Slika 13: Blok šema generatora magnetnog polja sastavljenog od signal generatora i kalema, i sistema za merenje generisanog magnetnog polja.

3.2.1 Izračunavanje geometrijskih parametara kalema

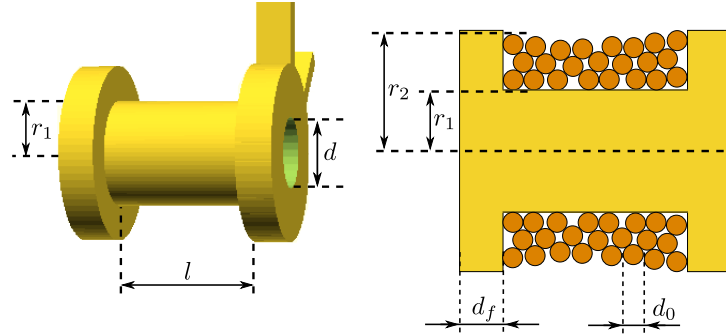
Sa snimljenih magnetnih potpisa se može videti da su maksimalne promene magnetnog polja oko $50 \mu\text{T}$. Da bi bilo moguće rekonstruisati i magnetne potpise masivnijih vozila koja nisu obuhvaćena trenutnim istaživanjem, uzima se da je maksimalna vrednost magnetnog polja koje treba generisati $100 \mu\text{T}$. Magnetno polje generisano kalemom je direktno proporcionalno intenzitetu struje koja protiče kroz njega, bilo da je ona jednosmerna ili naizmenična [59]. Pri tome je maksimalna vrednost struje koja se propušta kroz kalem 20 mA . Ova vrednost jačine struje je izabrana iz praktičnih razloga, jer se može generisati laboratorijskim uređajima (signal generator) ili mikrokontrolerom, što će detaljnije biti opisano u nastavku.

Pri izračunavanju vrednosti geometrijskih parametara kalema uzimaju se u obzir navedene maksimalne vrednosti magnetnog polja i struje. Geometrijski parametri višeslojnog

cilindričnog kalema su unutrašnji poluprečnik r_1 , spoljašnji poluprečnik r_2 , dužina namotaja l i broj namotaja N [60–63]. Unutrašnji poluprečnik definiše veličinu šupljine unutar tela kalema (rastojanje od aksijalne ose do unutrašnje površine namotaja). Spoljašnji poluprečnik predstavlja rastojanje od aksijalne ose kalema do spoljašnje površine namotaja i zavisi od unutrašnjeg poluprečnika, broja namotaja, dužine namotaja i prečnika provodnika d_0 koji se koristi za formiranje namotaja, a može se izračunati sledećim izrazom [64]:

$$r_2 = r_1 + \frac{d_0^2 N}{l}. \quad (3.1)$$

Dužina namotaja ne predstavlja dužinu provodnika već dužinu sloja koju formira provodnik na površini tela kalema. Princip formiranja višeslojnog cilindričnog kalema sa označenim geometrijskim parametrima prikazan je na slici 14.



Slika 14: Struktura višeslojnog cilindričnog kalema.

Kako geometriju određuje ukupno pet parametara, pri projektovanju kalema neke od njih treba uzeti kao konstantu. Višeslojni kalem za potrebe generisanja magnetnih potpisa formiran je namotavanjem bakarnog provodnika oko kalemskog tela, tehnikom nasumičnog namotavanja. Telo kalema je napravljeno od PLA plastike korišćenjem 3D štampača, tako da u centru ima šupljinu prečnika $d = 4$ mm. Razmatrani su kalemovi koji sadrže od jednog do deset slojeva namotaja, tj. kod kojih se broj namotaja menja od 100 do 1000. Pri tome je unutrašnji poluprečnik kalema $r_1 = 3$ mm, dužina namotaja je $l = 12$ mm, a prečnik provodnika od koga se formiraju namotaji je $d_0 = 0,12$ mm. U zavisnosti od broja namotaja dobijaju se kalemovi različitog spoljašnjeg poluprečnika, koji imaju različitu vrednosti induktivnosti i mogu da generišu magnetno polje različite jačine. Induktivnost višeslojnog cilindričnog kalema L može se izračunati korišćenjem izraza [64]:

$$L = \frac{78,7 N^2 d_m^2}{3d_m + 5(d_2 - d_1) + 9l}. \quad (3.2)$$

U jednačini (3.2) d_1, d_2, d_m su unutrašnji, spoljašnji i srednji prečnik kalema, respektivno. Induktivnost nije od velikog značaja za primenu koja se razmatra, već intenzitet magnetnog polja koje se generiše kalemom.

Intenzitet magnetnog polja koje se generiše jednoslojnim cilindričnim vazdušnim kalemom (bez jezgra) po aksijalnoj osi može se matematički opisati kao [65]:

$$B(z) = \frac{\mu_0 N I}{2l} f(z, r), \quad (3.3)$$

pri čemu je $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m magnetna permeabilnost vazduha (vakuuma), a I intenzitet struje koja protiče kroz kalem. Funkcija $f(z, r)$ određuje zavisnost generisanog polja od rastojanja prema izrazu:

$$f(z, r) = \frac{\frac{l}{2} - z}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{l}{2} - z\right)^2}} + \frac{\frac{l}{2} + z}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{l}{2} + z\right)^2}}, \quad (3.4)$$

gde je z rastojanje od centra kalema, a r poluprečnik kalema. Ubacivanjem izraza (3.4) u (3.3) dobija se:

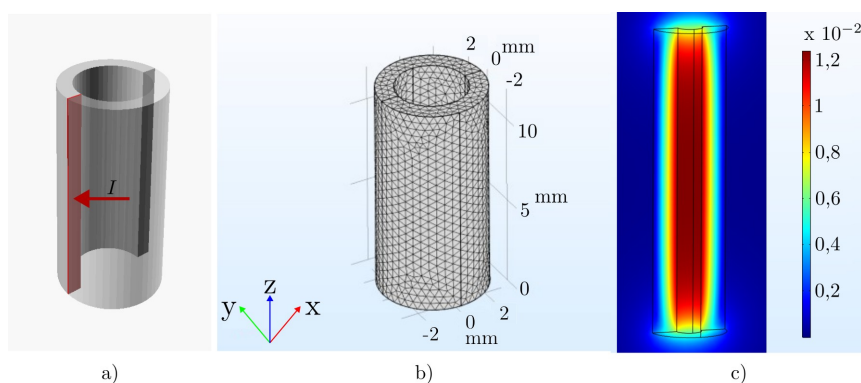
$$B(z) = \frac{\mu_0 N I}{2l} \left(\frac{\frac{l}{2} - z}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{l}{2} - z\right)^2}} + \frac{\frac{l}{2} + z}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{l}{2} + z\right)^2}} \right). \quad (3.5)$$

Na osnovu (3.5) može se dobiti izraz koji opisuje magnetno polje višeslojnoj cilindričnog vazdušnog kalema (detaljan postupak prikazan je u Dodatku A):

$$B(z) = \frac{\mu_0 N I}{2l(r_2 - r_1)} \left[\left(\frac{l}{2} - z \right) \ln \frac{r_2 + \sqrt{r_2^2 + \left(\frac{l}{2} - z\right)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{l}{2} - z\right)^2}} + \left(\frac{l}{2} + z \right) \ln \frac{r_2 + \sqrt{r_2^2 + \left(\frac{l}{2} + z\right)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{l}{2} + z\right)^2}} \right]. \quad (3.6)$$

Vrednost magnetnog polja koje se generiše kalemom takođe se može dobiti korišćenjem softvera COMSOL. U softveru je izvršena analiza raspodele magnetnog polja duž aksijalne ose kalema napravljenog od bakra, ranije navedenih geometrijskih parametara i 1000 namotaja. Telo kalema je izostavljeno iz simulacije jer je napravljeno od plastike koja nema magnetna svojstva. Oko kalema je postavljena sfera poluprecnika 50 cm ispunjena vazduhom, čime je ograničen domen simulacije. Ova vrednost poluprečnika je dovoljna da se obuhvati značajno magnetno polje u okolini kalema.

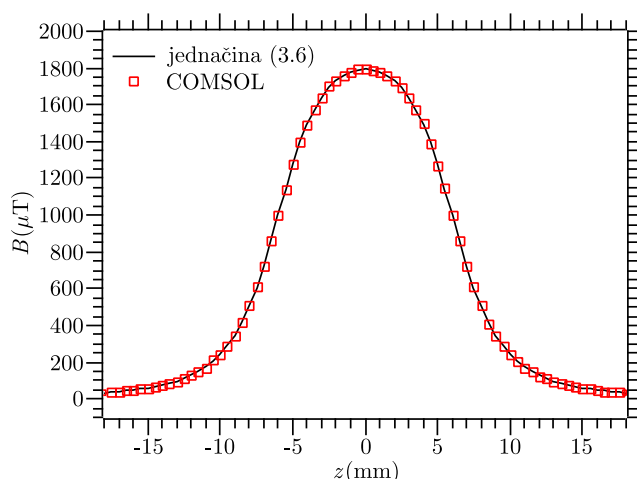
Analiza magnetnog polja je izvršena korišćenjem opcije *Multi-Turn Coil* sa konstantnom strujnom pobudom, kao što je prikazano na slici 15a, intenziteta 1 A. Pre numeričkog proračuna, definisani su odgovarajući granični uslovi koji definišu prostiranje elektromagnetnih talasa. Definisan je granični uslov *Magnetic Insulation* na površini sfere čime je obezbeđeno da van sfere nema linija magnetnog polja.



Slika 15: Projektovanje kalema u softveru COMSOL i prikaz raspodele magnetnog polja.

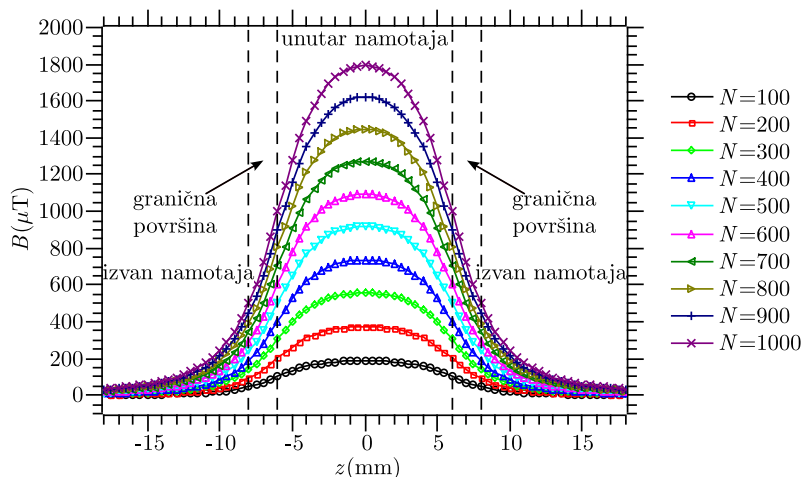
Nakon toga je izvršena diskretizacija kreiranjem odgovarajuće mreže elemenata koja se u softveru COMSOL sastoji od tetraedara. Ukupan broj elemenata je ključni faktor koji utiče i na brzinu i na preciznost numeričkog proračuna. Kada je broj elemenata veliki, simulacija može biti memorijski zahtevna i dugotrajna. Zbog toga je ključno uspostaviti ravnotežu između tačnosti rezultata i vremena proračuna. To se može postići izvođenjem testova konvergencije koji određuju potreban broj elemenata za prihvatljivu tačnost. U ovom slučaju, simulacija koristi oko 1,2 miliona elemenata mreže (slika 15b) generisanih korišćenjem opcije *Extremely Fine*. Konačno, intenzitet magnetnog polja unutar i izvan kalema može se videti na slici 15c.

Kako bi se proverila validnost analitički izračunatih vrednosti magnetnog polja koje se generiše kalemom urađene su simulacije za kalemове istih geometrijskih karakteristika, pri istoj strujnoj pobudi. Magnetno polje kalema koji sadrži 1000 namotaja izračunato korišćenjem izraza (3.6) i dobijeno simulacijom u softveru COMSOL prikazano je na slici 16.



Slika 16: Magnetno polje na aksijalnoj osi višeslojnog cilindričnog kalema formiranog od 1000 namotaja.

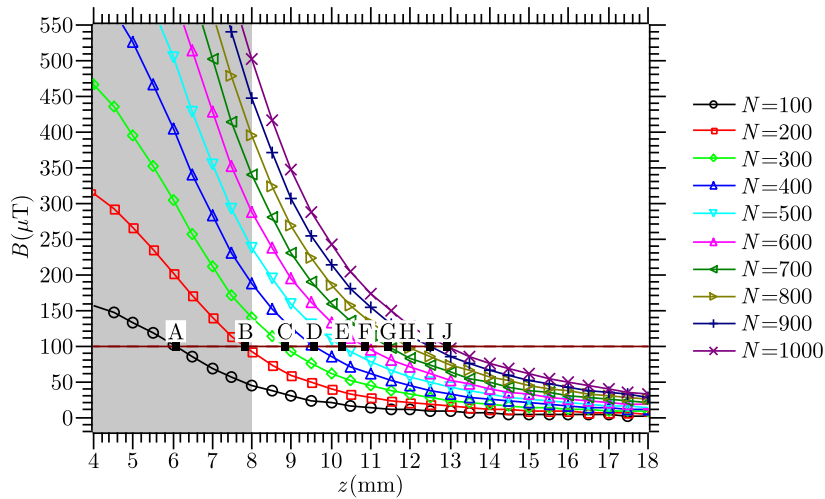
Dobijeni rezultati na ova dva načina imaju visok nivo podudaranja, kao što se može videti na slici. Vrednosti magnetnog polja na aksijalnoj osi deset različitih kalemova čiji su geometrijski parametri ranije navedeni, izračunato je korišćenjem izraza (3.6). Na osnovu izračunatih vrednosti nacrtane su krive raspodele magnetnog polja i prikazane na slici 17.



Slika 17: Raspodela magnetnog polja na aksijalnoj osi višeslojnih cilindričnih kalemova sa različitim brojem namotaja.

Magnetno polje ima najveći intenzitet u centru kalema, a njegova vrednost raste sa povećanjem broja namotaja. Međutim, kod kalemova sa većim brojem namotaja magnetno polje je konstantno na manjem rastojanju u odnosu na centar. Zbog malih dimenzija kalema senzor za merenje magnetnog polja se ne može postaviti unutar njega. Kako je debljina granične površine tela kalema $d_f = 2 \text{ mm}$, minimalno rastojanje na kome može izmeriti magnetno polje u odnosu na centar kalema $z = l/2 + d_f = 8 \text{ mm}$. Zbog toga je potrebno

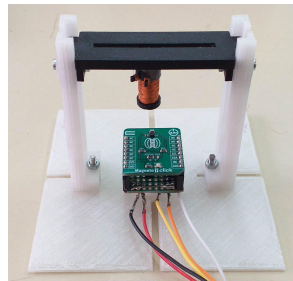
da jačina magnetnog polja koje se generiše bude $100 \mu\text{T}$ na rastojanju z koje je veće ili jednako 8 mm . To se može uraditi pronalaženjem tačke preseka između krive koje predstavlja magnetno polje generisano kalemom i prave koja predstavlja magnetno polje od $100 \mu\text{T}$, što je predstavljeno na slici 18.



Slika 18: Izračunata vrednost magnetnog polja na delu aksijalne ose višeslojnih cilindričnih kalemova sa različitim brojem namotaja.

Jačina magnetnog polja u svim označenim tačkama, od A do J, jednaka je $100 \mu\text{T}$. Kalemovima koji su napravljeni od 100 i 200 namotaja magnetno polje jačine $100 \mu\text{T}$ može se generisati samo na rastojanju manjem od 8 mm (deo slike označen sivom bojom). Kalemovi sa 300 ili više namotaja mogu generisati magnetno polje jačine $100 \mu\text{T}$ i izvan kalema tj. na rastojanju većem od 8 mm . Rastojanje od centra kalema na kome magnetno polje ima traženu jacinu raste sa povećanjem broja namotaja.

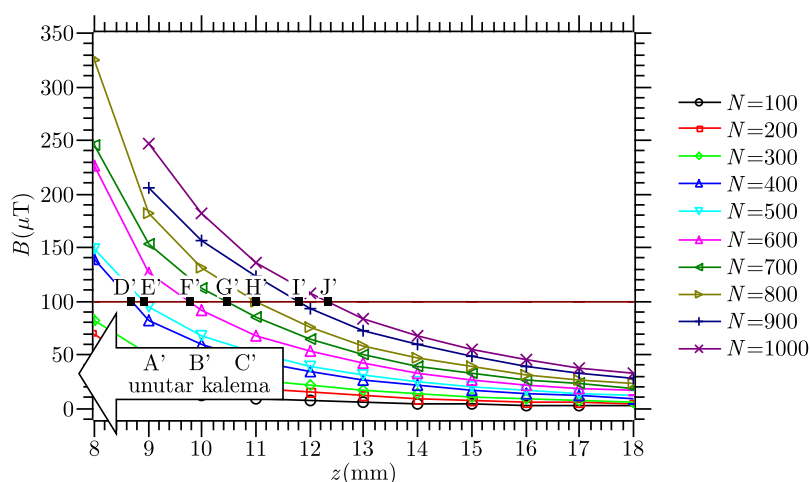
Za ekperimentalna merenja napravljen je držač kalema i senzora (slika 19). Kalem se postavlja iznad senzora tako da njegova aksijalna osa bude usmerena duž z -ose senzora.



Slika 19: Držač kalema i senzora za merenje magnetnog polja.

Držač je napravljen korišćenjem 3D štampača od istog materijala kao i telo kalema. Senzor je postavljen na donjoj strani držača, a kalem može da se pomera po vertikalnoj osi pomeranjem

gornje gredice držača. Propuštanjem konstantne struje kroz kalem i menjanjem rastojanja između kalema i senzora moguće je izmeriti jačinu magnetnog polja na istim rastojanjima za koja su urađena analitička izračunavanja. Izmerene vrednosti prikazane su na slici 20. Na slici izostaju vrednosti magnetnog polja na rastojanjima manjim od 8 mm od centra kalema, jer se senzor ne može postaviti unutar kalema.



Slika 20: Izmerena vrednost magnetnog polja na delu aksijalne ose višeslojnih cilindričnih kalema sa različitim brojem namotaja.

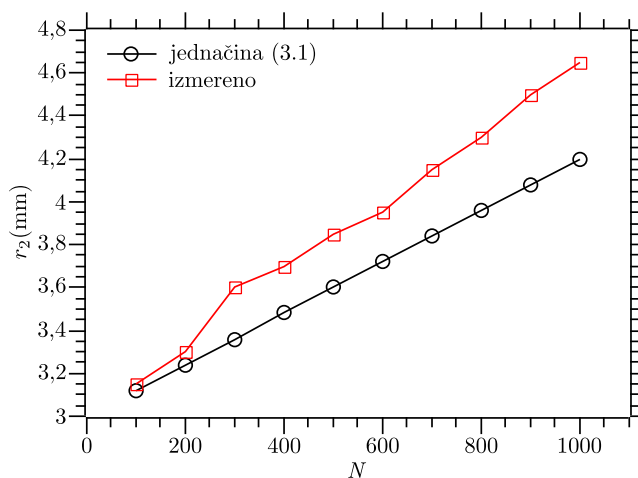
Magnetno polje jačine $100 \mu\text{T}$ ne može generisati izvan kalema zadatih dimenzija, pri proticanju struje od 20 mA , ukoliko je broj namotaja 100, 200 ili 300. Sa ovim brojem namotaja željena jačina magnetnog polja moguća je samo u unutrašnjosti kalema. Uzevši u obzir da je kalemom potrebno rekonstruisati magnetne potpise vozila i testirati rad detektora, kao i geometrijske parametre samog kalema, nema fizičkog smisla razmatrati magnetno polje unutar kalema. Iz tog razloga kalemovi koji imaju 300 ili manje namotaja dalje neće biti razmatrani. Pri rastojanju od $z = 8 \text{ mm}$ i kalemovima koji imaju 900 i 1000 namotaja jačina polja je veća od $340 \mu\text{T}$ što je maksimalna vrednost koja se može izmeriti korišćenim senzorom BM1422AGMV. Iz tog razloga na grafiku nedostaju dve vrednosti. Magnetno polje u tačkama od D' do J' ima isti jačinu kao u tačkama od D do J. Vrednosti rastojanja z za sve predstavljene tačke, uključujući i analitički izračunate i eksperimentalno izmerene, navedene su u tabeli 2.

Dobijene vrednosti pokazuju da napravljeni kalemovi generišu slabije magnetno polje, na istom rastojanju, nego što je to izračunato. U teorijskom modelu, tj. korišćenom analitičkom izrazu, smatra se da je kalem namotan tako da svaki sloj sadrži isti broj namotaja i da u jednom sloju nema preklapanja između namotaja. Međutim, pri praktičnoj realizaciji kalemovi su formirani nasumičnim motanjem, što dovodi do nejednakog broja namotaja u jednom sloju i preklapanja namotaja iz različitih slojeva. Zbog toga su vrednosti spoljašnjeg

Tabela 2: Rastojanje od centra kalema do tačke na aksijalnoj osi u kojoj je jačina magnetnog polja 100 μT .

Broj namotaja	Rastojanje od centra kalema po aksijalnoj osi, $z(\text{mm})$	
	Jednačina (3.6)	Izmereno
100	6,04 - unutar kalema	Ne može se izmeriti - unutar kalema
200	7,80 - unutar kalema	
300	8,81	
400	9,57	8,69
500	10,25	8,90
600	10,85	9,76
700	11,41	10,43
800	11,93	10,96
900	12,45	11,76
1000	12,92	12,32

poluprečnika kalemova različite od analitički izračunatih (slika 21), a samim tim je i na osnovu izraza (3.6) generisano magnetno polje slabije.



Slika 21: Izračunate i izmerene vrednosti spoljašnjeg poluprečnika kalemova sa različitim brojem namotaja.

Treba napomenuti da PLA materijal od koga je napravljeno kalemsko telo nema fero-magnetna svojstva tako da ne utiče na jačinu generisanog magnetnog polja. Za dalji dizajn generatora magnetnog polja izabran je kalem napravljen od 800 namotaja, a njegova izmerena otpornost je 38,22 Ω .

3.2.2 Konfigurisanje signal generatora

Kao što je već rečeno, magnetno polje generisano kalemom treba da ima isti talasni oblik kao izmereni magnetni potpis vozila. Signal generatorom RIGOL DG1022Z može se generisati napon proizvoljnog talasnog oblika (samim tim i struja koja protiče kroz opterećenje), na osnovu vrednosti upisanih u tekstualni fajl. Dakle, potrebno je kreirati fajl sa odgovarajućim vrednostima naponskih nivoa za pobudu kalema kako bi se generisalo odgovarajuće magnetno polje. Ovaj fajl sadrži 8192 vrednosti naponskih nivoa $V[n]$, gde je n redni broj vrednosti. Vrednosti su dobijene deljenjem izmerenih promena magnetnog polja ΔB_z koeficijentom k_1 :

$$V[n] = \frac{\Delta B_z[n]}{k_1}, 1 < n < N, \quad (3.7)$$

pri čemu je $N = 8192$. Vrednost $\Delta B_z[n]$ predstavlja razliku između izmerene vrednosti magnetnog polja i prethodne osnovne vrednosti, ili $B_z[n] - B_{base}[n - 1]$. Osnovna vrednost dobija se filtriranjem izmerenih vrednosti korišćenjem *slew rate limiter* filtra [66]. Sve dobijene vrednosti ΔB_z ubačene su u niz i 8192 odmerka dobijeno je metodom linearne interpolacije.

Kada je napon na izlazu signal generatora $V[n]$, kroz RL kolo će proticati struja $I[n]$ koja se može opisati izrazom:

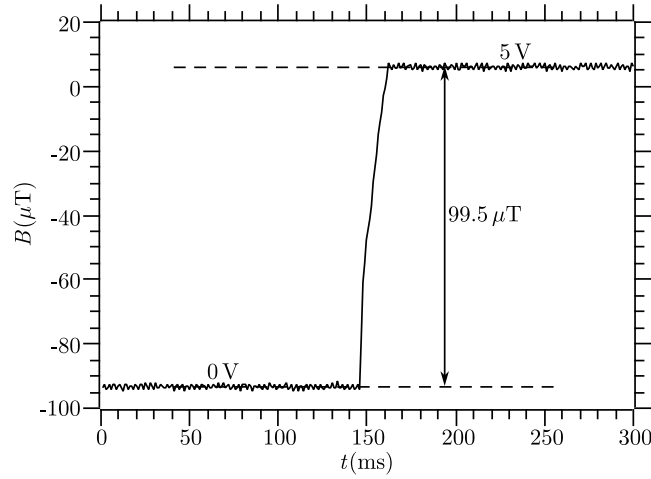
$$I[n] = \frac{V[n]}{R_{total}}, \quad (3.8)$$

pri čemu je $R_{total} = 249,27 \Omega$ i predstavlja ukupnu serijsku otpornost u RL kolu. To uključuje R_L , R_1 , R_2 i R_w , što predstavlja otpornost kalema, otpornost otpornika redno vezanih sa kalemom i otpornost provodnika korišćenih za povezivanje, respektivno. Otpornost R_{total} treba da ograniči struju koja protiče kroz kalem na 20 mA kada je napon na izlazu naponskog generatora 5 V.

Sa druge strane kada struja $I[n]$ protiče kroz odabrani kalem njime se generiše magnetno polje koje se može predstaviti kao:

$$B_g[n] = I[n] \cdot k_2. \quad (3.9)$$

Koeficijent k_2 predstavlja odnos proporcionalnosti između generisanog magnetnog polja i geometrijskih parametara kalema. Izabrani kalem generiše magnetno polje jačine 99,5 μT kada kroz njega protiče struja od 20,05 mA (slika 22), pa se može smatrati da je vrednost ovog koeficijenta 5 mT/A.



Slika 22: Magnetno polje generisano kalemom od 800 namotaja, na rastojanju $z = 11$ mm od centra kalema ($V = 5$ V, $I = 20,05$ mA).

Promena jačine magnetnog polja nije jednaka $100 \mu\text{T}$ zato što rastojanje od kalema do senzora nije tačno $10,96$ mm (kako je navedeno u tabeli 2), ali dobijena vrednost ima zadovoljavajuću preciznost. Zamenom izraza (3.7) u (3.8) dobija se:

$$I[n] = \frac{1}{R_{total}} \cdot \frac{\Delta B_z[n]}{k_1}, \quad (3.10)$$

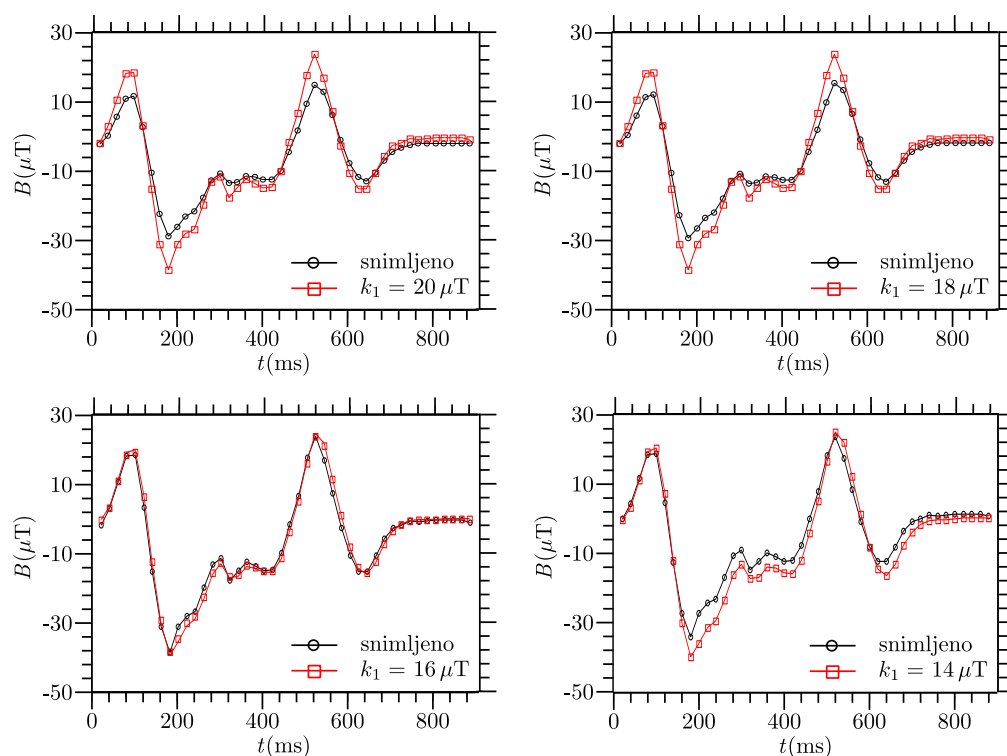
a kako generisano magnetno polje $B_g[n]$ treba da bude jednako izmerenom $\Delta B_z[n]$, koristeći izraze (3.9) i (3.10), dobija se:

$$\frac{1}{R_{total}} \cdot \frac{\Delta B_z[n]}{k_1} = \frac{B_g[n]}{k_2},$$

odnosno:

$$k_1 = \frac{k_2}{R_{total}}. \quad (3.11)$$

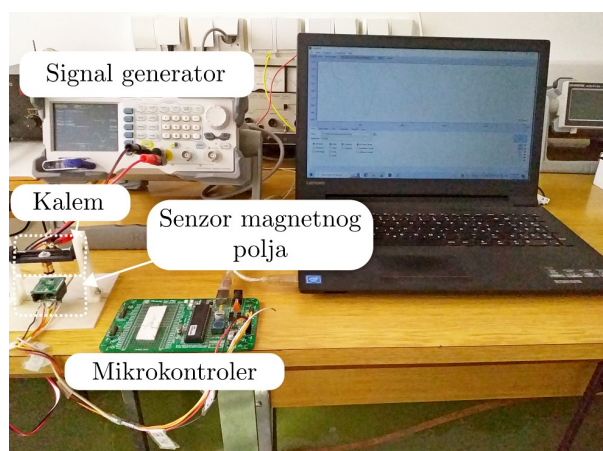
Izračunavanjem se dobija da je vrednost koeficijenta $k_1 = 20 \mu\text{T/V}$. Međutim, kada se korišćenjem ovog koeficijenta odrede vrednosti naponskih odmeraka koje generiše signal generator, generisano magnetno polje je manjeg intenziteta od izmerenog. Razlog za to je reaktivna komponenta (reaktansa) kalema, čija je vrednost različita od nule pri naizmeničnoj struji koja protiče kroz njega. Zbog toga vrednost koeficijenta k_1 treba da bude manja od izračunate. Iz navedenih jednačina se njegova vrednost ne može dobiti analitički. Iz tog razloga je određena eksperimentalno, metodom diskretne pretrage (*grid search*). Sa prikazanih grafika (slika 23) se vidi da je najbolje poklapanje između generisanih i izmerenih magnetnih potpisa dobija kada koeficijent k_1 ima vrednost $16 \mu\text{T/V}$.



Slika 23: Snimljeni i rekonstruisani magnetni potpisi vozila *VW Polo9N* pri različitim vrednostima koeficijenta k_1 .

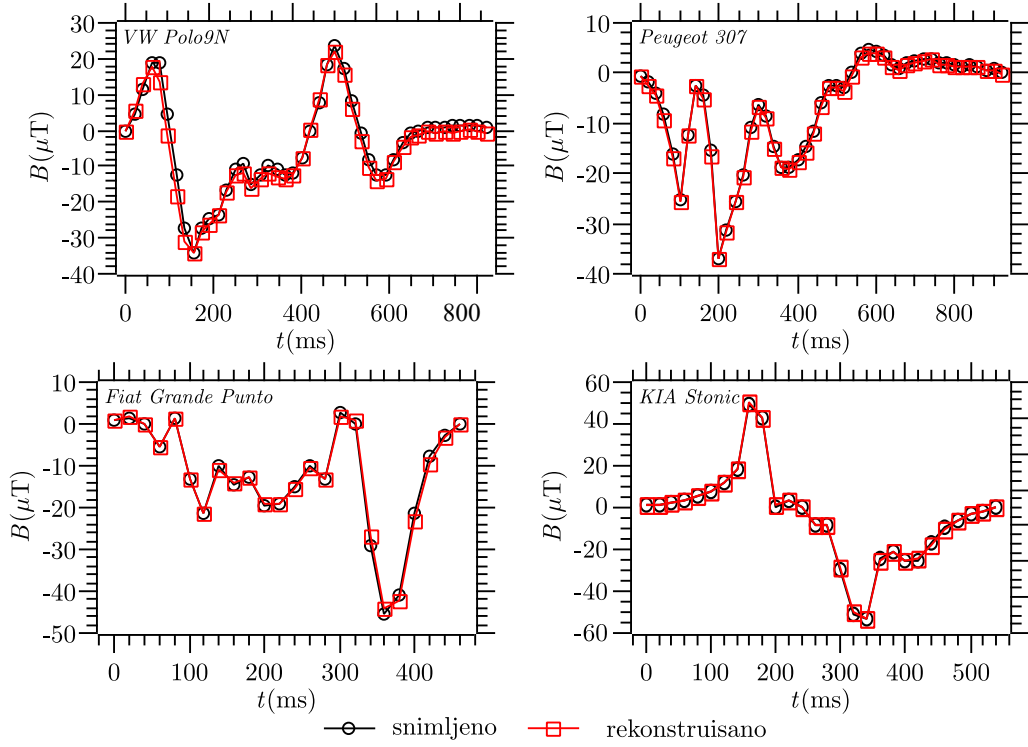
3.2.3 Generator magnetnog polja realizovan korišćenjem signal generatora i rekonstrukcija magnetnih potpisa

Praktična realizacija generatora magnetnog polja realizovanog korišćenjem signal generatora i kalema koji sadrži 800 namotaja, predstavljena je na slici 24. Mikrokontroler i senzor se koriste za merenje, a laptop za skladištenje i dalju obradu izmerenih vrednosti.



Slika 24: Realizacija generatora magnetnog polja korišćenjem signal generatora i kalema.

Na osnovu snimljenih magnetnih potpisa, za četiri navedena vozila, kreirani su fajlovi na osnovu kojih signal generator generiše odgovarajuće talasne oblike napona. Dovođenjem ovih talasnih oblika napona na kalem izvršena je rekonstrukcija magnetnih potpisa vozila. Izmereni magnetni potpisi i magnetni potpisi rekonstruisani opisanim generatorom prikazani su na slici 25.



Slika 25: Snimljeni i rekonstruisani magnetni potpisi vozila. Rekonstrukcija je izvršena korišćenjem generatora magnetnog polja baziranog na signal generatoru.

Kako bi se potvrdilo da li se realizovani generator može koristiti za rekonstrukciju magnetnih potpisa, tj. u kojoj meri se rekonstruisani potpisi podudaraju sa snimljenim upotrebene su dve matematičke operacije. Prva je korelacija između izmerenih i rekonstruisanih magnetnih potpisa. Pirsonov (*Pearson*) korelacioni koeficijent $r_{X,Y}$ opisuje stepen linearne korelacije između dve funkcije odnosno skupa podataka [67]. Pri potpunoj korelaciji ima vrednost jedan, a može se izračunati pomoću sledeće jednačine:

$$r_{X,Y} = \frac{N \sum_{n=1}^N X[n]Y[n] - \left(\sum_{n=1}^N X[n] \right) \left(\sum_{n=1}^N Y[n] \right)}{\sqrt{N \sum_{n=1}^N X^2[n] - \left(\sum_{n=1}^N X[n] \right)^2} \sqrt{N \sum_{n=1}^N Y^2[n] - \left(\sum_{n=1}^N Y[n] \right)^2}}. \quad (3.12)$$

U prikazanoj jednačini $X[n]$ predstavlja rekonstruisanu vrednost, a $Y[n]$ izmerenu vrednost magnetnog polja, pri čemu je N ukupan broj vrednosti. Međutim, linearna korelacija opisuje odnos linearnosti između dva skupa podataka, ali ne pruža garanciju da su dva talasna oblika jednaka. Zbog toga je za upoređivanje talasnih oblika, iskorišćena i druga funkcija koja opisuje srednje kvadratnu grešku (*Root-Mean Square Error* - RMSE) [68], opisana izrazom:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{n=1}^N \frac{(X[n] - Y[n])^2}{N}}. \quad (3.13)$$

Izračunate vrednosti linearne korelacije i srednje kvadratne greške su prikazane u tabeli 3. Na osnovu njih se može videti da postoji visok nivo linearne korelacije kao i visok nivo jednakosti između snimljenih i rekonstruisanih magnetnih potpisa. Stoga se može smatrati da je opisani princip formiranja kalema i konfiguracije signal generatora adekvatan za kreiranje generatora kojim se mogu rekonstruisati magnetni potpisi različitih vozila.

Tabela 3: Poređenje snimljenih i rekonstruisanih magnetnih potpisa različitih vozila. Rekonstrukcija je izvršena generatorom magnetnog polja (signal generator i kalem).

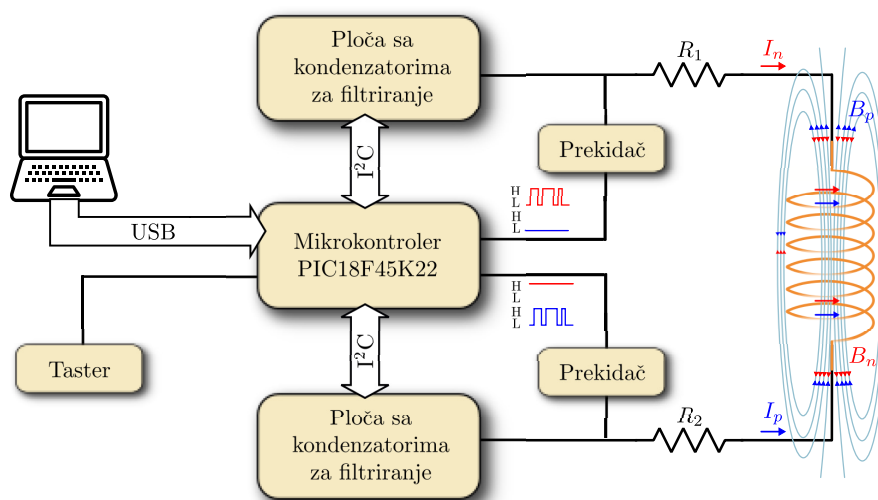
Vozilo	$r_{X,Y}$	RMSE
<i>VW Polo9N</i>	0,9932	2,0576
<i>Peugeot 307</i>	0,9995	0,4705
<i>Fiat Grande Punto</i>	0,9988	0,8407
<i>KIA Stonic</i>	0,9997	0,4996

3.3 Generisanje magnetnih potpisa korišćenjem mikrokontrolera i kalema

Generator magnetnih potpisa, sastavljen od laboratorijskog signal generatora RIGOL DG1022Z i kalema, opisan u prethodnom delu disertacije, precizno rekonstruiše magnetne potpise, ali ima određena funkcionalna ograničenja. Magnetni potpis je unapred definisan sadržajem fajla iz koga signal generator čita podatke, a koji je definisan pre početka simulacije. Kako fajl sadrži 8192 vrednosti, postoji ograničen broj vozila čiji se magnetni potpisi mogu rekonstruisati u toku jedne simulacije. Brzina kretanja vozila kao i vremenski interval između dva susedna vozila definiše se odabirom perioda signala koji kreira signal generator, što dovodi do toga da se vrednost ova dva parametra srazmerno menja. Za pojedinačne

promene ovih vrednosti neophodno je promeniti sadržaj fajla. Dakle, opisani generator je efikasan za rekonstrukciju magnetnog potpisa pojedinačnih vozila, ali ne i za simulaciju realnog toka saobraćaja.

Generator magnetnog polja, čija je blok šema prikazana na slici 26 sadrži mikrokontroler umesto signal generatora. To treba da omogući da se bez prekidanja procesa simulacije odaberu parametri narednog vozila, uključujući tip vozila, brzinu kretanja, kao i vremenski interval između dva susedna vozila. Takođe, ovim generatorom treba obezbediti da navedeni parametri mogu imati proizvoljne vrednosti kako bi se simulirao realni tok saobraćaja [69].



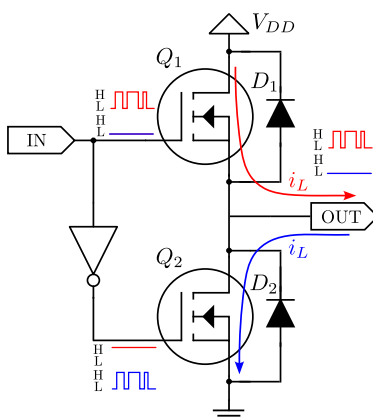
Slika 26: Blok šema generatora magnetnog polja sastavljenog od mikrokontrolera i kalema.

Generator ima dva režima rada. U prvom režimu, generator (mikrokontroler) dobija uputstva o parametrima vozila čiji magnetni potpis treba da rekonstruiše preko laptopa putem USB komunikacije. U drugom režimu rada, koji se aktivira pritiskom tastera, generator proizvoljno bira broj vozila, tip vozila, brzinu kretanja i vremenski interval između dva susedna vozila da bi simulirao realni tok saobraćaja. Navedeni parametri su definisani u okviru određenih opsega vrednosti i upisani u memoriji mikrokontrolera.

Za razliku od prethodno opisanog generatora magnetnog polja, u ovom slučaju se na kalem dovodi PWM signal. Time se kroz kalem propušta struja proizvoljnog talasnog oblika, pri čemu kalem generiše magnetno polje, čiji je talasni oblik isti talasnom obliku struje. PWM signal se može generisati na različite načine. Postoje komercijalna integrisana kola koja se koriste za podešavanja nivoa osvetljenja kod svetlosnih izvora napravljenih od LED (*Led Emitting Diode*) dioda [70]. Ostale primene obuhvataju kontrolu elektromagneta unutar kontaktora [71], pogon i kontrolu DC (*Direct Current*) motora [72] i kontrolu izlaznog napona izvora napajanja pri različitom opterećenju [73] i promenljivom izlaznom naponu [74]. PWM

signal takođe se može implementirati korišćenjem FPGA (*Field Programmable Gate Area*) arhitekture [75]. PWM signal, kojim se u cilju rekonstrukcije magnetnih potpisa pobuđuje kalem, kreira se mikrokontrolerom.

Pomoću dva identična prekidača vrši se kontrola smera struje kroz kalem, a ujedno se i sprečava da napon suprotnog polariteta indukovao kalemom dođe do mikrokontrolera. Električno kolo prekidača je prikazano na slici 27, a sastoji se od dva NMOSFET (*N-channel Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) tranzistora, dve silicijumske poluprovodničke diode i invertorskog kola. Mikrokontroler generiše dva PWM signala koji se dovode na ulaze prekidača. Ako je na ulazu jednog prekidača (gejt tranzistora Q_1) visok naponski nivo tranzistor radi kao otvoreni prekidač, dok tranzistor Q_2 tada radi kao zatvoreni prekidač, jer na njegov gejt tada dolazi nizak naponski nivo (uticaj invertora). Dovodeњem visokog naponskog nivoa na ulaz prvog prekidača, istovremeno se na ulaz drugog prekidača dovodi nizak naponski nivo. Time se postiže da u drugom prekidaču tranzistor Q_1 radi kao otvoreni, a tranzistor Q_2 kao zatvoreni prekidač. Kako je u svakom od prekidača u provodnom stanju po jedan tranzistor struja kroz kalem će proticati u jednom smeru. Dovodeњem signala suprotnog polariteta od navedenog na ulaze prekidača, obezbeđuje se proticanje struje kroz kalem u suprotnom smeru, i generiše magnetno polje suprotnog polariteta.



Slika 27: Električno kolo prekidača kojim se vrši kontrola proticanja struje kroz kalem.

Kondenzatori za filtriranje imaju ulogu da smanje intenzitet naglih promena struje kroz kalem koje nastaju zbog impulsne pobude. Izračunavanje kapacitivnosti ovih kondenzatora, kao i dizajn električnog kola i štampane ploče koja se povezuje sa mikrokontrolerom biće detaljno opisani u nastavku. Otpornici koji su povezani redno sa kalemom imaju ulogu da ograniče jačinu struje koja protiče kroz kalem. Sve komponente generatora rade pri naponu napajanja $V_{DD} = 5\text{ V}$.

3.3.1 Generisanje PWM signala mikrokontrolerom

Talasni oblik magnetnog polja koji generiše kalem je proporcionalan jačini struje koja kroz njega protiče, a koja zavisi od srednje vrednosti napona PWM signala. Postoji tri načina kojima je moguće ostvariti podešavanje srednje vrednosti napona PWM signala: prvi, promenom frekvencije signala pri konstantnoj vrednosti faktora ispunje impulsa (*Duty Cycle* - DTC); drugi, promenom faktora ispunje impulsa pri konstantnoj frekvenciji; i treći, promenom i frekvencije i faktora ispunje impulsa. Faktor ispunje impulsa PWM signala predstavlja količnik trajanja visokog naponskog nivoa i trajanja celog impulsa. Pri projektovanju PWM signala mikrokontrolerom iskorišćen je princip u kome je frekvencija impulsa konstantna, a faktor ispunje se menja. Promenom faktora ispunje dolazi do promene srednje vrednosti struje koja protiče kroz kalem, a time i do promene magnetnog polja koje se njime generiše [76].

Kako bi se mikrokontrolerom generisao odgovarajući PWM signal, neophodno je utvrditi zavisnost između faktora ispunje impulsa i jačine magnetnog polja koje je potrebno generisati kalemom. To uključuje tri koraka:

1. Snimanje magnetnog potpisa i izračunavanje magnitude magnetnog polja;
2. Izdvajanje pozitivnih i negativnih vrednosti promena magnetnog polja iz magnitude;
3. Transformisanje izdvojenih vrednosti u faktor ispunje PWM signala.

Snimanje magnetnog potpisa i izračunavanje magnitude magnetnog polja

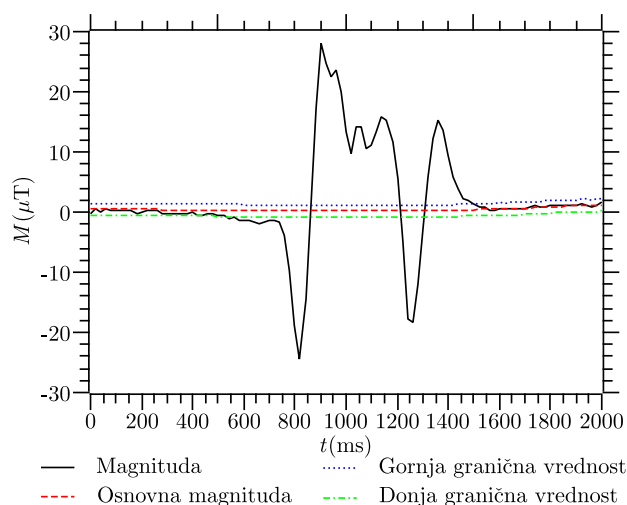
Magnituda magnetnog polja (M) se izračunava na osnovu izmerenih vrednosti magnetnog polja po svim osama merenja koristeći jednačinu:

$$M = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}, \quad (3.14)$$

u kojoj B_x , B_y i B_z predstavljaju magnetnu indukciju po x , y i z osi, respektivno.

Posmatranjem promena magnitude se može tačnije odrediti trajanje magnetnog potpisa, jer se magnetno polje ne menja istovremeno na svim osama merenja pri prolasku vozila. Vrednost magnitude u odsustvu vozila naziva se osnovna magnituda. Promena magnitude predstavljena na slici 28 izračunata je na osnovu izmerenih vrednosti magnetnog polja pri prolasku vozila *VW Polo9N* iznad senzora.

Ako je vrednost magnitude veća od gornje, ili manja od donje granične vrednosti smatra se da je u zoni osetljivosti senzora prisutan feromagnetni materijal. Gornja i donja granična vrednost se biraju u zavisnosti od primene i zahtevane preciznosti. Pri posmatranju promena



Slika 28: Promena magnetude magnetnog polja pri prolasku vozila *VW Polo9N*.

magnitude magnetnog polje pri prolasku vozila uzeto je da je vrednosti gornje granične vrednosti veća, a donje manja, od osnovne magnitude za $1 \mu\text{T}$. Na prikazanoj slici t_1 označava trenutak nailaska vozila, a u trenutku t_2 se smatra da vozilo više nije u zoni osetljivosti senzora.

Izdvajanje pozitivnih i negativnih vrednosti promena magnetnog polja iz magnetnog potpisa

PWM signal koji se koristi za kontrolu protoka struje kroz kalem, u cilju rekonstrukcije magnetnih potpisa, sastoji se od 100 impulsa, dok DTC impulsa zavisi od razlike između izmerene i osnovne vrednosti magnetnog polja. Magnetni potpis vozila predstavlja skup svih vrednosti magnetnog polja po z -osi za koje je izračunata vrednost magnitude izvan opsega graničnih vrednosti.

Ako je broj ovih vrednosti manji od 100, skup se upotpunjuje linearnom interpolacijom. Sa druge strane, ako se merenjem dobije više vrednosti nego što je potrebno, proces decimacije se koristi da se broj vrednosti smanji na 100. Nakon interpolacije ili decimacije vrši se zaokruživanje izmerenih vrednosti na najbližu celobrojnu vrednost. Izdvojene vrednosti se ubacuju u niz koji se može napisati kao:

$$\Delta B_z = \left[B_z[1] - B_z[0], \dots, B_z[n] - B_z[0], \dots, B_z[N] - B_z[0] \right], n \in 1, N$$

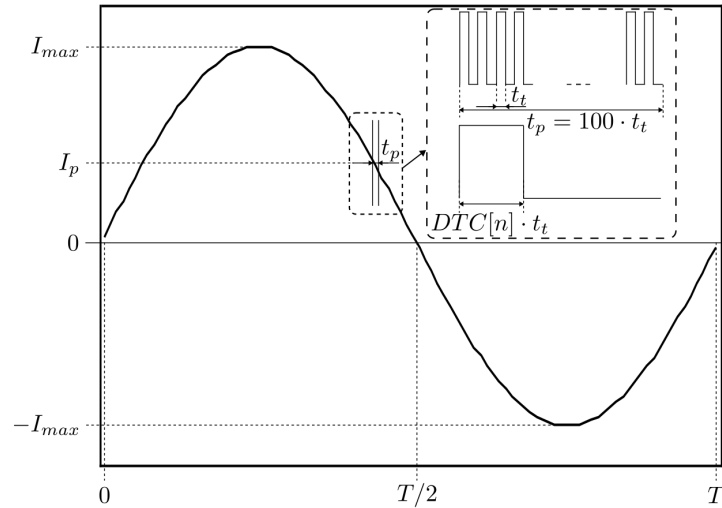
gde $B_z[0]$ predstavlja osnovnu vrednost magnetnog polja (izmerena vrednosti bez prisutva feromagnetnog materijala), $B_z[n]$ je n -ta izmerena vrednost tokom prolaska vozila, a N broj vrednosti. Na osnovu izmerenih vrednosti i navedenih operacija dobijen je niz:

Ako je vrednost bar jednog elementa oba niza veća od $100 \mu\text{T}$, sve vrednosti se skaliraju množenjem koeficijentom k ($\%/ \mu\text{T}$), čija se vrednosti se izračunava sledećom jednačinom:

$$k = \begin{cases} 1 & \forall \Delta B_{z_p}[n] \leq 100 \wedge \forall \Delta B_{z_n}[n] \leq 100 \\ \text{round}\left(\frac{100}{\Delta B_{z_{p,n}}}\right) & \exists \Delta B_{z_p}[n] > 100 \vee \exists \Delta B_{z_n}[n] > 100 \end{cases} \quad \forall n \in \{1, N\} \quad (3.19)$$

U prikazanom primeru magnetnog potpisa, nijedna vrednost iz nizova B_{z_p} i B_{z_n} nije veća od 100, pa je $k = 1$, a $DTC_{z_p} = \Delta B_{z_p}$ i $DTC_{z_n} = \Delta B_{z_n}$.

Nakon određivanja faktora ispune opisanim postupkom, sledeći korak je razvoj softvera mikrokontrolera, koji treba da radi kao generator PWM signala [77, 78]. Impulsi promenljivog faktora ispune kreiraju se u okviru prekidne rutine upotrebom internog tajmera mikrokontrolera, čiji je period t_t . Na početku prekidne rutine izvod mikrokontrolera se postavlja na visok naponski nivo, što ujedno predstavlja početak impulsa. Trajanje visokog naponskog nivoa zavisi od ranije određenog faktora ispune trenutnog impulsa, i može se predstaviti kao $T_{ON} = DTC_{z_{p,n}} \cdot t_t$. Nakon što mikrokontroler $DTC_{z_{p,n}}$ puta uđe u prekidnu rutinu završava se visok naponski nivo trenutnog impulsa, i do kraja perioda impulsa na izvodu mikrokontrolera je nizak naponski nivo. Period tajmera t_t je 100 puta manji od perioda jednog impulsa PWM signala t_p , čime se omogućava podešavanje faktora ispune sa preciznošću od 1%. Rekonstrukcija signala dobija se generisanjem 100 impulsa, tako da je $T = 100 \cdot t_p$. Na slici 29 je predstavljen primer generisanja struje sinusnog talasnog oblika kroz kalem opisanim načinom.



Slika 29: Struja sinusnog oblika generisana PWM signalom promenljivog faktora ispune korišćenjem mikrokontrolera.

Kada je vrednost faktora ispunje jednaka 100/nula, kroz kalem protiče maksimalna/minimalna vrednost struje ($I_{max}, 0$). Maksimalna negativna vrednost struje ($-I_{max}$) dobija se drugim PWM signalom, koji se generiše na isti način, na drugom izvodu mikrokontrolera.

Pod pretpostavkom da je period PWM signala (T_{PWM}) jednak trajanju promena magnetnog polja koje treba generisati, tada se njegova frekvencija može izračunati sledećom jednačinom:

$$f_{PWM} = \frac{1}{T_{PWM}} = \frac{1}{t_p \cdot 100} = \frac{1}{t_t \cdot 100 \cdot 100}, \quad (3.20)$$

što je ujedno i maksimalna frekvencija koja se može generisati. Ukoliko je potrebno generisati signal čija je frekvencija manja od maksimalne, onda se generiše više od 100 impulsa (N_p), pri čemu se isti impuls generiše više puta:

$$f_{PWM} = \frac{1}{T_{PWM}} = \frac{1}{t_p \cdot N_p} = \frac{1}{t_t \cdot 100 \cdot N_p}. \quad (3.21)$$

Na ovaj način se period generisanog signala povećava, a da pritom njegov talasni oblik ostaje nepromenjen. Prekidna rutina unutar mikrokontrolera pokreće se kada interni tajmer dostigne maksimalnu vrednosti t_t . U nastavku je prikazan kôd prekidne rutine [79].

```

If Timer_Interrupt = true Then
    If Timer_Cnt = 100 Then
        Reset Timer_Cnt
        High Generator_pin
    Endif
    If Timer_Cnt = DTC[ Current_Pulse_Cnt ] Then
        Low Generator_pin
    Endif
    Inc Timer_Cnt
    Inc Timer_Cnt_of_Current_Pulse
    If Timer_Cnt_of_Current_Pulse = Total_Timer_Cnt_of_Current_Pulse Then
        Reset Timer_Cnt_of_Current_Pulse
        Reset Timer_Cnt
        Inc Current_Pulse_Cnt
    Endif
    If Current_Pulse = Total_number_of_pulses Then
        Reset Current_Pulse_Cnt
        Timer_Interrupt = false
    Endif
Endif

```

Mikrokontroler započinje generisanje PWM signala omogućavanjem rada prekidne rutine. Na početku prekine rutine se ispituje da li je broj njenog ponavljanja u toku generisanja

jednog impulsa dostigao maksimalnu vrednost (100). Ako je taj uslov ispunjen, prelazi se na generisanje narednog impulsa. Resetuje se vrednost brojača koji beleži broj izvršavanja prekidne rutine, a izvod mikrokontrolera na kome se generiše PWM signal se postavlja na visok naponski nivo. Zatim se ispituje da li je broj ponavljanja prekidne rutine dostigao vrednost faktora ispune trenutnog impulsa, da bi se u slučaju ispunjenosti uslova izvod mikrokontrolera postavio na stanje niskog naponskog nivoa, u kome ostaje do kraja generisanja trenutnog impulsa. Nakon ispitivanja ovih uslova vrednost brojača koji označava broj ponavljanja prekidne rutine se inkrementira. Na ovom mestu se takođe inkrementira i vrednost brojača kojim se beleži broj ponavljanja prekidne rutine radi upoređivanja sa ukupnim brojem njenog izvršavanja (za ranije pomenuti slučaj opisan jednačinom (3.21). Kada se impuls generiše dovoljan broj puta vrednost oba brojača se resetuje, a inkrementira se vrednost brojača kojim se označava redni broj impulsa. Na kraju, kada se generišu svi impulsi vrednost brojača rednog broja impulsa se resetuje i isključuje se upotreba prekidne rutine sve do ponovne potrebe za generisanjem PWM signala.

Za izvršavanje opisane prekidne rutine, pri taktnoj frekvenciji mikrokontrolera od 64 MHz, potrebno je $7\mu\text{s}$. Period tajmera t_t mora biti veći od ove vrednosti kako bi se izvršile sve operacije opisane kôdom u prekidnoj rutini. Iz tog razloga je pri programiranju mikrokontrolera selektovan period tajmera $t_t = 10\mu\text{s}$, čime se dobija da je frekvencija PWM signala $f_{PWM} = 1000\text{ Hz}$.

3.3.2 Izračunavanje kapacitivnosti filtarskih kondenzatora i dizajn štampane ploče

Pri pubudi kalema PWM signalom dolazi do indukovanja napona suprotnog polariteta i naglih promena struje. Kondenzator, povezan jednim krajem na kalem i drugim na čvor nultog potencijala, smanjuje ove promene tako što akumulira energiju tokom visokog naponskog nivoa i predaje je kalemu tokom niskog naponskog nivoa. Zbog protoka struje kroz kalem u oba smera potrebno je povezati dva kondenzatora istih kapacitivnosti, po jedan na svakoj strani kalema. Vrednost kapacitivnosti kondenzatora zavisi od frekvencije i faktora ispune PWM signala, a može se odrediti na tri načina:

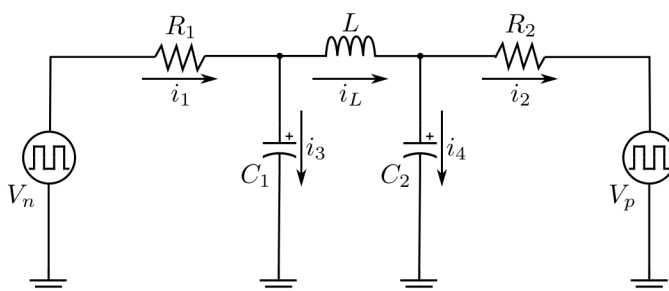
1. Analitičkim izračunavanjem korišćenjem diferencijalnih jednačina;
2. Upotrebom inverzne Laplasove transformacije u softveru *Mathematica*;
3. Korišćenjem softvera za simulaciju rada analognih električnih kola *LTspice*.

Radi jednostavnije analize električnih šema koje će biti prikazane u nastavku, za generisanje PWM signala, umesto mikrokontrolera iskorišćena su dva impulsa generatora.

Izračunavanje kapacitivnosti kondenzatora korišćenjem diferencijalnih jednačina

Promena struje kroz kalem u zavisnosti od vrednosti njegove induktivnosti i kapacitivnosti kondenzatora može se opisati diferencijalnom jednačinom. Kako električno kolo generatora magnetnog polja, prikazano na slici 30, sadrži tri reaktivna elementa (kalem i dva kondenzatora), izračunavanje struje kroz kalem vrši se preko diferencijalne jednačine trećeg reda:

$$LR_1R_2C_1C_2\frac{d^3i_L}{dt^3} + L(R_1C_1 + R_2C_2)\frac{d^2i_L}{dt^2} + (L + R_1R_2(C_1 + C_2))\frac{di_L}{dt} + (R_1 + R_2)i_L = R_2C_2\frac{dV_n}{dt} + R_1C_1\frac{dV_p}{dt} + V_n - V_p. \quad (3.22)$$



Slika 30: Električna šema generatora magnetnog polja.

U jednačini (3.22) L je induktivnost kalema, C_1 i C_2 su kapacitivnosti kondenzatora, R_1 i R_2 otpornici kojima se ograničava jačina struje, a V_n generator impulsa kojim struja kroz kalem propušta u jednom smeru i generišu negativne promene magnetnog polja, dok se generatorom V_p postiže suprotan smer proticanja struje i pozitivne promene magnetnog polja. Detaljan postupak dobijanja ove jednačine prikazan je u Dodatku B. Zbog toga što rešavanje ove jednačine zahteva složen matematički proračun, vrednosti kapacitivnosti kondenzatora su određene na druga dva načina opisana u nastavku.

Primena inverzne Laplasove transformacije za dobijanje kapacitivnosti kondenzatora

Drugi način za određivanje kapacitivnosti kondenzatora je simulacijom protoka struje koja protiče kroz kalem, u električnom kolu sa slike 30, primenom inverzne Laplasove transformacije. Simulacije su vršene u softveru *Mathematica*, pri čemu je struja kroz kalem i_L izračunata metodom superpozicije, kao zbir struja i_L' i i_L'' . Strujom i_L' generišu se negativne promene magnetnog polja kada je generator V_n aktivan, a generator V_p zamenjen kratkim spojem, što se može opisati izrazom:

$$i_L' = \frac{V_n}{\left(\frac{R_2}{R_2 j\omega C_2 + 1} + j\omega L \right) \frac{1}{j\omega C_1} + R_1} \cdot \frac{\frac{1}{j\omega C_1}}{\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{R_2}{R_2 j\omega C_2 + 1} + j\omega L} \quad (3.23)$$

U prikazanoj jednačini ω predstavlja kružnu učestanost i izračunava se kao $\omega = 2\pi f$, gde je f frekvencija PWM signala. Zamenom uloga generatora, tj. kada je generator V_p aktivan, a generator V_n zamenjen kratkim spojem, dobija se struja i_L'' , pri kojoj kalem generiše pozitivne promene magnetnog polja, opisana jednačinom:

$$i_L'' = \frac{V_p}{\left(\frac{R_1}{R_1 j\omega C_1 + 1} + j\omega L \right) \frac{1}{j\omega C_2} + R_2} \cdot \frac{\frac{1}{j\omega C_2}}{\frac{1}{j\omega C_2} + \frac{R_1}{R_1 j\omega C_1 + 1} + j\omega L} \quad (3.24)$$

Sabiranjem jednačina (3.23) i (3.24) dobija se ukupna struja koja protiče kroz kalem u toku generisanja magnetnog polja:

$$i_L = \frac{V_n}{\left(\frac{R_2}{R_2 j\omega C_2 + 1} + j\omega L \right) \frac{1}{j\omega C_1} + R_1} \cdot \frac{\frac{1}{j\omega C_1}}{\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{R_2}{R_2 j\omega C_2 + 1} + j\omega L} + \frac{V_p}{\left(\frac{R_1}{R_1 j\omega C_1 + 1} + j\omega L \right) \frac{1}{j\omega C_2} + R_2} \cdot \frac{\frac{1}{j\omega C_2}}{\frac{1}{j\omega C_2} + \frac{R_1}{R_1 j\omega C_1 + 1} + j\omega L} \quad (3.25)$$

Impulsi koje generišu generatori V_n i V_p mogu se predstaviti kao povorka pojedinačnih impulsa, a svaki impuls kao razlika Hevisajdovih funkcija $H(t)$. Prvi impuls generatora V_n je razlika između $H(0)$ i Hevisajdove funkcije sa kašnjenjem za $t_n[0]$, tj. $H(0 + t_n[0])$. Drugi je razlika $H(T) - H(T - t_n[1])$, itd., sve do poslednjeg impulsa $H(99T) - H(99T - t_n[99])$. Period jednog impulsa je T , a trajanje visokog naponskog nivoa prvog, drugog i poslednjeg impulsa je $t_n[0]$, $t_n[1]$ i $t_n[99]$, respektivno. Ove vrednosti su direktno proporcionalne faktoru ispune PWM signala. Laplasova transformacija ukupne struje kroz kalem je:

$$i_L = \sum_{n=0}^{99} \frac{V_n \left(\frac{e^{-snT}}{s} - \frac{e^{-s(nT + t_n[n])}}{s} \right)}{\left(\frac{R_2}{R_2 sC_2 + 1} + sL \right) \frac{1}{sC_1} + R_1} \cdot \frac{\frac{1}{sC_1}}{\frac{1}{sC_1} + \frac{R_2}{R_2 sC_2 + 1} + sL} + \sum_{n=0}^{99} \frac{V_p \left(\frac{e^{-snT}}{s} - \frac{e^{-s(nT + t_p[n])}}{s} \right)}{\left(\frac{R_1}{R_1 sC_1 + 1} + sL \right) \frac{1}{sC_2} + R_2} \cdot \frac{\frac{1}{sC_2}}{\frac{1}{sC_2} + \frac{R_1}{R_1 sC_1 + 1} + sL} \quad (3.26)$$

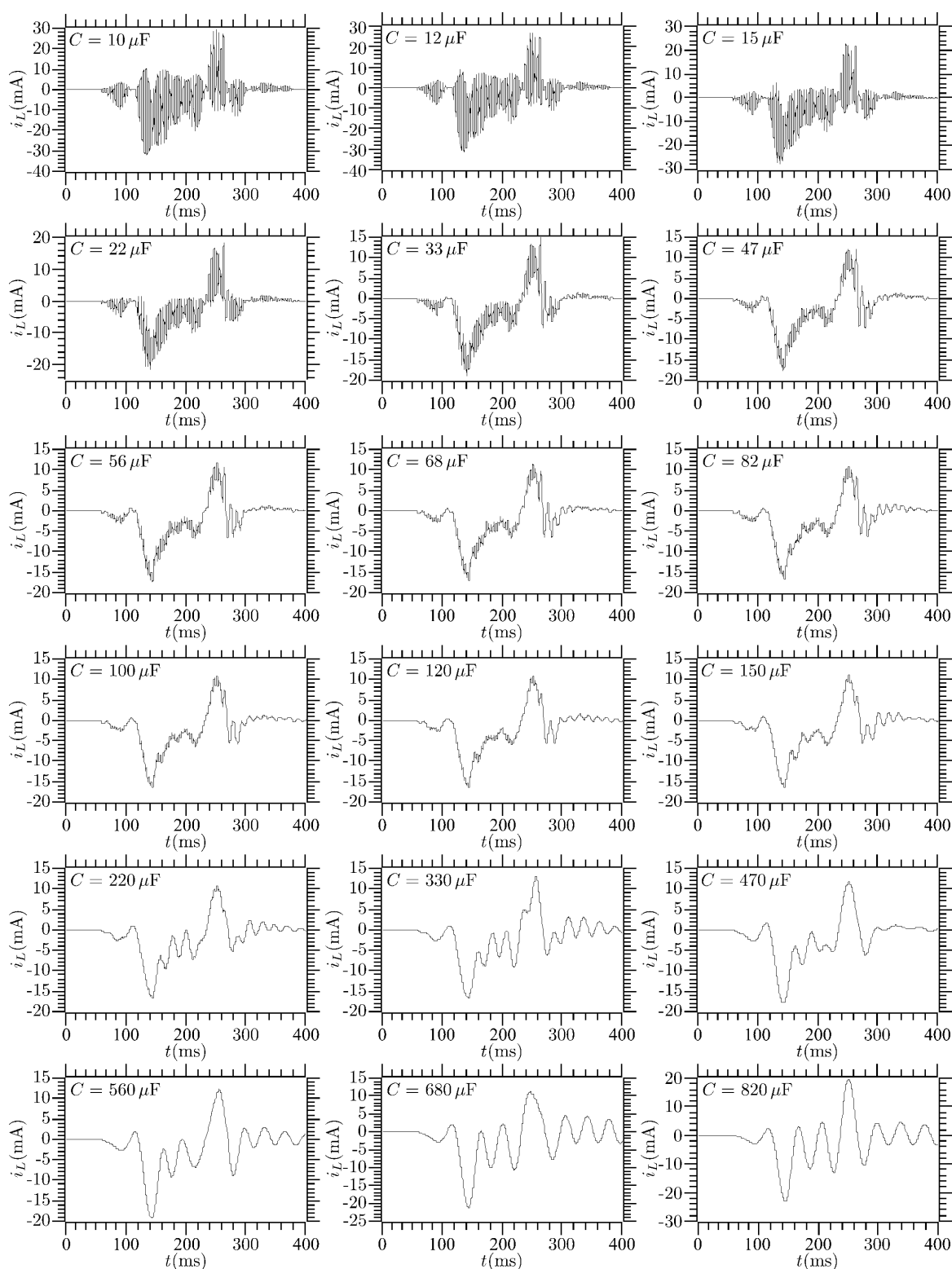
Impulsi generatora V_p dobijeni su na isti način kao impulsi generatora V_n . Redni broj impulsa je označen sa n , a $t_p[n]$ je trajanje visokog naponskog nivoa n -tog impulsa generatora V_p . U Dodatku C je prikazan detaljan postupak dobijanja jednačina (3.25) i (3.26).

Primenom inverzne Laplasove transformacije na jednačinu (3.26) u softveru *Mathematica*, dobija se talasni oblik struje koja protiče kroz kalem. Talasni oblik struje koji se dobija zavisi od induktivnosti korišćenog kalema i kapacitivnosti kondenzatora. Važno je napomenuti da u simulacijama nije upotrebljen isti kalem kao u slučaju kada se za generisanja signala za pobudu kalema koristi signal generator. Razlog za to je mala vrednost induktivnosti napravljenog kalema od 800 namotaja za koju se pri frekvencijama PWM signala koji treba generisati nagle promene struje ne mogu efikasno eliminisati. Kako je u ovom slučaju potrebno odrediti kapacitivnosti kondenzatora radi eliminisanja ovih promena, vrednost induktivnosti kalema je pre toga selektovana na osnovu izvršenih simulacija protoka struje kroz njega. Simulacijama je utvrđeno da se najpreciznija kontrola protoka struje može dobiti pri induktivnosti kalema od 100 mH, a da se pri tome koriste standardne vrednosti kapacitivnosti.

Kako su frekvencije i amplitude PWM signala oba generatora jednake može se iskoristiti da je $C_1 = C_2 = C$ i $R_1 = R_2 = R = 125 \Omega$. Rezultati simulacija protoka struje kroz kalem pri različitim vrednostima kapacitivnosti kondenzatora su prikazani na slici 31, a urađene su za slučaj da je trajanje magnetnog potpisa 400 ms, što se može posmatrati kao potpis koji kreira vozilo dužine 4 m pri brzini kretanja od 36 km/h.

Na slici se može videti da pri kapacitivnostima kondenzatora manjim od 22 μF nema značajnih promena u talasnim oblicima struje, tj. nagle promene su i dalje prisutne. Kondenzatori ovih kapacitivnosti se brzo pune i prazne zbog male vrednosti vremenske konstante, a jačina struje kroz kalem se ne smanjuje zbog veće impedanse kondenzatora u odnosu na ostatak kola. Sa druge strane, ako je kapacitivnost kondenzatora prevelika, 220 μF ili više, dolazi do degradacije talasnog oblika struje zbog prevelike vrednosti vremenske konstantne i znatno dužeg vremena punjenja kondenzatora.

Smatra se da je kapacitivnost kondenzatora adekvatna, ako su nagle promene jačine struje (razlika između lokalnog maksimuma i minimuma) i degradacija talasnog oblika minimalni. U ovom slučaju, za struju koja generiše magnetno polje identično magnetnom potpisu vozila navedenih karakteristika, najbolji rezultat se dobija kada je kapacitivnost kondenzatora 120 μF . Promenom brzine kretanja vozila dobija se različito vreme trajanja magnetnog potpisa, tj. različite vrednosti perioda PWM signala. Ponavljanjem opisanog postupka određene su kapacitivnosti kondenzatora potrebne za dobijanje adekvatnog talasnog oblika struje kalema kako bi se simulirala kretanja vozila u opsegu brzina do 120 km/h. Dobijene vrednosti su prikazane u tabeli 4.



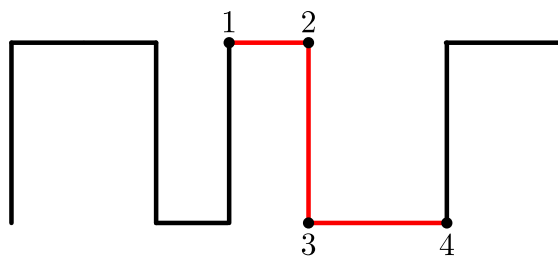
Slika 31: Rezultati simulacija struje kalema u zavisnosti od kapacitivnosti kondenzatora u softveru *Mathematica*.

Tabela 4: Kapacitivnosti kondenzatora u zavisnosti od trajanja pobude kalema PWM signalom, tj. brzine kretanja vozila čiji magnetni potpis se simulira.

Brzina kretanja vozila $v(\text{km/h})$	Kapacitivnost kondenzatora $C_1 = C_2(\mu\text{F})$
$1 < v \leq 4$	4700
$4 < v \leq 7$	1800
$7 < v \leq 10$	820
$10 < v \leq 18$	470
$18 < v \leq 25$	220
$25 < v \leq 36$	150
$36 < v \leq 54$	120
$54 < v \leq 72$	68
$72 < v \leq 108$	47
$108 < v \leq 120$	22

Određivanje kapacitivnosti kondenzatora u softveru *LTspice*

Treći način za određivanje vrednosti kapacitivnosti kondenzatora je simulacijom rada električnog kola prikazanog na slici 30 u softveru *LTspice* i posmatranjem struje koja protiče kroz kalem. PWM signal promenljivog faktora ispune realizovan je korišćenjem PWL (*Piecewise Linear*) generatora, čiji su parametri definišani parovima tačaka (x, y) unutar tekstualnog fajla. Koordinata x predstavlja vreme, a koordinata y vrednost napona koju će signal imati u trenutku x . Pošto se radi o PWM signalu, vrednost koordinate y može da ima vrednost niskog ili visokog naponskog nivoa, što je 0 V ili 5 V. Vrednosti koordinate x zavise od intenziteta magnetnog polja koje kalem treba da generiše, pa je trajanje visokog naponskog nivoa u toku impulsa direktno srazmerno izmerenoj promeni magnetnog polja. Period, odnosno frekvencija PWM signala zavisi od brzine kretanja vozila koja treba da se simulira, pri čemu se ukupno generiše 100 impulsa. Jedan impuls PWM signala definiše se preko četiri para tačaka prikazanih na slici 32.



Slika 32: Tačke kojima se definišu frekvencija i faktor ispune PWM signala PWL generatora u softveru *LTspice*.

Vrednosti (x_1, y_1) predstavljaju vrednosti koordinata tačke 1, x_2, y_2 vrednosti koordinata tačke 2, itd. Koordinate svih tačaka na osnovu kojih se kreira jedan impuls se mogu izračunati korišćenjem sledećih jednačina:

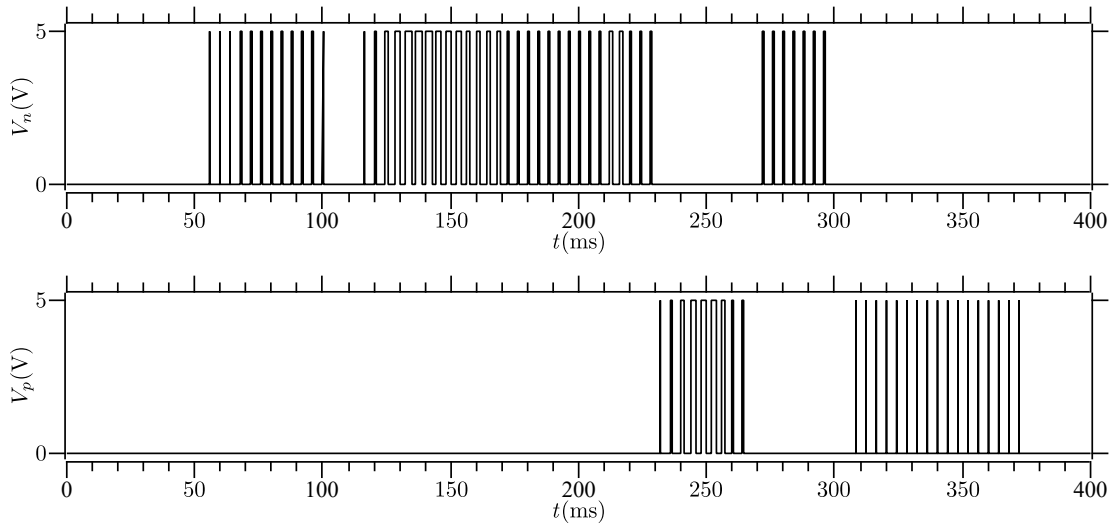
$$(x_1, y_1) = ((n-1)T + \Delta t, V_{ON}), \quad (3.27)$$

$$(x_2, y_2) = \left((n-1)T + DTC_{n,p}[n] \frac{T}{100} + \Delta t, V_{ON} \right), \quad (3.28)$$

$$(x_3, y_3) = \left((n-1)T + DTC_{n,p}[n] \frac{T}{100} + 2\Delta t, 0 \right), \quad (3.29)$$

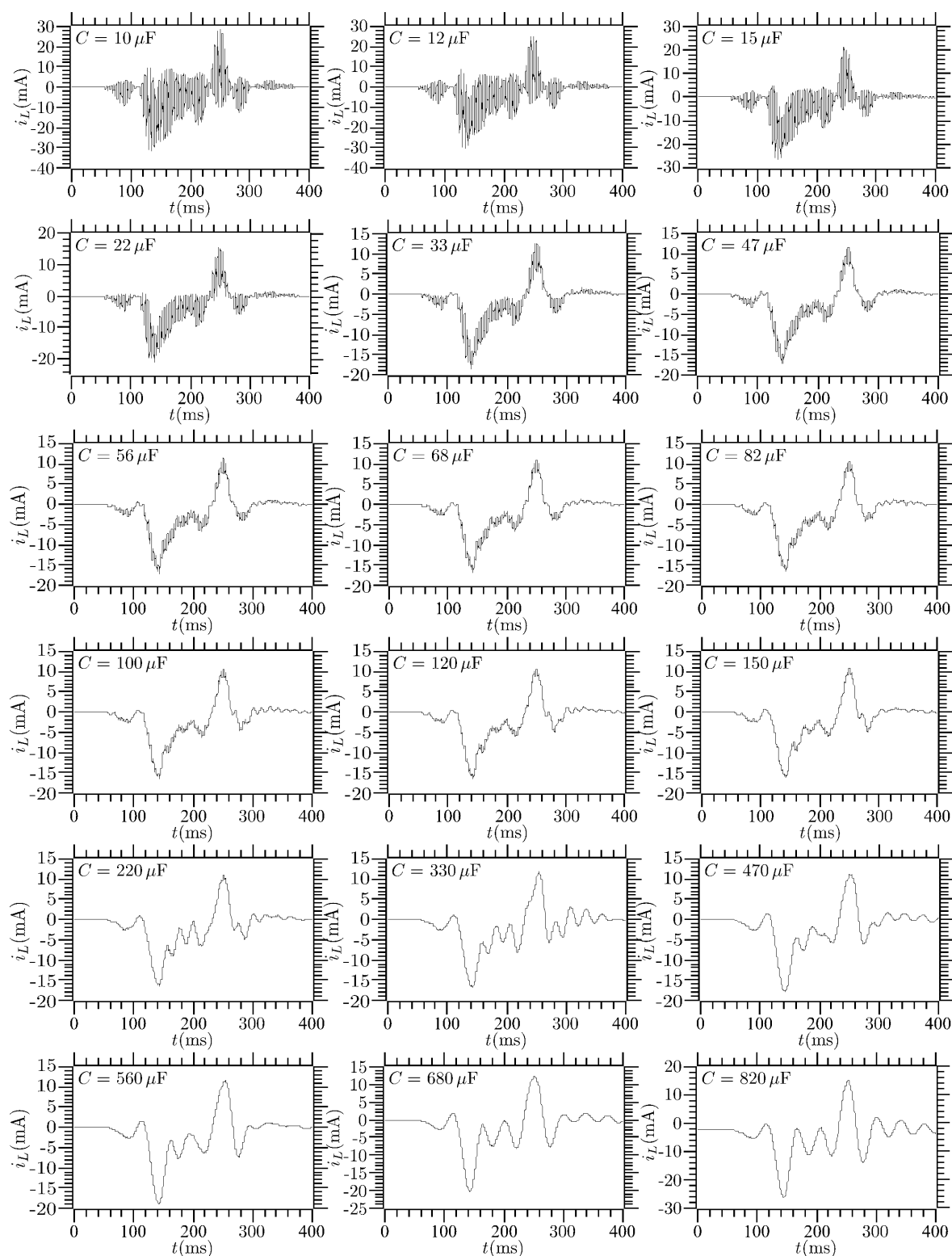
$$(x_4, y_4) = (nT, 0). \quad (3.30)$$

U jednačinama (3.27)-(3.30) n označava redni broj impulsa, T je period jednog impulsa, dok su DTC_n i DTC_p faktori ispunje PWM signala. V_{ON} označava visok naponski nivo (5 V), a Δt je vreme potrebno da se stanje signala na izlazu generatora promeni sa niskog na visok naponski nivo, i obrnuto. Prikazane jednačine važe pri uslovu $DTC_{n,p} \neq 0$. Ako ovaj uslov nije ispunjen vrednost napona u tačkama 1 i 2 jednaka je 0 V, pa se u okviru trenutnog impulsa generiše samo tačka čije su koordinate (x_4, y_4) . Na slici 33 su prikazani PWM signali kojima se u softveru *LTspice* pobuđuje kalem kako bi se rekonstruisao magnetni potpis vozila *VW Polo9N*, pri čemu se smatra da je dužina vozila 4 m, a brzina kretanja 36 km/h.



Slika 33: PWM signali generisani u softveru *LTspice* kojima se pobuđuje kalem kako bi se rekonstruisao magnetni potpis vozila *VW Polo9N*.

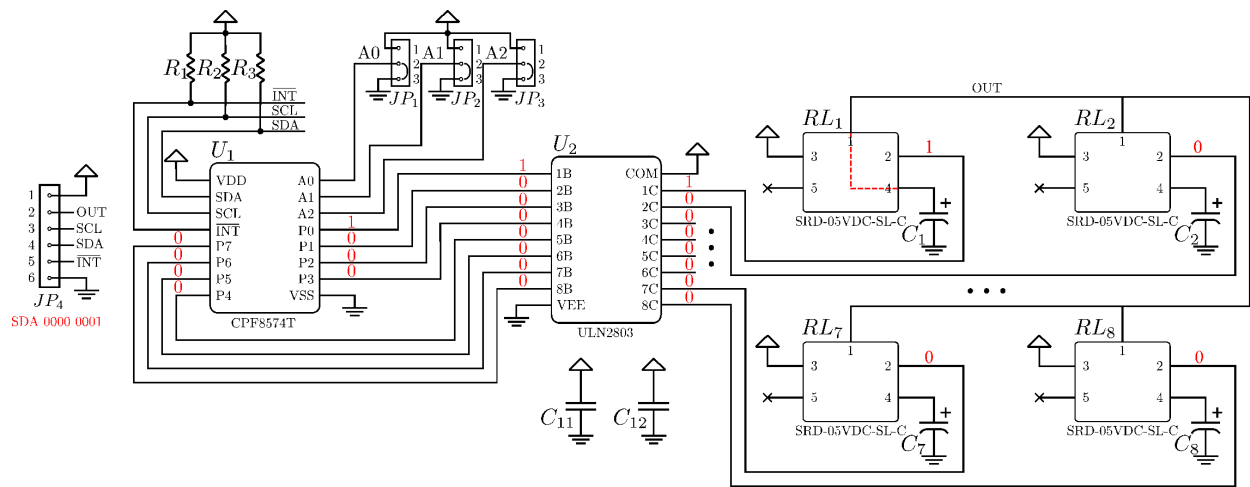
Na slici 34 su prikazani talasni oblici struje koja protiče kroz kalem za različite vrednosti kapacitivnosti kondenzatora.



Slika 34: Rezultati simulacija struje kalema u zavisnosti od kapacitivnosti kondenzatora u softveru *LTspice*.

Vrednosti kapacitivnosti kondenzatora, dobijene u *LTspice* -u se u potpunosti podudaraju sa vrednostima dobijenim korišćenjem softvera *Mathematica*, prikazanim u tabeli 4.

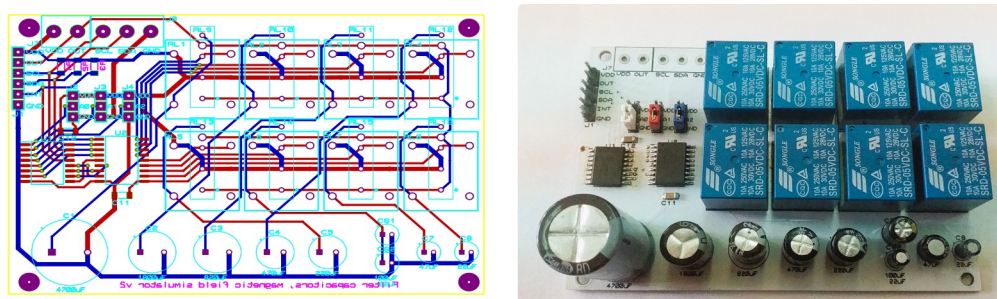
Kako je za simulaciju kretanja vozila pri različitim brzinama potrebno koristiti kondenzatore različitih kapacitivnosti, neophodno je projektovati električno kolo kojim se odgovarajući kondenzatori povezuju u kolo generatora u zavisnosti od odabrane brzine vozila. Dakle, pored kondenzatora, ovo kolo treba da sadrži komponente kojima se vrši povezivanje kondenzatora na izvode kalema, kao i upravljački deo preko koga se vrši odabir kondenzatora koji se povezuje. Električna šema projektovanog kola prikazana je na slici 35.



Slika 35: Električna šema kola za povezivanje kondenzatora u kolo generatora. Radi preglednosti, sa slike su izostavljena četiri releja i četiri kondenzatora.

Napajanje svih komponentata u ovom električnom kolu vrši se naponom od 5 V koji se dovodi preko konektora JP_4 . Isti konektor se koristi i povezivanje komunikacionih linija I²C protokola, preko koga se podaci sa mikrokontrolera prenose do integrisanog kola U_1 . Prenos podataka obuhvata slanje dva bajta. Prvi bajt predstavlja I²C adresu kola $PCF8574$. Jedan deo adrese kola se može eksterno programirati (položaj kratkospojnika JP_1 - JP_3 , a drugi je konstanta vrednost. Drugi bajt sadrži vrednost na osnovu koje se određuju naponski nivoi na osam izlaznih pinova ovog kola. Signali sa izlaznih pinova dovode se na integrisano kolo U_2 koje ima osam ulaznih i osam izlaznih pinova, pri čemu se svaki izlazni pin kontroliše Darlingtonovim parom tranzistora. Na svaki izlazni pin kola $ULN2803$ povezan je po jedan relej ($RL_1 - RL_8$). Aktiviranjem releja ($SRD - 05VDC - SL - C$) se jedan ili više kondenzatora ($C_1 - C_8$) povezuje na izlaz kola (OUT), i na taj način na izvod kalema. Na primer: ako je primljeni podatak sa mikrokontrolera 0000 0001, na izlaznom pinu P_0 će biti visok naponski nivo, dok će na ostalim izlaznim pinovima kola U_1 biti nizak naponski nivo. Ovakva stanja na izlaznim pinovima kola U_1 dovode do identičnih stanja na izlaznim pinovima kola U_2 . Time se aktivira samo relej RL_1 i na kraj kalema povezuje kondenzator C_1 .

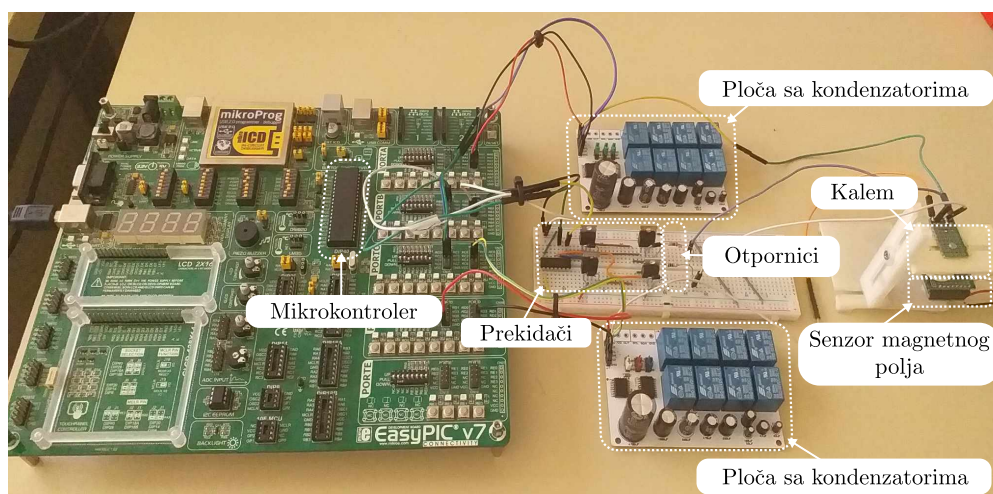
Od potrebnih 10 različitih kapacitivnosti, električno kolo obuhvata osam ($4700\ \mu\text{F}$, $1800\ \mu\text{F}$, $820\ \mu\text{F}$, $470\ \mu\text{F}$, $150\ \mu\text{F}$, $120\ \mu\text{F}$, $47\ \mu\text{F}$ i $22\ \mu\text{F}$), dok se preostale dve dobijaju kao kombinacija iskorišćenih ($220\ \mu\text{F}$ kao paralelna veza kapacitivnosti $150\ \mu\text{F}$, $47\ \mu\text{F}$ i $22\ \mu\text{F}$, a $68\ \mu\text{F}$ kao paralelna veza $47\ \mu\text{F}$ i $22\ \mu\text{F}$). Na slici 36 je prikazana štampana ploča koja sadrži potrebne kondenzatore, projektovana u softveru *Proteus*, kao i finalni izgled realizovane štampane ploče sa zalemljenim komponentama. Kolo generatora sadrže dve ovakve ploče, jer je potrebno povezati dve kapacitivnosti istovremeno na krajeve kalema.



Slika 36: Layout i finalni izgled štampane ploče sa kondenzatorima koji se povezuju na krajeve kalema u kolu generatora magnetnog polja.

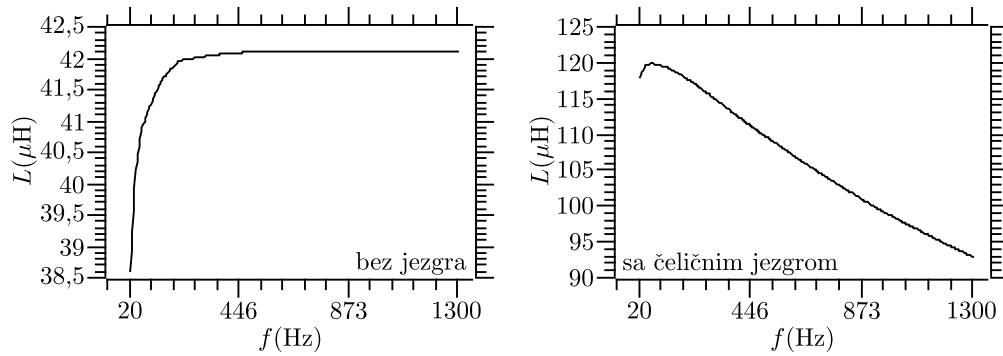
3.3.3 Generator magnetnog polja realizovan korišćenjem mikrokontrolera i rekonstrukcija magnetnih potpisa

Generator magnetnog polja, baziran na mikrokontroleru prikazan je na slici 37. Sastoji se od razvojnog okruženja *EasyPIC7*, dve štampane ploče sa kondenzatorima, dva prekidača realizovanih na protoploči i kalema postavljenom na držaču.



Slika 37: Realizacija generatora magnetnog polja korišćenjem mikrokontrolera i kalema.

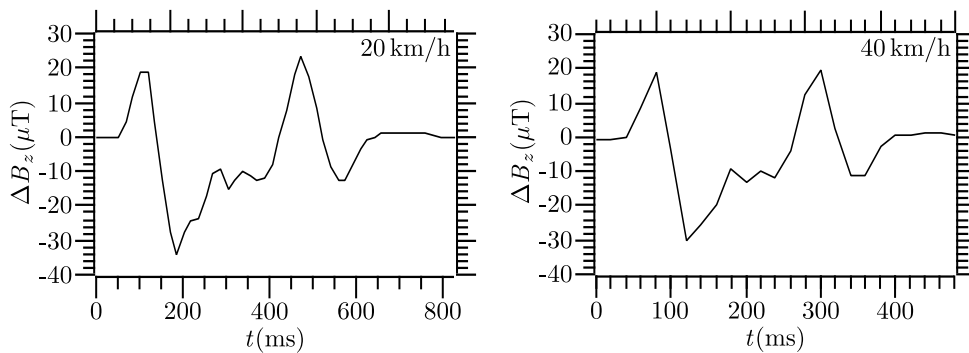
Kalem koji je upotrebljen za praktičnu realizaciju generatora, čija je induktivnost predstavljena na slici 38, formiran je na ranije opisan način, a njegovi parametri su $r_1 = 3$ mm, $r_2 = 15,5$ mm, $l = 12$ mm, $N = 3000$ i $d_0 = 0,12$ mm.



Slika 38: Zavisnost induktivnosti kalema napravljenog od 3000 namotaja od frekvencije.

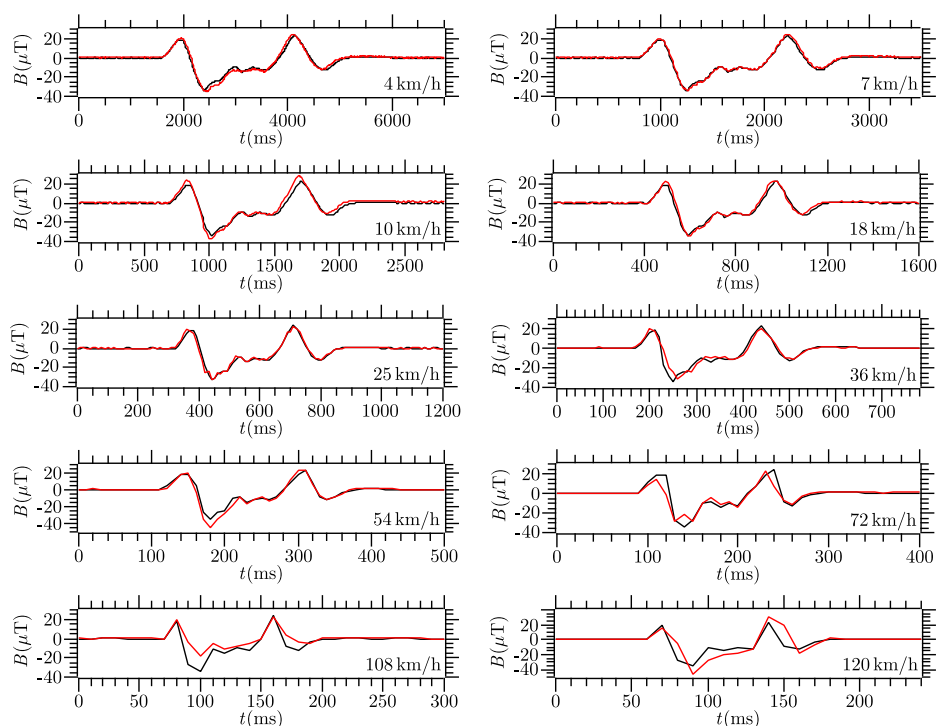
Kalem sa čeličnim jezgrom ima induktivnost $L = 98,28$ mH pri frekvenciji pobudnog signala od $f_{PWM} = 1001$ Hz, što vrednost korišćena u simulaciji.

Testiranje rada generatora izvršeno je za dva pomenuta režima rada. Za prvi, u kome se simuliraju magnetni potpisi pojedinačnih vozila, rekonstruisani su magnetni potpisi istih vozila za koja je izvršeno njihovo snimanje na ulici. Pri tome je rekonstrukcija urađena za deset različitih brzina svakog vozila. Kako je prvobitno snimanje obuhvatalo samo jednu brzinu kretanja, izvršeno je dodatno snimanje magnetnog potpisa vozila *VW Polo9N* za dve različite brzine kretanja. Pri promeni brzine kretanja vozila menja samo trajanje magnetnog potpisa, a ne i njegov talasni oblik (slika 39).

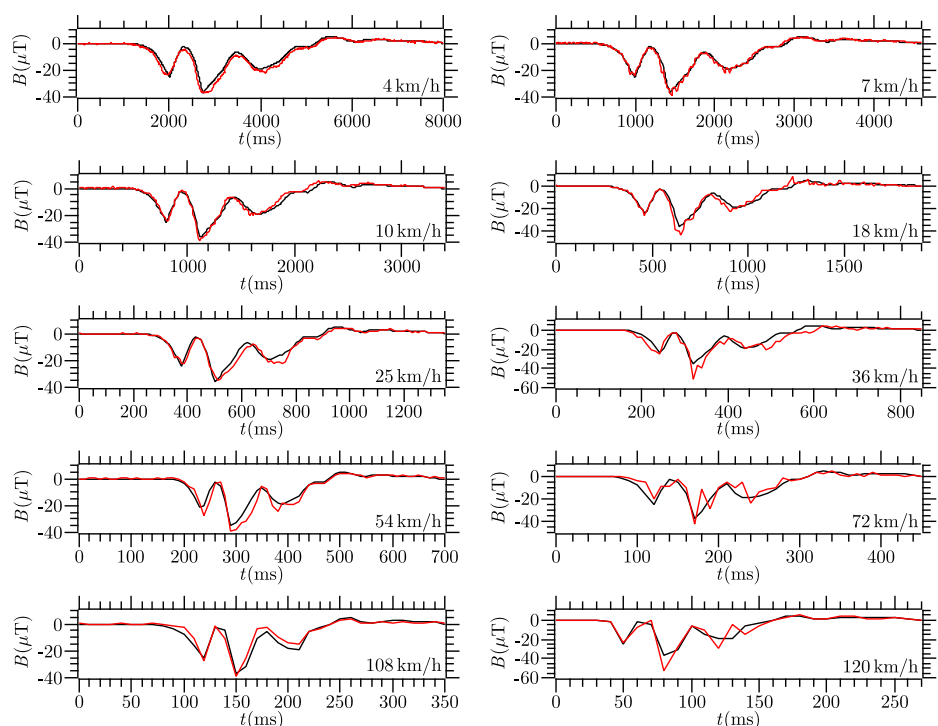


Slika 39: Snimljeni magnetni potpisi vozila *VW Polo9N* pri kretanju različitim brzinama.

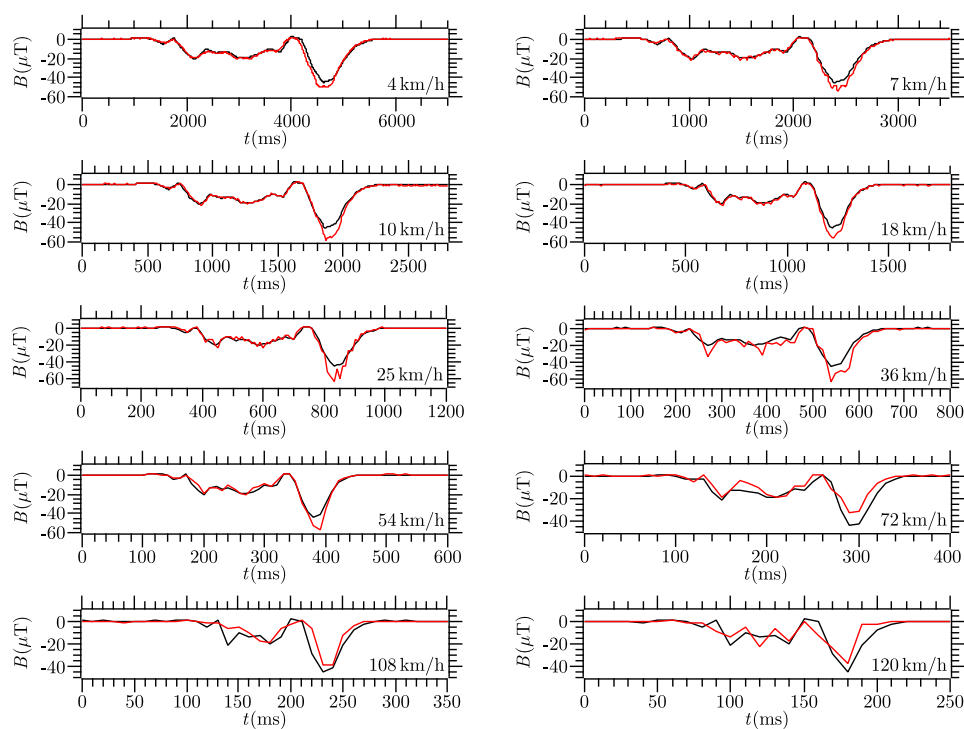
Na osnovu toga se može smatrati da se magnetni potpisi vozila pri različitim brzinama kretanja mogu dobiti skaliranjem snimljenog magnetnog potpisa pri jednoj brzini. Na slikama 40-43 su prikazani snimljeni i rekonstruisani magnetni potpisi četiri različita vozila, pri 10 različitih brzina kretanja, a vrednosti njihovog poređenja prikazane su u tabelama 5 i 6.



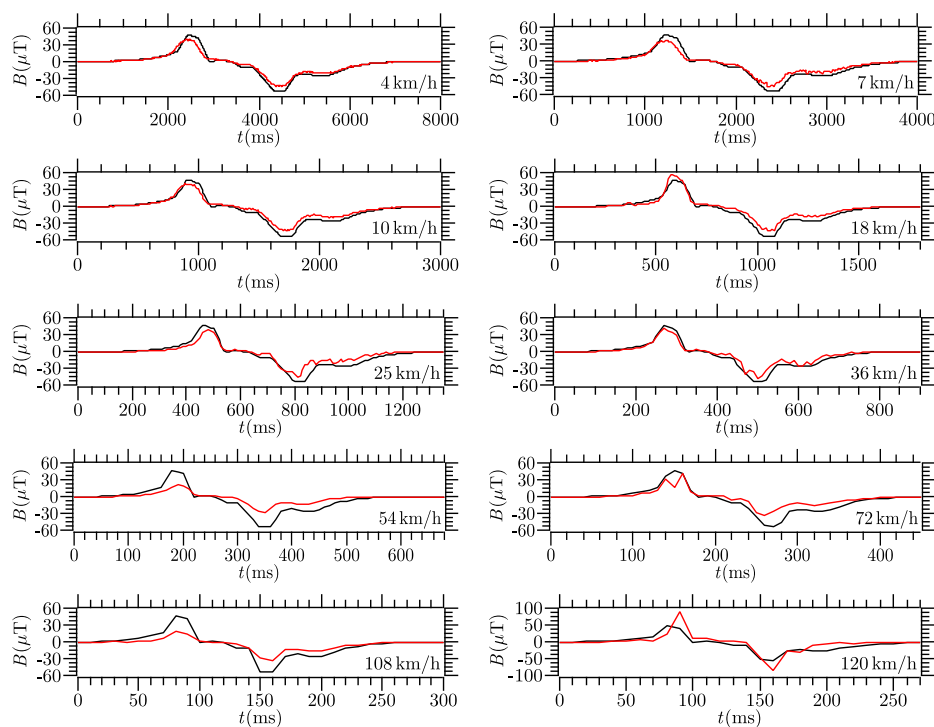
Slika 40: Snimljeni i rekonstruisani magnetni potpisi vozila *VW Polo9N* upotrebom generatora magnetnog polja baziranog na mikokontroleru.



Slika 41: Snimljeni i rekonstruisani magnetni potpisi vozila *Peugeot307* upotrebom generatora magnetnog polja baziranog na mikokontroleru.



Slika 42: Snimljeni i rekonstruisani magnetni potpisi vozila *Fiat Grande Punto* upotrebom generatora magnetnog polja baziranog na mikokontroleru.



Slika 43: Snimljeni i rekonstruisani magnetni potpisi vozila *KIA Stonic* upotrebom generatora magnetnog polja baziranog na mikokontroleru.

Tabela 5: Poređenje snimljenih i rokonstrisanih magnetnih potpisa različitih vozila - Pirsonov korelacioni koeficijent. Rekonstrukcija je izvršena generatorom magnetnog polja (mikrokontroler i kalem).

$r_{X,Y}$										
$v(\text{km/h})$ Vozilo	4	7	10	18	25	36	54	72	108	120
<i>VW Polo9N</i>	0,9904	0,9969	0,9857	0,9901	0,9876	0,9652	0,9872	0,9122	0,8646	0,8515
<i>Peugeot 307</i>	0,9934	0,9930	0,9871	0,9766	0,9825	0,9397	0,9788	0,8841	0,9643	0,9239
<i>Fiat Grande Punto</i>	0,9879	0,9938	0,9896	0,9916	0,9771	0,9607	0,9824	0,9514	0,9090	0,8543
<i>KIA Stonic</i>	0,9878	0,9870	0,9908	0,9763	0,9706	0,9855	0,9794	0,9528	0,9826	0,8525

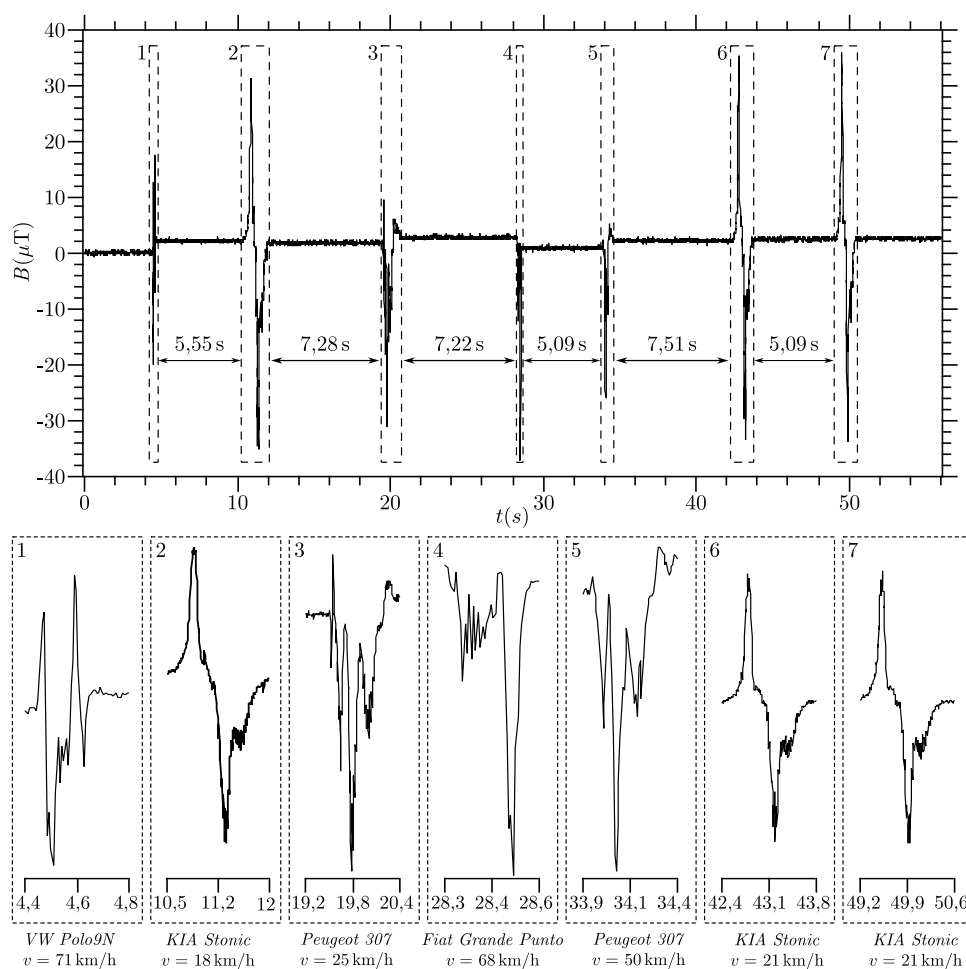
Tabela 6: Poređenje snimljenih i rokonstrisanih magnetnih potpisa različitih vozila - RMSE. Rekonstrukcija je izvršena generatorom magnetnog polja (mikrokontroler i kalem).

RMSE										
$v(\text{km/h})$ Vozilo	4	7	10	18	25	36	54	72	108	120
<i>VW Polo9N</i>	1,7516	1,2196	2,5689	1,6631	1,5359	2,7045	2,9236	4,7381	6,2466	8,6622
<i>Peugeot 307</i>	1,9027	1,2612	1,5396	2,3941	2,0952	4,0700	3,0192	4,8734	2,8459	5,0879
<i>Fiat Grande Punto</i>	2,3716	2,1620	2,7095	2,4855	3,6183	5,3747	2,8794	4,9126	5,4302	6,1326
<i>KIA Stonic</i>	4,2404	5,6735	5,0771	5,561	7,0121	5,1881	11,2309	9,4279	10,5346	14,7060

Izračunati korelacioni koeficijenti pokazuju da je linearnost između originalnih i rekonstruisanih potpisa iznad 97 % pri brzinama do 25 km/h, što je opseg najčešćih brzina pri pojačanom saobraćaju. Pri brzinama karakterističnim za međugradske saobraćajnice i autoputeve linearnost je iznad 93 % i 85 % pri brzinama do 72 km/h i 120 km/h, respektivno. Vrednosti srednje kvadratne greške takođe pokazuju da se magnetni potpisi vozila mogu verodostojnije rekonstruisati za vozila koja se kreću manjim brzinama. Razlog za to je manji broj odmeraka na osnovu kojih se njihova rekonstrukcija vrši.

Drugi režim rada generatora zasniva se na nasumičnom generisanju magnetnih potpisa radi simulacije realnog saobraćajnog toka. Na slici 44 je prikazano sedam magnetnih potpisa generisano na ovaj način, pri čemu tip vozila, brzinu kretanja i vremenski interval između dva susedna vozila generator određuje proizvoljno. Definisani opseg brzina je od 10 km/h do 80 km/h, a susedna vozila su vremenski udaljena od 5 s do 10 s.

Detektori vozila, nezavisno od metoda njihove realizacije, treba da pruže precizne informacije bez obzira na tip vozila, njegovu brzinu kretanja, lokaciju ili vremenske uslove. Uz to, proces instalacije zahteva vreme, materijalne resurse i u nekim slučajevima dovodi do



Slika 44: Rekonstrukcija magnetnih potpisa vozila u cilju simulacije realnog saobraćaja.

zaustavljanja saobraćaja. Takođe, u slučaju da detektor ne radi ispravno, mora se izvršiti deinstalacija, rešavanje problema i ponovna instalacija, što dodatno povećava troškove. Zbog toga je veoma bitno testirati pouzdanost rada detektora pre same instalacije. Dobijeni rezultati pokazuju da se opisani generatori magnetnog polja mogu iskoristiti za verodostojnu rekonstrukciju magnetnih potpisa pojedinačnih vozila, dok se generator magnetnog polja baziran na mikrokontroleru može upotrebiti i za rekonstrukciju realnog saobraćajnog toka.

Glava 4

Detekcija vozila analizom magnetnih potpisa

Rad detektora vozila bazira se na brojnim metodama [80] u kojima se koriste različiti senzori [81]. Sve metode se mogu podeliti u dve grupe. Prvu grupu čine takozvane intruzivne metode, u koje spadaju uređaji zasnovani na induktivnim petljama, pneumatskim tubama i piezoelektričnim sensorima. Ovi uređaji se postavljaju ispod površine kolovoza ili trotoara, što predstavlja nedostatak, jer je prilikom instalacije ili servisiranja neophodno obustaviti protok saobraćaja. U drugu grupu spadaju neintruzivne metode, a njihova glavna prednost u odnosu na intruzivne je jednostavna instalacija, iznad ili pored kolovoza. Ova grupa obuhvata uređaje kojima se vrši obrada videa i fotografija, kao i uređaje opremljene optičkim, ultrazvučnim ili akustičnim sensorima. Uređaji za detekciju vozila, čija struktura je zasnovana na senzoru magnetnog polja spadaju u obe kategorije, jer se mogu ugraditi u kolovoz, postaviti na njegovu površinu ili pored samog kolovoza.

Naravno, sve metode detekcije imaju određene prednosti i nedostatke, a neke najosnovnije karakteristike različitih metoda prikazane su u tabeli 7.

Tabela 7: Prednosti i nedostaci različitih metoda detekcije vozila.

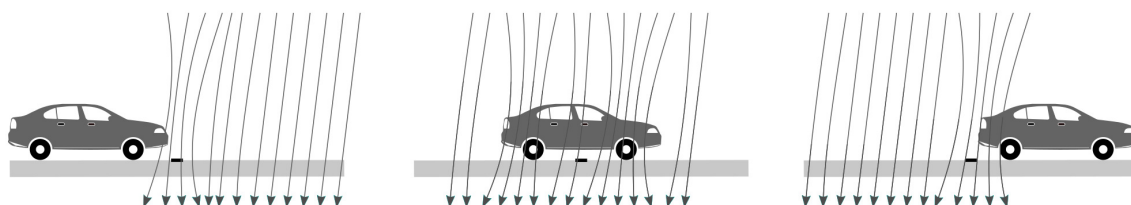
Metod	Prednosti	Nedostaci
Induktivne petlje	• Dobro poznat i ispitan metod sa velikom bazom podataka • Otporne na loše vremenske uslove (kiša, magla, sneg) • Visoka tačnost detekcije za vozila istog tipa • Fleksibilan dizajn	• Instalacija ili održavanje zahteva prekid saobraćaja • Instalacija zahteva sečenje kolovoza • Osetljive na promenu temperature i vibracije
Nastavak na sledećoj strani		

Tabela 7 – nastavak

Metod	Prednosti	Nedostaci
Pneumatske tube	• Prenosne - mogućnost baterijskog napajanja • Brz i jednostavan proces instalacije • Mala potrošnja energije • Niska cena	• Niska preciznost pri detekciji masivnih vozila • Osetljive na promenu temperature • Oštećenja usled kontakta sa gumama vozila
Video nadzor	• Više zona detekcije (nadgledanje više traka) • Lako se dodaje ili modifikuje zona detekcije • Mogućnost integracije podataka (detekcija vozila na širokom području) • Širok spektar podataka	• Zatvaranje saobraćajne trake pri instalaciji i održavanju • Nestabilnost usled vetra ili vibracija noseće strukture • Neophodno osvetljenje za pouzdanu detekciju u noćnim uslovima • Manja preciznost detekcije pri lošim vremenskim uslovima
Ultrazvučni senzori	• Istovremena detekcija vozila u više saobraćajnih traka • Mogućnost detekcije različitih tipova vozila	• Osetljive na promenu temperature i vetar
Akustični senzori	• Pokrivaju više saobraćajnih traka • Niska osetljivost na padavine	• Niske temperature utiču na preciznost detekcije • Niska preciznost detekcije pri gustom saobraćaju
Magnetni senzori	• Brz i jednostavan proces instalacije • Mala potrošnja energije • Tačnost detekcije ne zavisi od vremenskih uslova	• Uticaj vozila iz susedne kolovozne trake

4.1 Detektor vozila zasnovan na senzoru za merenje jačine magnetnog polja

Rad detektora vozila, koji sadrže senzor za merenje magnetnog polja, zasniva se na merenju magnetnog polja planete Zemlje. Jedna od osnovnih prednosti detektora ovog tipa, u odnosu na druge, je u tome što je magnetno polje planete Zemlje sveprisutno i relativno stabilno (konstantno) u širokom području. Postoje samo promene malog intenziteta u toku dužih vremenskih intervala. Vozila, bilo da se kreću ili miruju, stvaraju izobličenja magnetnog polja planete Zemlje u posmatranoj tački merenja (ispod samog vozila ili u njegovoj neposrednoj blizini), kao što se može videti na slici 45.



Slika 45: Izobličenja magnetnog polja planete Zemlje pod uticajem vozila.

Uzrok nastanka ovih izobličenja je prisustvo feromagnetnih materijala u strukturi vozila [82]. Kreirana izobličenja se razlikuju u zavisnosti od tipa i modela vozila, i nazivaju se magnetni potpisi vozila. Detekcija vozila se vrši analizom promena u magnetnom polju planete Zemlje, tj. upoređivanjem talasnog oblika izmerenih promena sa talasnim oblikom izobličenja koja nastaju pod uticajem vozila.

Bilo da je senzor za merenje magnetnog polja postavljen na kolovoz ili pored kolovoza, algoritmi detekcije se zasnivaju na merenju magnetnog polja po jednoj, dve ili tri ose. U radu [83] je opisan algoritam detekcije koji analizira promene magnetnog polja po jednoj osi, orjentisanoj normalno na površinu kolovoza, pri čemu je senzor magnetnog polja postavljen pored kolovoza. Složeniji pristup detekcije vrši se analizom magnetnog polja po dve ose. Algoritam detekcije predstavljen u radu [84] zasniva se na pronalaženju maksimalnih i minimalnih vrednosti magnetnog polja po osi koja je paralelna sa smerom kretanja vozila i drugoj koja je normalna na površinu kolovoza, sa senzorom postavljenim na kolovoz. Rad [85] opisuje detekciju vozila pomoću senzora magnetnog polja postavljenog pored kolovoza, koristeći algoritam detekcije koji analizira ugao, tj. odnos između magnetnog polja po dvema osama, pri čemu je jedna paralelna, a druga normalna u odnosu na kolovoz. Najkompleksniji algoritam detekcije uzima u obzir magnitudu magnetnog polja [86] koja se izračunava na osnovu izmerenih vrednosti po sve tri ose, što je ranije opisano jednačinom (3.14).

Analiza promena magnetnog polja omogućava da se pored detekcije vozila utvrde i neke od njegovih karakteristika. Različite metode analize magnetnog polja za određivanje brzine detektovanih vozila pomoću jednog ili dva senzora magnetnog polja opisane su u radovima [87, 88]. Smer kretanja vozila se može odrediti preko istog magnetnog signala dva senzora ili analizom odnosa magnetnog polja po dve ose jednog senzora [89]. Svaki tip vozila stvara jedinstveni intenzitet i talasni oblik distorzije magnetnog polja u zavisnosti od količine i raspodele feromagnetnih materijala unutar svoje strukture. To daje mogućnost da se izvrši klasifikacija detektovanih vozila [90–92], a veća preciznost ovog postupka se postiže primenom akcelerometra i senzora magnetnog polja [93]. Akcelerometarom se određuje broj osovinu vozila merenjem intenziteta vibracija. Vozila izazivaju promene u magnetnom polju bilo da se kreću ili miruju, što omogućava realizaciju pametnih parking sistema [94, 95]. U skorašnjim istraživanjima predlaže se korišćenje senzora magnetnog polja u kombinaciji sa veštačkom neuronskom mrežom (*Artificial Neural Network*) da bi se poboljšala tačnost procesa detekcije vozila i klasifikacije [96]. Senzor deformacije i računarska neuronska mreža (*Computational Neural Network*) koriste se za istu svrhu [97].

U nastavku je opisan detektor vozila zasnovan na merenju magnetnog polja indukovnog vozilima, koji se sastoji od ranije spomenutih senzora magnetnog polja i mikrokontrolera. Predstavljeni detektor vozila može se postaviti na kolovoz ili ispod njegove površine, a omogućava preciznu detekciju vozila u rasponu brzina od 3,6 km/h do 120 km/h. Ovaj opseg brzina pokriva kretanje vozila u gradskom okruženju, magistralnim putevima i auto-putevima. Proces detekcije se oslanja na analizu magnetnog polja po jednoj osi, normalnoj na površinu puta. Količina podataka, dobijena merenjima na jednoj osi, nije prevelika i ne zahteva veliku računarsku snagu, što omogućava preciznu analizu u realnom vremenu pomoću mikrokontrolera. Algoritam detekcije, basiran na fiksnoj graničnoj vrednosti i implementiran u mikrokontroler kao automat konačnih stanja (*Finite-State Machine* - FSM).

Za razvoj samog detektora iskorišćen je generator magnetnog polja opisan u Glavi 3. Pored toga što generator magnetnih potpisa doprinosi kraćem vremenu razvoja, takođe smanjuje trajanje i troškove procesa testiranja, koje se može vršiti u laboratorijskim uslovima bez obzira na vremenske uslove koji testiranje na kolovozu mogu učiniti nemogućim. Dva moguća scenarija koja nastaju usled neadekvatno realizovanog detektora su pogrešna detekcija i propuštena detekcija. Pogrešna detekcija nastaje kada je detektor previše osetljiv i reaguje na promene magnetnog polja manjeg intenziteta nego što su promene koje izazivaju vozila, dok propuštena detekcija nastaje kada detektor nije dovoljno osetljiv.

4.1.1 Algoritam detekcije baziran na automatu konačnih stanja

Algoritmom se proverava da li je izmerena vrednost magnetnog polja veća/manja od definisane granične vrednosti. Jednu grupu čine algoritmi sa unapred definisanom fiksnom vrednošću praga, a drugu algoritmi kod kojih se granična vrednost menja u zavisnosti od izmerenih vrednosti magnetnog polja.

Za razvoj samog algoritma detekcije vozila, koji se zasniva na analizi promena magnetnog polja, postoje dva pristupa. Prvi pristup obuhvata opisivanje distorzije magnetnog polja koju izaziva vozilo po x , y i z -osi kao magnetni dipol sa magnetnim momentom m centriranim u vozilu, upotrebom sledećih jednačina [98]:

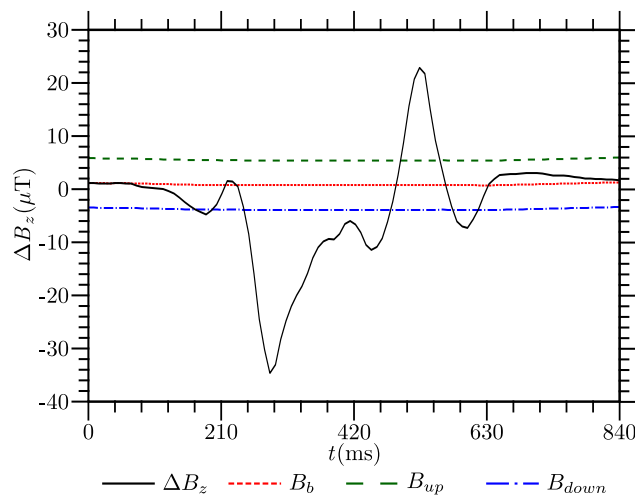
$$B_x = \frac{\mu_0(m_x(2x^2 - y^2 - z^2)) + 3m_yxy + 3m_zxz}{4\pi r^5}, \quad (4.1)$$

$$B_y = \frac{\mu_0(m_y(2y^2 - x^2 - z^2)) + 3m_xxy + 3m_zyz}{4\pi r^5}, \quad (4.2)$$

$$B_z = \frac{\mu_0(m_z(2z^2 - y^2 - x^2)) + 3m_xxz + 3m_yyz}{4\pi r^5}. \quad (4.3)$$

U navedenim jednačinama m_x , m_y i m_z su magnetni momenti po x , y i z -osi, respektivno, μ_0 je magnetna permeabilnost vazduha, a r je rastojanje od senzora do vozila.

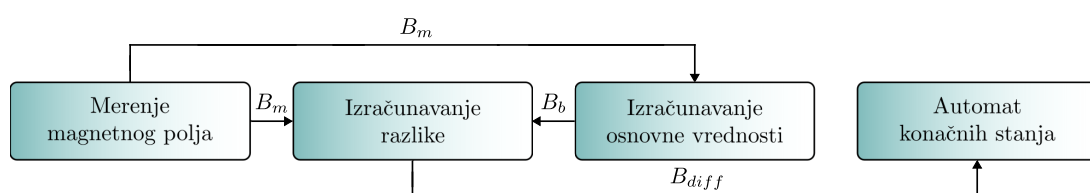
Drugi pristup razvoja algoritma detekcije zasniva se na korišćenju eksperimentalno dobijenog magnetnog potpisa, što će biti opisano u nastavku. Na slici 46 prikazani su magnetni potpis vozila *VW Polo9N*, osnovna vrednost magnetnog polja (B_b), kao i gornja (B_{up}) i donja (B_{down}) granična vrednost.



Slika 46: Magnetni potpis vozila *VW Polo9N*, osnovna vrednost magnetnog polja, gornja i donja granična vrednost magnetnog polja.

Osnovna vrednost magnetnog polja predstavlja intenzitet magnetnog polja bez prisustva vozila, zbog čega na prikazanoj slici ima vrednost nula. Apsolutna vrednost razlike između gornje/donje granične vrednosti i osnovne vrednosti predstavlja graničnu vrednost (B_{th}).

Algoritam detekcije se sastoji od četiri dela, kao što je prikazano na slici 47. Prvi deo obuhvata merenje magnetnog polja. Drugi deo je izračunavanje razlike između trenutno izmerene vrednosti i osnovne vrednosti. Treći deo je preračunavanje osnovne vrednosti, a četvrti i poslednji deo je FSM [99].



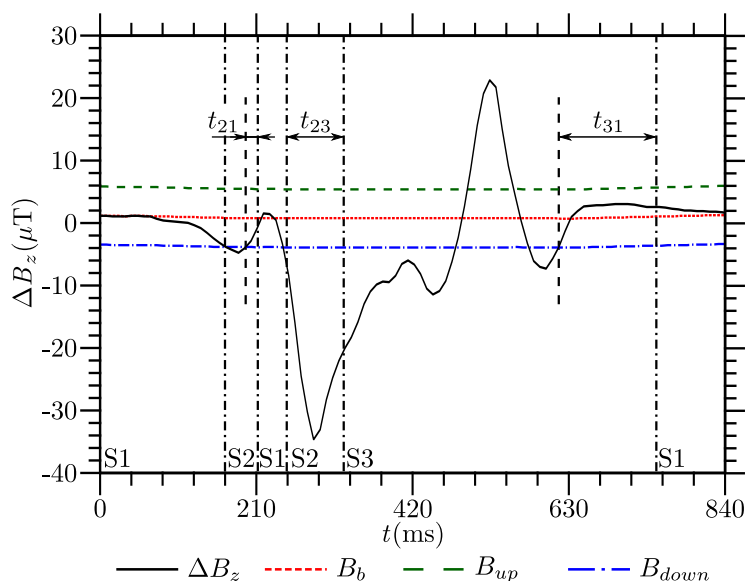
Slika 47: Blok šema algoritma detekcije vozila.

1) *Merenje magnetnog polja*: Vrednosti dobijene sa senzora su 14-bitni brojevi predstavljeni u dvostrukom komplementu, pa ih je potrebno transformisati u odgovarajući format koji je pogodniji za dalju obradu. Nakon transformacije koju vrši mikrokontroler dobijaju se podaci u decimalnom obliku izraženi u jedinicama μT . Merenja se vrše na svakih 10 ms, tj. frekvencijom 100 Hz, što je ujedno i frekvencija analiziranja izmerenih vrednosti.

2) *Izračunavanje razlike*: Nakon merenja izračunava se apsolutna vrednost razlike B_{diff} između poslednje izmerene vrednosti B_m i osnovne vrednosti B_b . Za algoritam detekcije od interesa je samo izobličenje magnetnog polja uzrokovano prisustvom vozila, dok spore promene malog intenziteta treba zanemariti.

3) *Ažuriranje osnovne vrednosti*: Vrednost koju izmeri senzor pri istom intenzitetu magnetnog polja se može razlikovati pod uticajem promene temperature. Ove promene takođe treba eliminisati prilikom izračunavanja vrednosti B_b . Sa druge strane, sve brze promene veće od granične vrednosti (B_{th}), za koje postoji mogućnost da su izazvane vozilom, treba eliminisati tako da ne utiču na osnovnu vrednost. To se postiže softverskom implementacijom *slew rate limiter* filtra. Dakle, vrednost B_b se ažurira ako je vrednost B_{diff} manja od definisane vrednosti B_{th} . Suprotno tome, ako je B_{diff} veće od B_b , osnovna vrednost ostaje nepromenjena.

4) *Automat konačnih stanja*: FSM je matematički model koji se koristi za kontrolu i opis ponašanja sistema. Sastoji se od skupa stanja, skupa prelaza između stanja, skupa ulaznih parametara i izlaznih akcija [100]. Projektovani FSM sastoji se od 4 stanja: stanje 1 - ispod granične vrednosti, stanje 2 - iznad granične vrednosti, stanje 3 - moguće prisutvo vozila, i stanje 4 - ažuriranje vrednosti B_b , B_{up} i B_{down} . Na slici 48 su prikazane promene stanja konačnog automata pri prolasku vozila.



Slika 48: Magnetni potpis vozila *VW Polo9N* sa označenim promenama stanja FSM-a i obeleženim karakterističnim vremenskim intervalima.

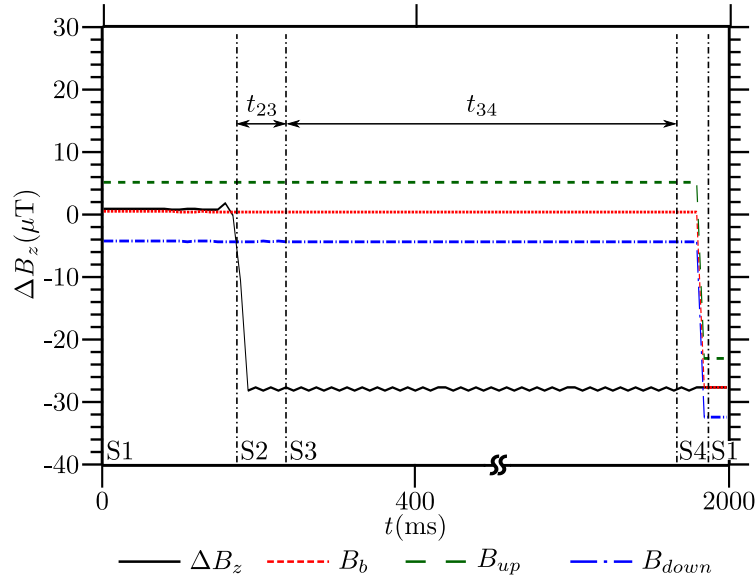
Stanje 1 - ispod granične vrednosti: FSM je u ovom stanju pre prvog merenja. Dok je $B_{diff} < B_{th}$, FSM ostaje u ovom stanju. Kada je $B_{diff} \geq B_{th}$, FSM prelazi u stanje 2.

Stanje 2 - iznad granične vrednosti: Ako je automat u stanju 2 i $B_{diff} \geq B_{th}$, tokom vremenskog intervala t_{23} , FSM prelazi u stanje 3. Suprotno tome, ako je $B_{diff} < B_{th}$ tokom vremenskog intervala t_{21} , FSM se vraća u stanje 1.

Stanje 3 - moguće prisustvo vozila: Ako je $B_{diff} < B_{th}$ tokom vremenskog intervala t_{31} , i FSM pređe iz stanja 3 u stanje 1, vozilo je uspešno detektovano. Drugi mogući scenario u stanju 3 je $B_{diff} \geq B_{th}$ tokom vremenskog intervala t_{34} . Uzrok toga je prisustvo feromagnetnog materijala u oblasti osetljivosti senzora zbog koga nastaje konstantna promena vrednosti (*offset*) koja se očitava tokom merenja, a FSM prelazi u stanje 4 (slika 49).

Stanje 4 - ažuriranje vrednosti B_b , B_{up} i B_{down} . Zbog konstantne prisutnosti feromagnetnog materijala, B_b se mora ponovo izračunati da bi se eliminisao uticaj *offset*-a. Nova vrednost B_b se izračunava kao srednja vrednost k izmerenih vrednosti. Nove vrednosti B_{up} i B_{down} dobijaju se povećavanjem, odnosno smanjivanjem vrednosti B_b za B_{th} , respektivno. Nakon završenih izračunavanja FSM se vraća u stanje 1.

Trajanje određenog stanja, kao i tačnost detekcije, FSM zavisi od navedenih vremenskih intervala (t_{21} , t_{23} , t_{31} i t_{34}). Promena stanja FSM-a nastaje kada je određen uslov koji važi za trenutno stanje kontinualno ispunjen u toku zadatog vremenskog intervala. Zbog toga je neophodno meriti trajanje trenutnog stanja, što se može uraditi pomoću tajmera mikrokontrolera. Međutim umesto tajmera koristi se brojač čija se vrednost povećava ako je ispitivani uslov ispunjen, što se radi nakon svakog merenja, odnosno na svakih 10 ms.



Slika 49: Promena magnetnog polja u prisustvu feromagnetnog materijala u oblasti osjetljivosti senzora i promene stanja FSM-a.

Ako uslov nije u kontinuitetu ispunjen, ili FSM pređe u naredno stanje, vrednost brojača se resetuje. Trajanje stanja FSM -a zavisi od definisanih vremenskih intervala i vrednosti B_{th} . Kako je učestanost analize izmerenih podataka jednaka učestalosti merenja, vremenski intervali trajanja svakog stanja se mogu izračunati jednačinom

$$t = \frac{N - 1}{f}, \quad (4.4)$$

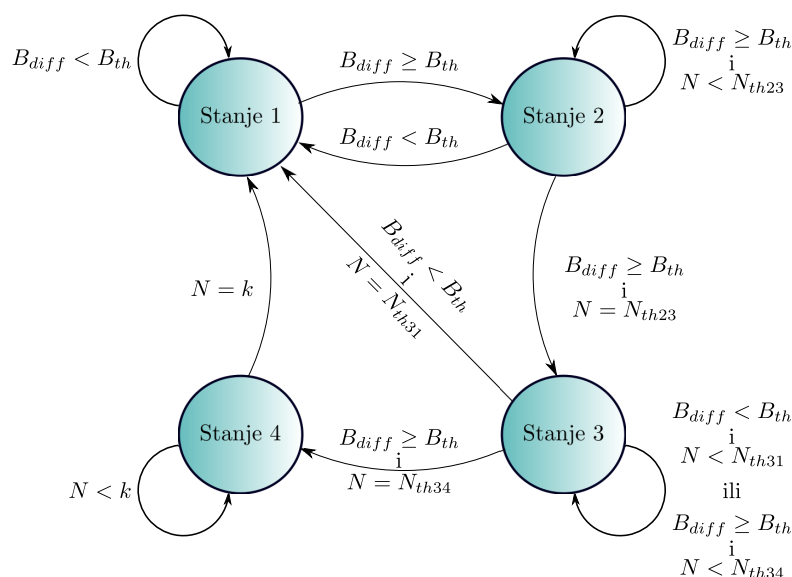
pri čemu N označava broj uzastopnih merenja pri kojima je ispitivani uslov ispunjen, a f frekvencija merenja (ispitivanja uslova). Vremenskom intervalu t odgovara vrednost brojača N , koja određuje promenu stanja FSM-a, kao što je prikazano u tabeli 8. Ako vrednost brojača u okviru trenutnog stanja dostigne graničnu vrednosti, FSM prelazi u sledeće stanje.

Tabela 8: Promene stanja FSM-a i uslovi pri kojima dolazi do promena.

Trenutno stanje	Uslov tajmera	Uslov brojača	Vrednost magnetnog polja	Naredno stanje
2	$t = t_{21}$	$N = N_{th21}$	$B_{diff} < B_{th}$	1
2	$t = t_{23}$	$N = N_{th23}$	$B_{diff} \geq B_{th}$	3
3	$t = t_{31}$	$N = N_{th31}$	$B_{diff} < B_{th}$	1
3	$t = t_{34}$	$N = N_{th34}$	$B_{diff} \geq B_{th}$	4

Vrednosti N_{th21} , N_{th23} , N_{th31} i N_{th34} predstavljaju vrednosti brojača pri kojima se dešava promena stanja. Prvi broj u indeksu predstavlja trenutno, a drugi naredno stanje FSM-a.

Dijagram projektovanog FSM sa odgovarajućim promenama stanja je prikazan na slici 50.



Slika 50: Dijagram promena stanja konačnog automata sa označenim uslovima pri kojima dolazi do promene stanja.

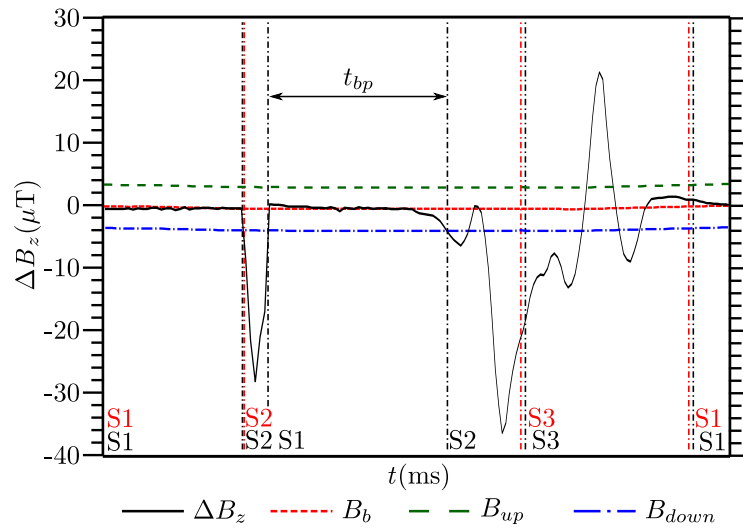
Parametri automata konačnih stanja su navedeni vremenski intervali kojima se definiše kada će automat izvršiti promenu stanja. Njihova vrednost zavisi od brzine kretanja vozila, frekvencije merenja, i odabranih graničnih vrednosti. U nastavku će biti opisano kako se može odrediti njihova vrednost za algoritam kojim se mogu detektovati vozila čija je brzina kretanja od 3,6 km/h do 120 km/h, uzevši u razmatranje različite granične vrednosti B_{th} .

Pri kretanju vozila *VW Polo9N* brzinom od 20 km/h promene magnetnog polja traju 840 ms, tako da se pri frekvenciji merenja od 100 Hz dobija 85 odmeraka. Kako promena brzine kretanja vozila utiče samo na trajanje magnetnog potpisa, može se izračunati trajanje magnetnih potpisa pri maksimalnoj i minimalnoj brzini kretanja. Maksimalna razmatrana brzina je 120 km/h, pa je trajanje magnetnog potpisa 139,87 ms ili 14 odmeraka, dok magnetni potpis pri minimalnoj brzini od 3,6 km/h iznosi 4662 ms ili 467 odmeraka.

4.1.1.1 Vremenski interval t_{21}

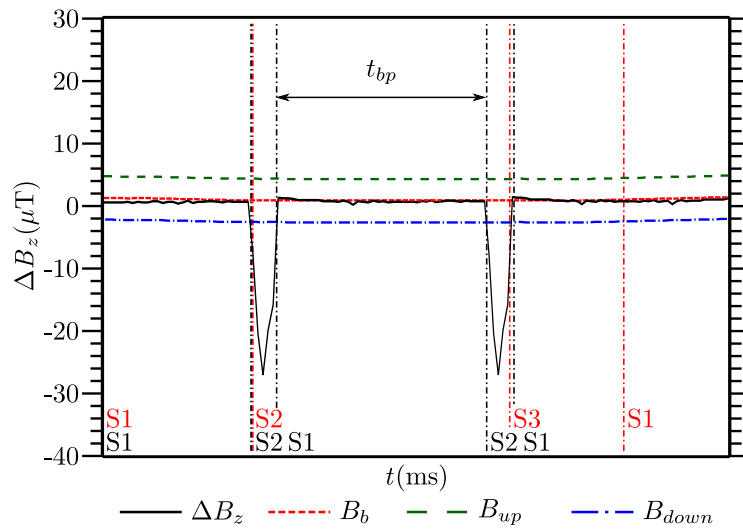
Promene stanja se dešavaju pri promenama magnetnog polja, bilo da su one izazvane vozilom ili prisustvom nekog drugog feromagnetnog materijala. U slučaju kratkotrajnih promena magnetnog polja koje nisu ekvivalentne promenama izazvanim vozilom FSM će preći iz stanja 1 u stanje 2, nakon čega je neophodno da se vrati u stanje 1, kako bi se izbegla pogrešna interpretacija narednih promena. Vremenski interval t_{21} određuje nakon koliko vremena će se FSM vratiti iz stanja 2 u stanje 1 ako je $B_{diff} < B_{th}$. Ako se FSM ne vrati u stanje 1, nakon kratkotrajne promene, moguća su dva scenarija.

Prvi - nailazak vozila nakon kratkotrajne promene. FSM prelazi iz stanja 1 u stanje 2 pod uticajem kratkotrajne promene magnetnog polja. Ukoliko automat ostane u stanju 2, i naiđe vozilo, prelazak iz stanja 2 u stanje 3 i prelazak iz stanja 3 u stanje 1 desiće se ranije nego što bi to bio slučaj da je FSM prvobitno bio u stanju 1 (promene označene tekstem crvene boje na slici 51). Međutim, to ne bi uticalo na tačnost detekcije vozila.



Slika 51: Promene stanja konačnog automata usled kratkotrajne promene magnetnog polja i prolaska vozila.

Drugi - dve kratkotrajne promene magnetnog polja, što je prikazano na slici 52).



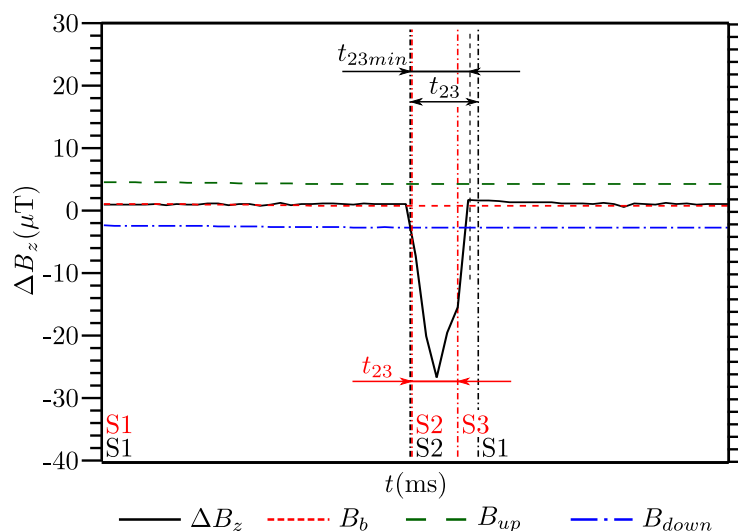
Slika 52: Promene stanja konačnog automata usled dve uzastopne kratkotrajne promene magnetnog polja.

Usled prve kratkotrajne promene FSM prelazi iz stanja 1 u stanje 2. Druga kratkotrajna promena može izazvati prelazak u stanje 3, a zatim povratak u stanje 1. što je identična

promena kao u slučaju prolaska vozila, pa dolazi do greške u detekciji. Ako vremenski interval t_{21} traje predugo, može se desiti da se FSM ne vrati u stanje 1 pre naredne moguće promene. Drugim rečima, mora biti ispunjen uslov $t_{21} < t_{bp}$, gde je t_{bp} vremenski interval između dve promene. Pošto se vrednost t_{bp} ne može izmeriti ili predvideti, t_{21} bi trebalo da ima minimalnu vrednost, tj. FSM treba da se vrati iz stanja 2 u stanje 1 odmah nakon što je uslov $B_{diff} < B_{th}$ ispunjen. Kako je potrebna samo jedna izmerena vrednost da bi ovaj uslov bio zadovoljen jasno je da vremenski interval t_{21} jednak je vremenskom intervalu između dva uzastopna merenja.

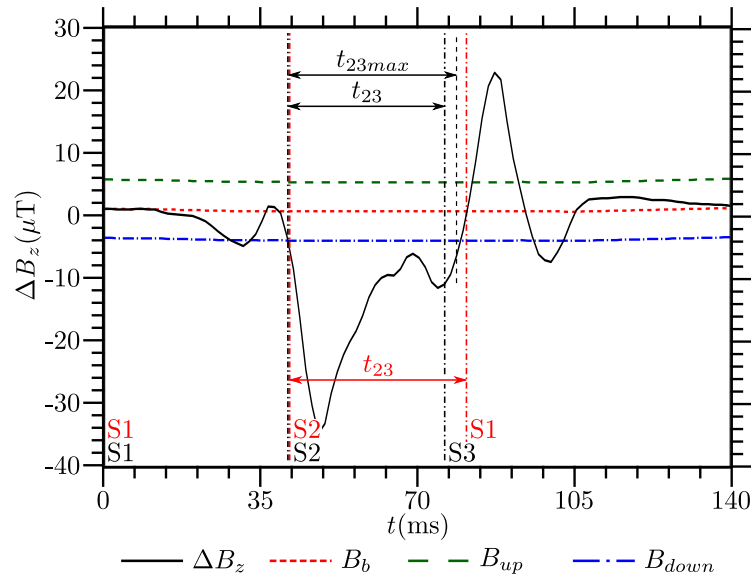
4.1.1.2 Vremenski interval t_{23}

Vremenski interval t_{23} određuje kada FSM prelazi iz stanja 2 u stanje 3, pri ispunjenom uslovu $B_{diff} \geq B_{th}$. Vremenski interval t_{23} treba da traje dovoljno dugo da FSM ne pređe u stanje 3 usled uticaja kratkotrajnih promena, kraćih od t_{23min} . Kratkotrajnom promenom magnetnog polja (slika 53) smatra se svaka promena za koju je ispunjen uslov $B_{diff} \geq B_{th}$ i koja traje kraće od magnetnog potpisa vozila pri maksimalnoj brzini kretanja koja se razmatra.



Slika 53: Određivanje vrednosti vremenskog intervala t_{23} u odnosu na t_{23min} , i njegov uticaj na promene stanja konačnog automata.

Vremenski interval t_{23} mora biti kraći od t_{23max} , što je ukupno vreme u toku koga je $B_{diff} \geq B_{th}$. Ako to nije ispunjeno, FSM ne prelazi u stanje 3 pod uticajem vozila već pod uticajem kratkotrajne promene, a zatim kada je $B_{diff} < B_{th}$, prelazi u stanje 1. Ovaj scenario se takođe može desiti usled pokušaja detekcije vozila čija je brzina veća od maksimalne, pa se zbog toga t_{23max} određuje pri brzini od 120 km/h (slika 54).

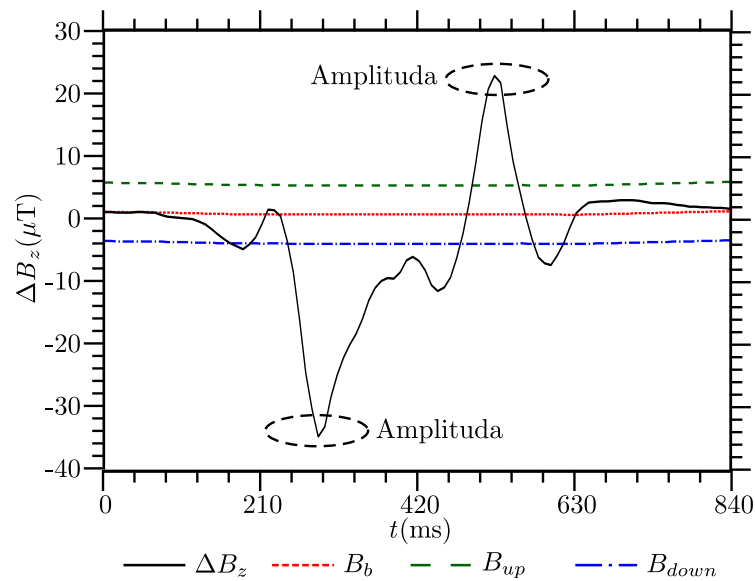


Slika 54: Određivanje vrednosti vremenskog intervala t_{23} u odnosu na t_{23max} , i njegov uticaj na promene stanja konačnog automata.

Vremenski interval t_{23} treba da teži maksimalnoj vrednosti. Na osnovu slike 54 dobijeno je da je $t_{23max} = 41,9$ ms, a broj odmeraka može se izračunati kao $N_{th23} = f \cdot t_{23} + 1 = 5,19$. Broj odmeraka mora biti ceo broj manji od izračunate vrednosti, pa je $N_{th23} \leq 5$.

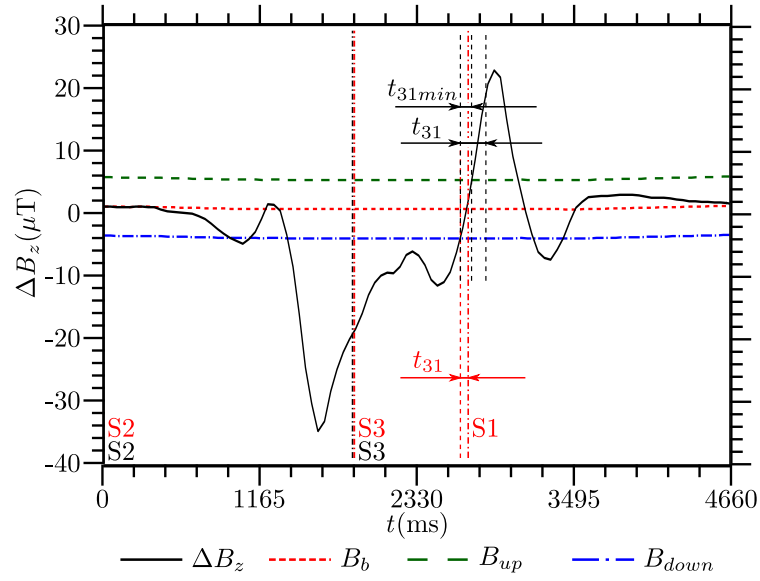
4.1.1.3 Vremenski interval t_{31}

Prilikom prolaska vozila može se desiti da promena magnetnog polja ima više od jedne amplitudne vrednosti (istog ili suprotnog polariteta), kao što je to prikazano na slici 55.



Slika 55: Snimljeni magnetni potpis vozila *VW Polo9N* sa označenim amplitudama.

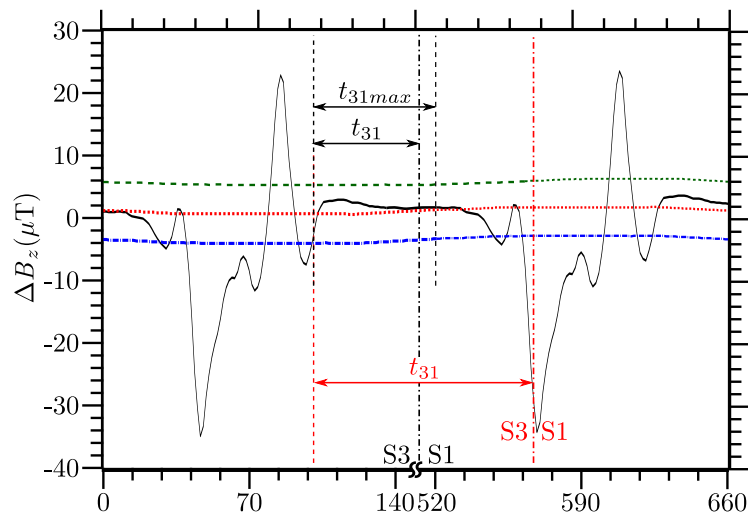
Vremenski interval t_{31} određuje kada FSM prelazi iz stanja 3 u stanje 1, ako je $B_{diff} < B_{th}$. Kao i u slučaju određivanja t_{23} , vrednost vremenskog intervala t_{31} treba da ima vrednost iz određenog opsega (od t_{31min} do t_{31max}). Između amplituda je u toku određenog vremenskog intervala $B_{diff} < B_{th}$, tako da ovaj vremenski interval predstavlja t_{31min} (slika 56). Vremenski interval t_{31} mora biti veći od t_{31min} , jer se u suprotnom može desiti da se FSM vrati u stanje 1 i detektuje amplitude zasebno, pa tako i dva vozila umesto jednog. Vrednost t_{31min} se menja u zavisnosti od brzine vozila, a najveću vrednost ima pri najmanjoj brzini, pa se zbog toga pri ovoj brzini određuje njenoja vrednost.



Slika 56: Određivanje vrednosti vremenskog intervala t_{31} u odnosu na t_{31min} , i njegov uticaj na promene stanja konačnog automata.

Vremenski interval t_{31max} , prikazan na slici 57, počinje kada uslov $B_{diff} < B_{th}$ u okviru stanja 3 postane ispunjen i traje sve do naredne promene magnetnog polja (nailazak narednog vozila). Ako je $t_{31} > t_{31max}$, FSM se neće vratiti u stanje 1 i neće biti spreman da detektuje sledeće vozilo. Vrednost t_{31max} se meri pri najvećoj brzini vozila i najmanjoj vrednosti vremenskog intervala između dva uzastopna vozila. Izmerena vrednost intervala t_{31max} , jednaka je 532,55 ms. Interval od 32,55 ms počinje kada je $B_{diff} < B_{th}$, a završava se kada je vozilo izvan oblasti osetljivosti senzora. Vremenski interval od 500 ms predstavlja minimalno vreme između prolaska dva uzastopna vozila.

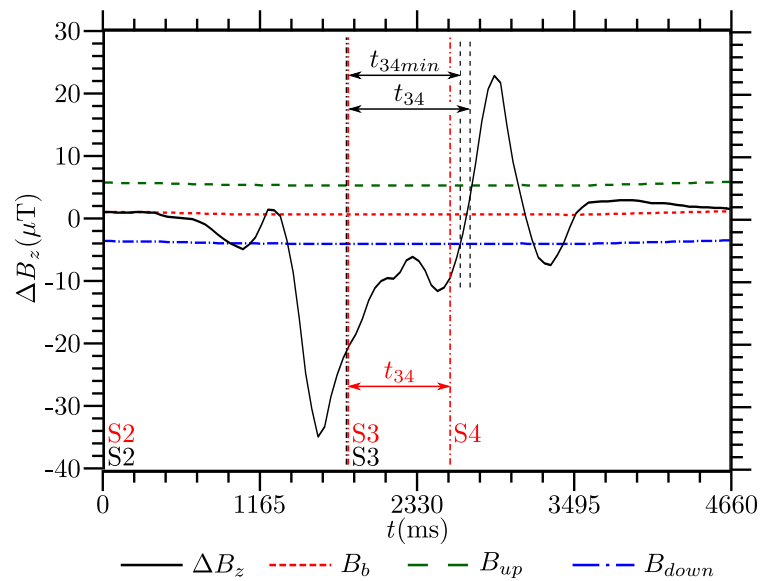
Vrednost t_{31} treba da teži minimalnoj vrednosti da bi se FSM vratio u stanje 1 ranije, čime se sa sigurnošću obezbeđuje da bude spreman za detekciju narednog vozila. Izmerena vrednost t_{31min} , pri brzini vozila od 3,6 km/h, iznosi 87,37 ms, pa je broj uzoraka $N_{th31} = f \cdot t_{31} + 1 = 9,73$. Broj uzoraka mora biti ceo broj, veći od izračunate vrednosti, tako da je $N_{th31} \geq 10$.



Slika 57: Određivanje vrednosti vremenskog intervala t_{31} u odnosu na t_{31max} , i njegov uticaj na promene stanja konačnog automata.

4.1.1.4 Vremenski interval t_{34}

Kada FSM uđe u stanje 3, $B_{diff} \geq B_{th}$. Ako je ovaj uslov ispunjen i nakon vremenskog intervala t_{34} , smatra se da u zoni osetljivosti senzora postoji statični feromagnetni materijal. U tom slučaju, FSM prelazi u stanje 4 u kome se osnovna vrednost ponovo izračunava i vraća se u stanje 1. Nakon uklanjanja feromagnetnog materijala, FSM ponovo prolazi kroz ista stanja. Minimalna vrednost ovog vremenskog intervala (t_{34min}) počinje kada FSM uđe u stanje 3 (slika 58).



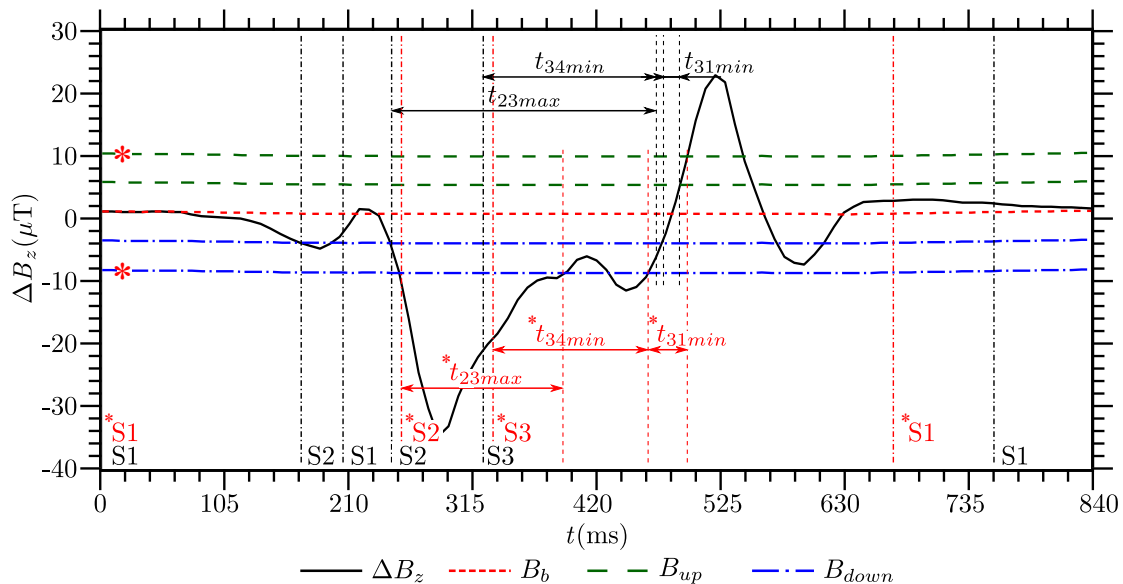
Slika 58: Određivanje vrednosti vremenskog intervala t_{34} u odnosu na t_{34min} , i njegov uticaj na promene stanja konačnog automata.

Interval t_{34min} se završava kada je $B_{diff} < B_{th}$, pri minimalnoj brzini vozila, kako bi se izbegla promena iz stanja 3 u stanje 4 pod uticajem vozila. Vrednost t_{34min} jednaka je razlici između vremenskog intervala t_{23max} pri minimalnoj brzini vozila (3,6 km/h), i istog intervala pri maksimalnoj brzini vozila (120 km/h). Merenjem je dobijeno da je $t_{34min} = 1066,72$ ms. Na osnovu ove vrednosti vrednosti dobija se da je broj uzoraka $N_{th34} = f \cdot t_{34} + 1 = 140,46$. Vremenski interval t_{34} treba da bude duži od izračunate vrednosti, stoga je vrednost brojača $N_{th34} \geq 141$.

Vrednost t_{34max} se može izabrati proizvoljno. Međutim, sa povećanjem ove vrednosti FSM će kasnije ući u stanje 4 i takođe kasnije izračunati novu osnovnu vrednost. Posledica toga je mogućnost da više od jednog vozila prođe dok je FSM u stanju 3, pa ta vozila neće biti uspešno detektovana. Dakle, vremenski interval t_{34} treba da ima minimalnu moguću vrednost.

4.1.2 Rezultati detekcije vozila

Algoritam detekcije zasnovan je na vrednostima magnetnog polja van opsega određenim sa B_{up} i B_{down} . Broj vrednosti koje zadovoljavaju ovaj uslov zavisi od B_{th} . Svi vremenski intervali, osim t_{21} , zavise od granične vrednosti (slika 59). Ova zavisnost se određuje merenjem, na opisan način pri čemu je korišćeno $B_{th} = 5 \mu T$. Ova vrednost je odabrana proizvoljno, kako bi se opisao princip određivanja parametara FSM-a. Dobijene vrednosti vremenskih intervala i brojača FSM -a za različite granične vrednosti prikazane su u tabeli 9.

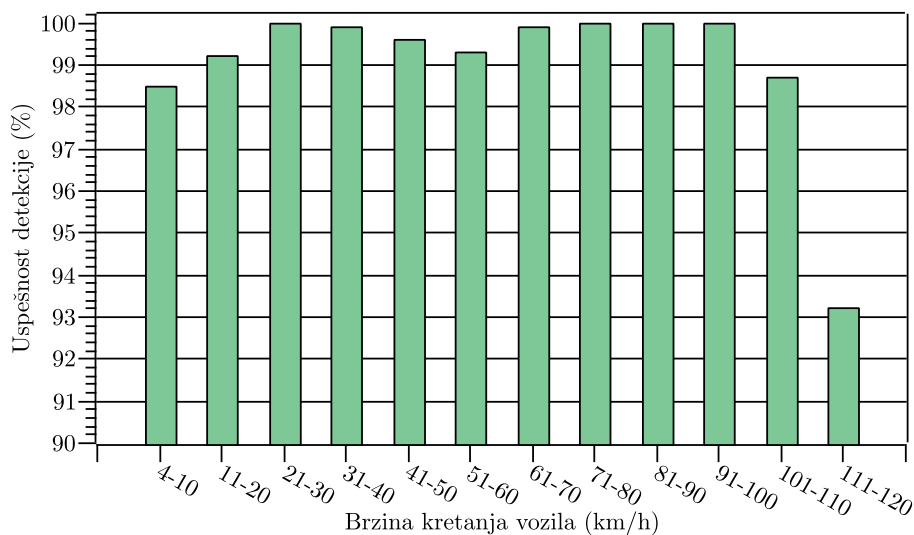


Slika 59: Magnetni potpis vozila VW Polo9N i promene stanja konačnog automata u zavisnosti od granične vrednosti B_{th} .

Tabela 9: Parametri FSM-a pri različitim vrednostima B_{th} .

B_{th} (μT)	t_{23max} (ms)/ $N_{th23max}$	t_{31min} (ms)/ $N_{th31min}$	t_{34min} (ms)/ $N_{th34min}$
1	40,94/6	17,42/3	1322,88/134
2	40,35/6	34,98/5	1304,60/132
3	39,74/5	51,32/7	1283,94/130
4	39,14/5	69,13/8	1262,94/128
5	38,49/5	87,68/10	1242,86/126
6	37,89/5	105,94/12	1223,48/124
7	37,32/5	124,69/14	1204,51/122
8	36,65/5	144,75/16	1183,68/120
9	35,99/5	165,67/18	1161,65/118
10	35,32/5	185,85/20	1139,84/115

Testiranje rada detektora izvršeno je korišćenjem opisanog generatora. Tačnost detekcije ispitivana je za 10 različitih opsega brzina, sa po 1000 vozila u svakom opsegu. Za kreiranje magnetnih potpisa u procesu testiranja rada detektora upotrebljen je opisani generator baziran na mikrokontroleru. Rezultati su predstavljeni na slici 60, a poređenje realizovanog i drugih detektora dato je u tabeli 13.



Slika 60: Uspešnost detekcije vozila u zavisnosti od brzine kretanja.

Preciznost detekcije opisanog detektora je iznad 98% u uslovima otežanog kretanja (4 km/h - 10 km/h) i iznad 99% pri brzinama kojima se vozila najčešće kreću u gradskim sredinama (11 km/h - 50 km/h). Visoka preciznost detekcije je takođe postignuta pri većim brzinama (51 km/h - 100 km/h). Brzina kretanja vozila na auto-putevima su obično iznad 100 km/h, a preciznost detekcije je u ovom slučaju iznad 98% u opsegu brzina od 100 km/h

Tabela 10: Poređenje efikasnosti detekcije različitih algoritama.

Referenca	FSM (broj stanja)	Broj vozila u procesu testiranja	Opseg brzine kretanja vozila (km/h)	Preciznost detekcije (%)
[83]	5	188	18 - 108	99
[84]	6	645	Nije navedeno	98,68
[85]	5	81	32 - 67	97,5
[86]	Nije navedeno	147	30 - 40	100
		105	10 - 15	99,05
Disertacija	4	1000	4 - 10	98,5
			11 - 20	99,2
			21 - 30	100
			31 - 40	99,9
			41 - 50	99,6
			51 - 60	99,3
			61 - 70	99,9
			71 - 80	100
			81 - 90	100
			91 - 100	100
			101 - 110	98,7
			111 - 120	93,2

do 110 km/h, i iznad 93 % pri brzinama od 110 km/h do 120 km/h. Razlog za manje preciznu detekciju pri najvećim posmatranim brzinama je posledica frekvencije merenja. Naime, trajanje magnetnog potpisa pri većim brzinama vozila je kraće, pa mikrokontroler ima manje podataka na osnovu kojih analizira moguće prisustvo vozila. Veća frekvencija merenja, odnosno korišćenje bržeg mikrokontrolera koji omogućava veću učestanost uzorkovanja, može obezbediti više podataka i poboljšati preciznost detekcije pri ovim brzinama.

Algoritam detekcije opisan u radu [83] ima preciznost 99 % u opsegu brzina od 18 km/h do 108 km/h. Dobijeni rezultat uključuje 188 vozila u procesu testiranja. Visoka stopa detekcije (98,68 %) je takođe postignuta u radu [84] sa 645 testiranih vozila (opseg brzina kretanja vozila nije naveden). U radu [85] predstavljen je algoritam čija preciznost detekcije iznosi 97,5 % pri brzinama kretanja vozila od 32 km/h do 67 km/h, a preciznost detekcije u radu [86] je 99,05 % za vozila koja se kreću brzinom od 10 km/h do 15 km/h, i 100 % ako je brzina kretanja od 30 km/h do 40 km/h. Algoritam predstavljen u disertaciji ima visoku preciznost detekcije u širokom opsegu brzina, a njegova osnovna prednost u odnosu na druge navedene algoritme ogleda se u jednostavnijem automatu konačnih stanja, što ga čini jednostavnijim za implementaciju u sistemima baziranim na mikrokontroleru.

Kako talasni oblik magnetnog potpisa zavisi od dužine vozila, njegovo trajanje se razlikuje za duža i kraća vozila koja se kreću istom brzinom. U oba slučaja, predloženi algoritam se može prilagoditi za detekciju promenom vrednosti parametara FSM. Drugi problem može nastati ako je vremenski interval između prolaska dva uzastopna vozila kraći od 500 ms. Međutim to utiče samo na vremenski interval t_{31min} u opisanom algoritmu i može se rešiti promenom vrednosti N_{th31} .

Glava 5

Sistemi za monitoring parametara životne sredine

Emisija štetnih gasova u atmosferi poslednjih nekoliko godina je izuzetno aktuelna tema među ljudima različitih zanimanja, što zbog globalnog zagrevanja i otopljanja tako i zbog sve češćih i intenzivnijih prirodnih katastrofa. Mnogi gasovi doprinose ovim negativnim posledicama, a jedan od primarnih uzroka je emisija ugljen-dioksida (CO_2), koji nastaje sagorevanjem fosilnih goriva. Kako više od polovine svetske populacije trenutno živi u gradskim sredinama, gde su najveći zagađivači vazduha saobraćaj, kao i gradski i lokalni sistemi grejanja. Trenutno je emisija gasova u gradovima neproporcionalna u poređenju sa površinama na kojima se oni prostiru, pa je neophodno pronaći način za njeno smanjenje. Poslednjih godina je posebna pažnja usmerena ka dizajniranju i razvoju održivih gradskih sredina. To uključuje odluke i propise lokalnih vlasti koje imaju za cilj da minimizuju emisiju gasova, razvoj različitih modela emisije CO_2 [101], korišćenje različitih softvera za procenu emisije [102], kao i razvoj sistema kojima se vrši monitoring parametara životne sredine.

Primarni zagađivači vazduha koji nastaju pri sagorevanja fosilnih goriva, uz CO_2 , su ugljen-monoksid (CO), ugljovodonik (HC), sumpor-dioksid (SO_2), ozon (O_3), azot-monoksid (NO), azot-dioksid (NO_2) i druge čestice materije (PM). Izduvni gasovi vozila takođe sadrže organski ugljenik (OC) i elementarni ugljenik (EC) koji imaju negativan uticaj na vidljivost. Pored toga što ovi gasovi imaju negativan uticaj na zdravlje ljudi, HC i oksidi azota oštećuju ozonski omotač. Emisija gasova koja nastaje u saobraćaju uglavnom zavisi od rastojanja koja vozila prelaze (veća rastojanja veća emisija) i od brzine kretanja. Takođe, značajan uticaj na emisiju ima i tip vozila, tačnije karakteristike vozila kao što su masa vozila, vrsta goriva, zapremina motora, oblik vozila (aerodinamičnost) i tehnologija kontrole emisije koju vozilo poseduje. Različiti toksični gasovi mogu imati naročito visoke nivoe koncentracija u tunelima [103]. Zato što je unutrašnjost tunela polu-zatvoren prostor, gasovi se teško raspršuju što ima veliki uticaj na vidljivost [104], čime se ugrožava bezbednost vozača, pešaka kao i radnika održavanja, pa su sistemi za monitoring koncentracije gasova i ventilaciju neophodni.

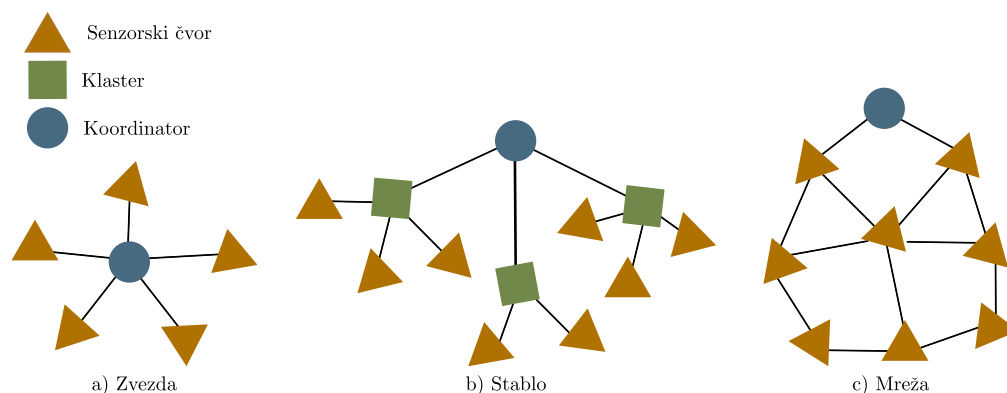
Sistemi za monitoring navedenih parametara mogu biti realizovani kao deo bežične senzorske mreže, u kojoj se podaci sa jedne lokacije (senzorski čvor) šalju do bazne stanice preko koje se prenose do servera, ili sam sistem može imati mogućnost komunikacije sa serverom. U nastavku ovog poglavlja će biti prikazan sistem za merenje parametara životne sredine (temperatura, vlažnosti vazduha i vazdušni pritisak) i koncentracije gasova (CO i NO₂) realizovan kao senzorski čvor. Pri tome će pored realizacije sistema biti objašnjen značaj primene različitih protokola rutiranja radi smanjenja potrošnje energije. Takođe, u ovom poglavlju će biti predstavljen i sistem za merenje temperature koji ima mogućnost direktne komunikacije sa serverom.

5.1 Senzorski čvor za monitoring parametara kvaliteta vazduha

Mnoge aplikacije zahtevaju stotine ili hiljade senzorskih čvorova, često raspoređenih na udaljenim i nedostupnim lokacijama. Senzorski čvor je zapravo autonomni sistem koji ima ne samo senzorsku komponentu, već i ugrađenu mogućnosti obrade, komunikacije i skladištenja podataka. Sa ovim mogućnostima, senzorski čvor nije odgovoran samo za prikupljanje podataka, već i za njihovu analizu, korelaciju i fuziju sopstvenih podataka i podataka iz drugih senzorskih čvorova. Veliki broj senzora, raspoređenih na širokom geografskom području, koji kooperativno vrše monitoring različitih fizičkih parametara formiraju bežični senzorsku mrežu. Senzorski čvorovi komuniciraju ne samo jedni sa drugima već i sa baznom stanicom. Mogućnosti senzorskih čvorova u WSN-u mogu da variraju u velikoj meri, odnosno jednostavniji senzorski čvorovi mogu da vrše monitoring jednog fizičkog parametra, dok složeniji mogu da kombinuju više različitih senzora (npr. akustične, optičke, magnetne). Oni takođe mogu da se razlikuju po svojim komunikacionim mogućnostima, što obuhvata različit domet komunikacije i brzine prenosa podataka. Zbog kompaktnog dizajna, visoke isplativosti, dugog radnog ciklusa [105] i jednostavne instalacije, bežične senzorske mreže se efikasno primenjuju u kućnoj automatizaciji, monitoringu industrijskih procesa [106], inteligentnim transportnim sistemima, monitoringu životne sredine [107], medicinskim sistemima, itd.

U zavisnosti od performansi senzorskih čvorova mogu se formirati mreže različitih topologija, a na slici 61 su prikazane neke od njih. Kada je domet komunikacije svih senzorskih čvorova dovoljno veliki i podaci se mogu preneti direktno sa senzorskog čvora do bazne stanice (ili koordinatora), formira se mreža topologije zvezde (*star*). Ova topologija zasniva se na takozvanoj komunikaciji sa jednim skokom (*single-hop*). U bilo kojoj komunikaciji između dva

čvora, učestvuju samo ti čvorovi i koordinator. Nedostatak ove topologije je taj što je u slučaju kvara koordinatora onemogućena sva mrežna komunikacija.

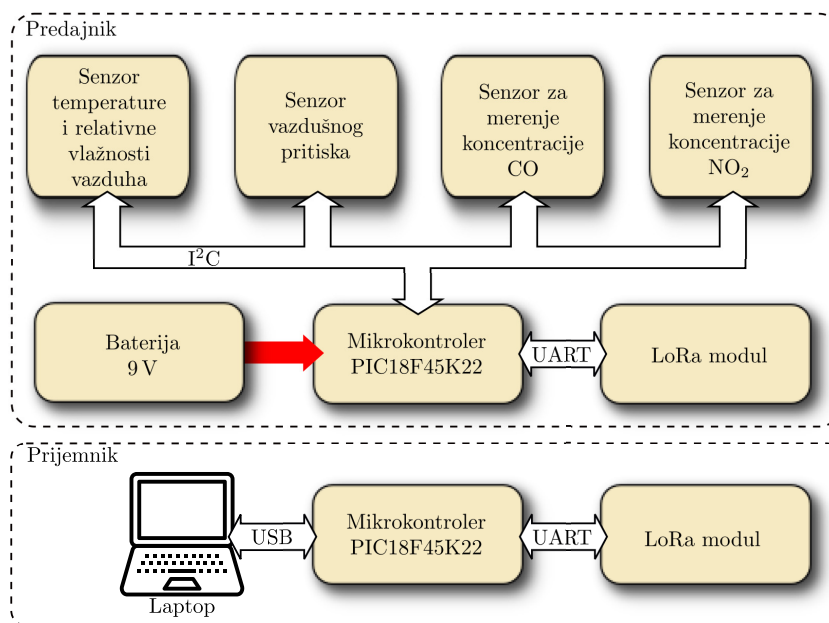


Slika 61: Različite topologije bežičnih senzorskih mreža.

Međutim, senzorske mreže često pokrivaju široka geografska područja, a pritom snaga komunikacionih modula treba da bude minimalna radi očuvanja energije. Shodno tome, često se koristi princip tzv. skokovite komunikacije (*multi-hop*). Ovaj princip komunikacije obuhvata dve topologije, drvo (*tree*) i mreža (*mesh*), a senzorski čvorovi pored toga što vrše slanje sopstvenih podataka, prihvataju i prosleđuju ka baznoj stanici i podatke drugih čvorova. Čvorovi koji imaju ovu, dodatnu ulogu, nazivaju se klasteri. Prednosti ove mreže su mogućnost rekonfiguracije u slučaju gubitka veze sa čvorom ili grupom čvorova, a nedostatak je povećana složenost u odnosu na topologiju mreže zvezda, kao i povećanje mrežnog saobraćaja.

Na osnovu karakteristika senzorskih čvorova, bežične senzorske mreže se mogu podeliti u dve grupe. Homogene, u kojima svi čvorovi imaju iste hardverske i softverske performanse, i heterogene, koje su sastavljene od senzorskih čvorova koji imaju dve ili više različitih karakteristika (računarska snaga, opseg komunikacije, energija). S druge strane, na osnovu načina rada, bežične senzorske mreže se dele na proaktivne i reaktivne. U reaktivnim mrežama senzorski čvorovi trenutno reaguju na promene relevantnih parametara, dok senzorski čvorovi u proaktivnim mrežama vrše periodično prikupljanje i slanje podataka.

Sistem za merenje kvaliteta vazduha čija je blok šema predstavljena na slici 62, sastoji se od senzora za merenje temperature, vlažnosti vazduha, vazdušnog pritiska i koncentracije ugljen-monoksida i nitrid-dioksida. Svi iskorišćeni senzori su digitalni, a podaci se između njih i mikrokontrolera (PIC18F45K22) razmenjuju preko I²C protokola. Dobijeni podaci se nakon obrade, ka baznoj stnici, prenose bežičnim putem, korišćenjem LoRa modula. Sve navedene komponente predstavljaju, odnosno čine senzorski čvor, čiji je zadatak prikupljanje, obrada i slanje podataka, tj. senzorski čvor koji u okviru senzorske mreže ima ulogu predajnika.

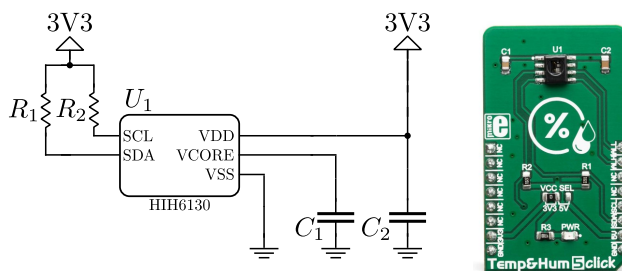


Slika 62: Blok šema sistema za merenje kvaliteta vazduha.

Na prijemnoj strani se podaci prihvataju LoRa modulom, i nakon obrade u mikrokontroleru prosleđuju do laptop računara na skladištenje i dalju analizu.

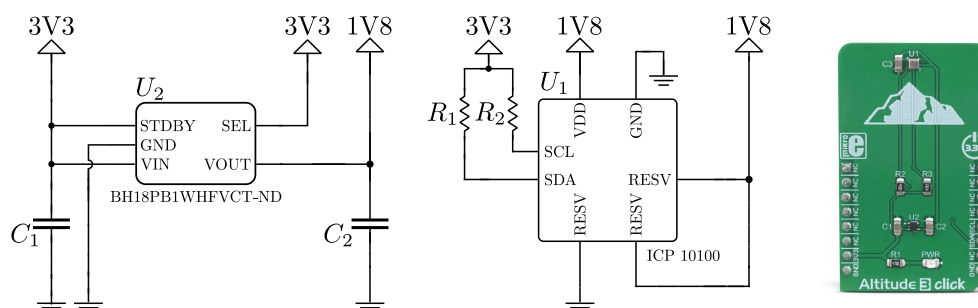
5.1.1 Senzori za merenje kvaliteta vazduha

Merenje temperature i relativne vlažnosti vrši se korišćenjem senzora HIH6130 [108] (integrirano kolo U_1 na slici 63). Opseg vrednosti temperature koji se može meriti je od 0 do 50 °C, sa preciznošću $\pm 0,5$ °C. Preciznost merenja relativne vlažnosti vazduha je ± 4 %RH, a ukupan opseg merenja je od 10 do 90 %RH. Ovaj senzor se odlikuje visokom pouzdanošću i dugotrajnom stabilnošću, visokim odnosom signal-šum, i malom potrošnjom energije tokom rada. To ga čini pogodnim za primenu u meteorološkim stanicama koje rade na baterijskom napajanju, termostata i regulatorima, klima uređajima, sistemima za grejanje i ventilaciju i drugim sličnim aplikacijama.



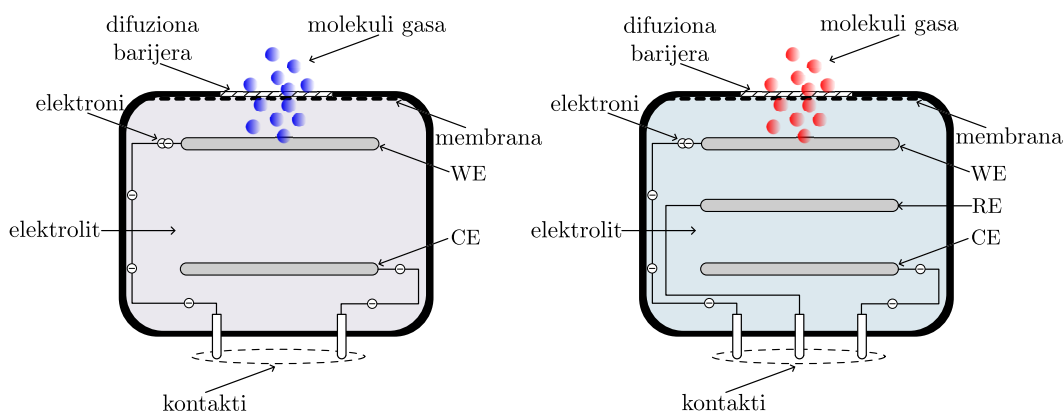
Slika 63: Električna šema i štampana ploča sa senzorom HIH6130.

Senzor vazdušnog pritiska (U_1) ICP 10100 [109], prikazan na slici 64, je realizovan u MEMS tehnologiji, sa opsegom merenja od 30 do 110 kPa, i preciznošću od ± 1 Pa. Male dimenzije i niska potrošnja energije ($1,3 \mu\text{A}$ u modu niske potrošnje) ga čine odgovarajućim izborom u prenosivim uređajima za merenje i IoT uređajima sa baterijskim napajanjem. Deo strukture senzora radi pri naponu napajanja od $1,8 \text{ V}$, pa se iz tog razloga upotrebljava naponski regulator (U_2).



Slika 64: Električna šema i štampana ploča sa senzorom ICP 10100.

Za merenje koncentracija CO i NO_2 upotrebljeni su SPEC SensorTM senzori 3SP CO 1000 i 3SP NO2 20, respektivno [110, 111]. Ovi senzori su amperometrijski gasni senzori, odnosno elektrohemijski senzori male potrošnje energije koji na svom izlazu generisu struju proporcionalnu koncentraciji gasa [112]. Tipičan izgled strukture elektrohemijskog senzora je prikazan na slici 65.

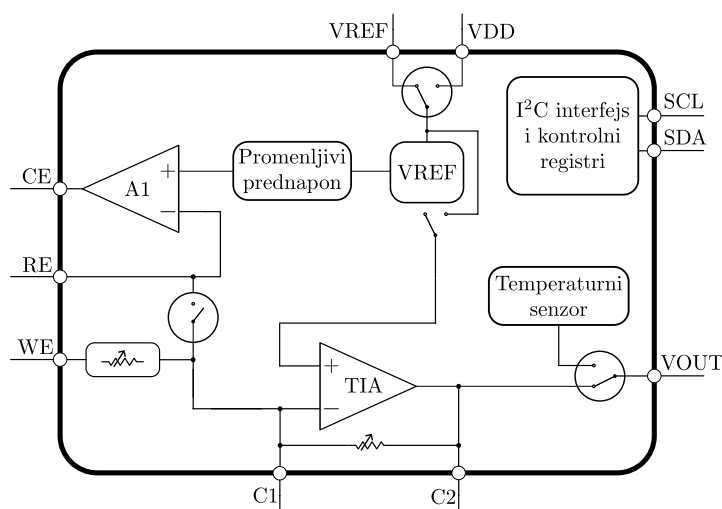


Slika 65: Struktura elektrohemijskog senzora sa dve (levo) i tri (desno) elektrode.

Osnovne komponente elektrohemijskog senzora su radna ili senzorska elektroda (*Working Electrode* - WE), kontraelektroda (*Counter Electrode* - CE) i, kod senzora sa tri elektrode, referentna elektroda (*Reference Electrode* - RE). Elektrode se nalaze unutar kućišta uronjene u tečni elektrolit. Radna elektroda se nalazi ispod teflonske membrane koja je porozna na gas

i istovremeno nepropusna za elektrolit. Gas ulazi unutar senzora difuzijom kroz membranu. Kada gas dođe do radne elektrode javlja se hemijska reakcija pri kojoj dolazi do oksidacije ili redukcije u zavisnosti od tipa gasa. Rezultat oksidacione reakcije su elektroni koji od radne elektrode kroz eksterno kolo dolaze do kontraelektrode. Suprotno tome, pri redukcionalnoj reakciji dolazi do protoka elektrona od kontraelektrode do radne elektrode. Kretanje elektrona predstavlja struju radne elektrode što je izlazni signal senzora. Dodavanjem treće, referentne elektrode, obezbeđuje se stabilniji elektrohemijski potencijal u elektrolitu, čime se poboljšava stabilnost, odnos signal-šum i vreme odziva, u odnosu na senzore koji se sastoje od dve elektrode.

Za pouzdan rad SPEC senzora potrebno je obezbediti fiksni prednapon, što je u stvari razlika potencijala između radne i referentne elektrode. S obzirom da je izlazni parametar senzora struja, kako bi bilo moguće povezati senzor sa mikrokontrolerom i vršiti očitavanja koncentracije gasa, neophodno je koristiti transimpedansni pojačavač (*Transimpedance Amplifier* - TIA). Integrirano kolo LMP91000, čija je unutrašnja struktura predstavljena na slici 66, obezbeđuje dva navedena uslova [113].

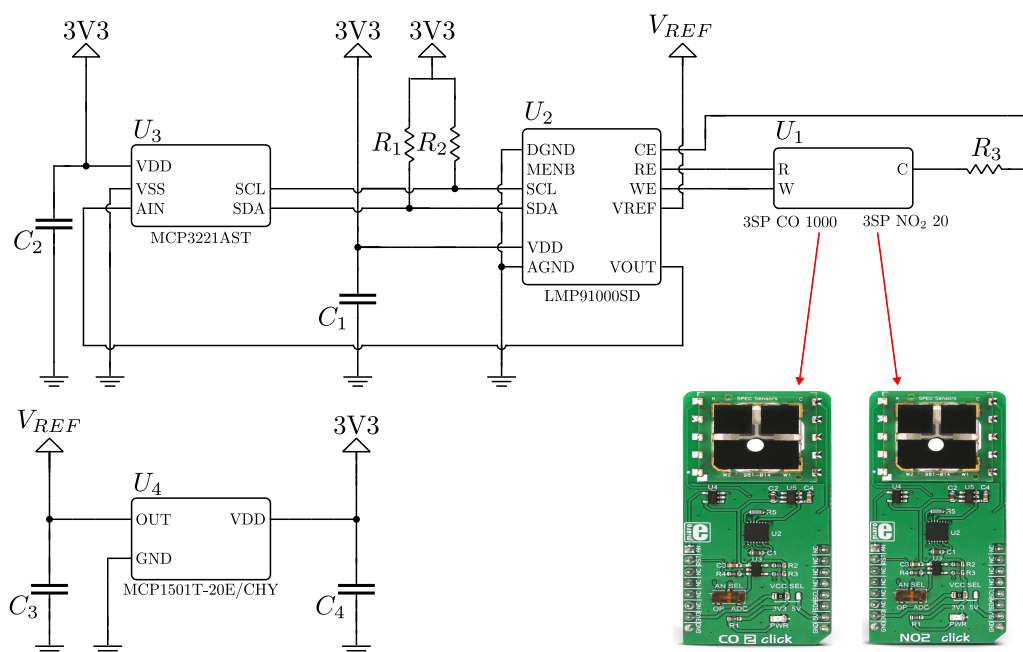


Slika 66: Unutrašnja struktura integrisanog kola LMP91000.

U osnovi LMP91000 je kolo potencijostata (hardver kojim se vrši kontrola rada elektrohemijiskog senzora sa tri elektrode). Sastoji se od ulaznog diferencijalnog pojačavača kojim se vrši upoređivanje potencijala između radne i referentne elektrode sa potrebnom vrednosti prednapona. Signal greške se pojačava i primenjuje na kontraelektrodu (preko kontrolnog pojačavača - A1). Promena impedanse između radne i referentne elektrode izaziva promenu napona koji se primenjuje na kontraelektrodu, kako bi se održao konstantan napon između radne i referentne elektrode. Polaritet i vrednost prednapona se može programirati da bude

od 1 % do 24 % (14 mogućih vrednosti) napajanja ili spoljašnjeg referentnog napona. Transimpedansni pojačavač povezan sa radnom elektrodom koristi se za obezbeđivanje napona koji je proporcionalan izlaznoj struji senzora. U samom integrisanom kolu ovaj pojačavač ima sedam programabilnih novoa pojačanja, a izbor pojačanja vrši se preko internih otpornika. Uz to, nivo pojačanja može se odrediti otpornikom koji se povezuje eksterno. Pored kontrole i regulacije prednapona, kontrolnim pojačavačem se se obezbeđuje početno naelektrisanje potrebno za rad senzora.

LMP91000 se odlikuje izuzetno malom potrošnjom energije i radi u opsegu napona od 2,7 do 5,25 V. Može se koristiti za više tipova elektrohemijskih senzora kao što su trožilni senzori gasova sa tri i senzori galvanskih ćelija sa dva kontakta, pri ospegu osetljivosti od 0,5 do 9500 nA/ppm. U okviru kola postoji integrisan temperaturni senzor koji se može koristiti za dodatnu korekciju signala ili za praćenje temperaturnih uslova na senzoru. Senzori su kalibrisani tokom procesa proizvodnje tako da je koeficijent proporcionalnosti između izlazne struje i koncentracije gasa poznat pre početka merenja. Programiranje i očitavanje podataka sa senzora vrši se preko I²C interfejsa. Pri praktičnoj realizaciji sistema iskorišćeni su senzori integrisani na odvojenim štampanim pločama, kao što je prikazano na slici 67.



Slika 67: Električna šema i štampana ploča sa sensorima 3SP CO 1000 i 3SP NO₂ 20.

Izlazna struja senzora (U_1) se korišćenjem transimpedansnog pojačavača (U_2) konvertuje u napon. Potreban referentni napon, koji koristi pojačavač, dobija se integrisanim kolom U_4 . Izlazni napon se sa pojačavača dovodi do 12-bitnog analogno-digitalnog konvertora (U_3).

5.1.2 Prenos podataka upotrebom LoRa radio modula

Najviše energije senzorski čvor u toku rada troši tokom slanja podataka. Jedan od načina za smanjenje potrošnje energije je korišćenjem odgovarajućih primopredajnih modula. Jedan od najefikasnijih načina za prenos podataka, sa stanovišta potrošnje energije, realizuje se korišćenjem LoRa modula. LoRa modul predstavlja fizički sloj LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) bežičnog komunikacionog protokola razvijenog od strane LoRa Alliance [114]. Rad LoRa modula je zasnovan na CSS (*Chirp Spread Spectrum*) tehnici modulacije u kojoj se signal uskog opsega širi na veći frekventni opseg, čime se postiže visoka otpornost rezultujućeg modulisanog signala na šum i smetnje [115], a odlikuje ga niska potrošnja energije [116] i veliki domet komunikacije.

CSS je razvijen za radarske aplikacije 1940-ih godina. Inicijalno je korišćen u vojnim i bezbednosnim komunikacionim sistemima, a u poslednjih dvadesetak godina ova tehnika modulacije je sve više prihvaćena u brojnim komercijalnim aplikacijama. Širenje spektra u LoRa modulaciji postiže se generisanjem tzv. *chirp* (*compressed high intensity radar pulse*) signala [117]. *Chirp* je sinusni signal konstantne amplitude, čija frekvencija linearno ili nelinearno raste (*up-chirp*) ili opada (*down-chirp*) u toku vremena, tako da zauzima ceo propusni opseg.

U LoRa modulaciji jedan *chirp* predstavlja jedan simbol, a parametri modulacije, tj. brzina prenosa podataka i potrošnja energije [118] zavise od sledećih parametara: propusni opseg (*Bandwidth* - BW), faktor širenja (*Spreading Factor* - SF) i faktor ili brzina kodiranja (*Coding Rate* - CR).

Propusni opseg - Moguće vrednosti propusnog opsega za LoRa modulirani signal su 125, 250 i 500 kHz. Jedan simbol tj. jedan *chirp* zauzima ceo propusni opseg i sastoji se iz delova (*chip*). Brzina slanja chip-ova R_c (*Chip Rate*) je ista kao propusni opseg $R_c = BW$. Dakle, sa povećanjem propusnog opsega signala povećava se brzina prenosa, čime se smanjuje vreme prenosa.

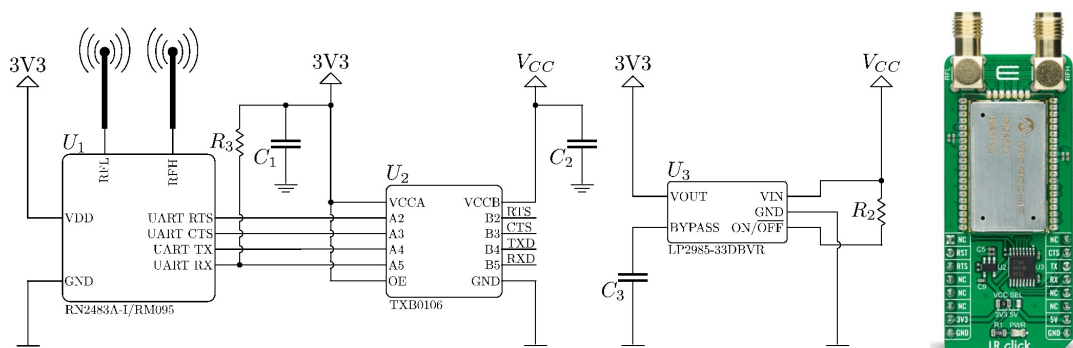
Faktor širenja - Jedan simbol može da sadrži od 7 do 12 bitova informacije, što se određuje na osnovu vrednosti SF. Brzina slanja simbola R_s (*Symbol Rate*) može se izračunati kao $R_s = R_c / 2^{SF}$. Dakle, sa povećanjem vrednosti SF smanjuje se brzina prenosa podataka, a kako broj poslatih chip-ova sa većim vrednostima SF raste, povećava se i potrošnja energije. Potrošnja energije nema značajnu varijaciju sa promenom veličine paketa pri nižim vrednostima SF, ali pri većim vrednostima SF ove varijacije postaju primetne [119]. Međutim, pri većim vrednostima SF osetljivost prijemnika se povećava, što istovremeno omogućava slanje podataka na većim udaljenostima. Predajnik i prijemnik moraju imati iste vrednosti ovog parametra.

Faktor kodiranja - Radi dodatnog poboljšanja kvaliteta prenosa, u LoRa modulaciji se u cilju detekcije i otklanjanja grešaka koristi ciklično kodiranje. Međutim, to dovodi do dodatnog utroška energije. Brzina kodiranja CR (*Coding Rate*) opisuje odnos stvarnih podataka i podataka dodatnih za ispravljanje grešaka. Moguće vrednosti su od $4/5$ do $4/8$. Prvi broj u odnosu označava broj korisnih bitova, a drugi koliko se bitova koristi za kodiranje. Pri manjoj brzini kodiranja (najmanja je za $4/8$) je potrebno više vremena za slanje, kao i više energije, ali to prijemu omogućava dekodiranje signala pri nižoj osetljivosti.

Brzina prenosa podataka R_b pri LoRa modulaciji (*Bit Rate* ili *Data Rate*) može se, na osnovu opsanih parametara, izračunati kao:

$$R_b = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \cdot \frac{4}{4 + CR}. \quad (5.1)$$

Dodatno smanjenje potrošnje energije se može postići smanjenjem izlazne snage predajnika i napona napajanja. Povećanje izlazne snage treba koristiti za veće opsege prenosa pre povećanja SF , a primopredajnik treba isključiti tokom režima mirovanja [120]. Model potrošnje energije treba takođe da uzme u obzir potrošnju energije komutacionih komponenti kojima se vrši promena režima rada radio modula [121]. U okviru sistema za merenje kvaliteta vazduha upotrebljen je RN2483 [122] LoRa modul, prikazan na slici 68.



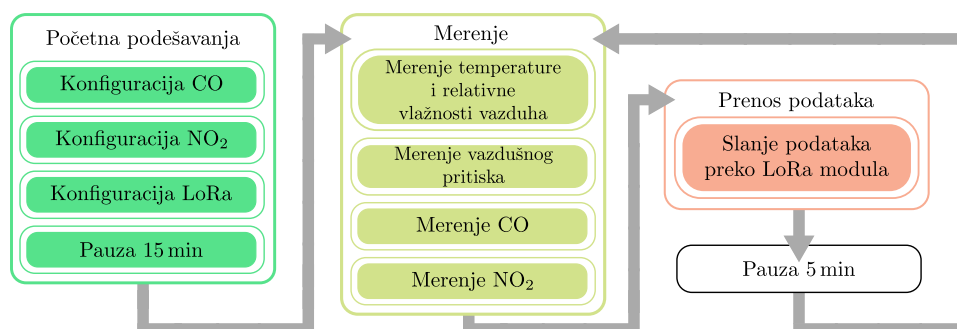
Slika 68: Električna šema i štampana ploča RN2483 LoRa modula.

Ovaj modul razvijen je od strane kompanije Microchip, koji odlikuje niska potrošnja energije i daleki domet komunikacije. Radi pri naponu napajanja od 2,1 do 3,6 V, i može se koristiti u temperaturnom opsegu od -40 do 85°C . Komunikacija između modula i mikrokontrolera vrši se preko UART protokola. Snaga predajnika RN2483 modula se može podešavati, pri čemu je maksimalna vrednost 14 dBm, dok je osetljivost prijemnika do -148 dBm, pa se na taj način može postići različit domet komunikacije. Pokrivenost prenosa podataka je u urbanim sredinama više od 5 km, a u nenaseljenim područjima preko 15 km. Ovaj modul poseduje arhitekturu koja mu omogućava razmenu podataka na dve frekvencije, 433 i 868 MHz, pri programabilnoj brzini prenosa podataka maksimalne vrednosti 5468 bps. Na

Na električnoj šemi se nalazi i LoRa radio modul, kao i konektor za SD karticu. Sa šeme su izostavljeni naponski regulatori koji se nalaze na istim štampanim pločama kao i senzori. Takođe, nije prikazan ni translator napona koji je na štampanoj ploči sa LoRa modulom. Ova integrisana kola su već prikazana na prethodnim električnim šemama, a kako su na samim pločama već povezana sa sensorima ona ne utiču na način povezivanja svih senzora i LoRa modula sa mikrokontrolerom.

5.1.3 Rezultati merenja kvaliteta vazduha

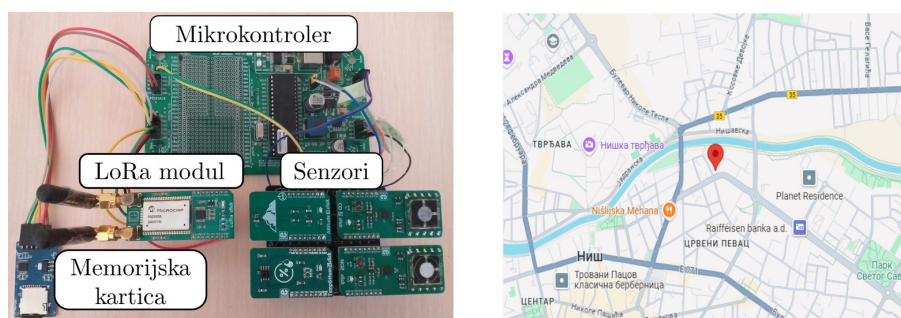
Algoritam rada sistema prikazan je na slici 70. Nakon uključivanja sistema vrši se konfiguracija gasnih senzora i LoRa modula. Zatim je potrebno sačekati 15 min kako bi se na sensorima završilo podešavanje referentnih naponskih nivoa i time stvorili ulovi za merenje.



Slika 70: Algoritam rada sistema za monitoring kvaliteta vazduha.

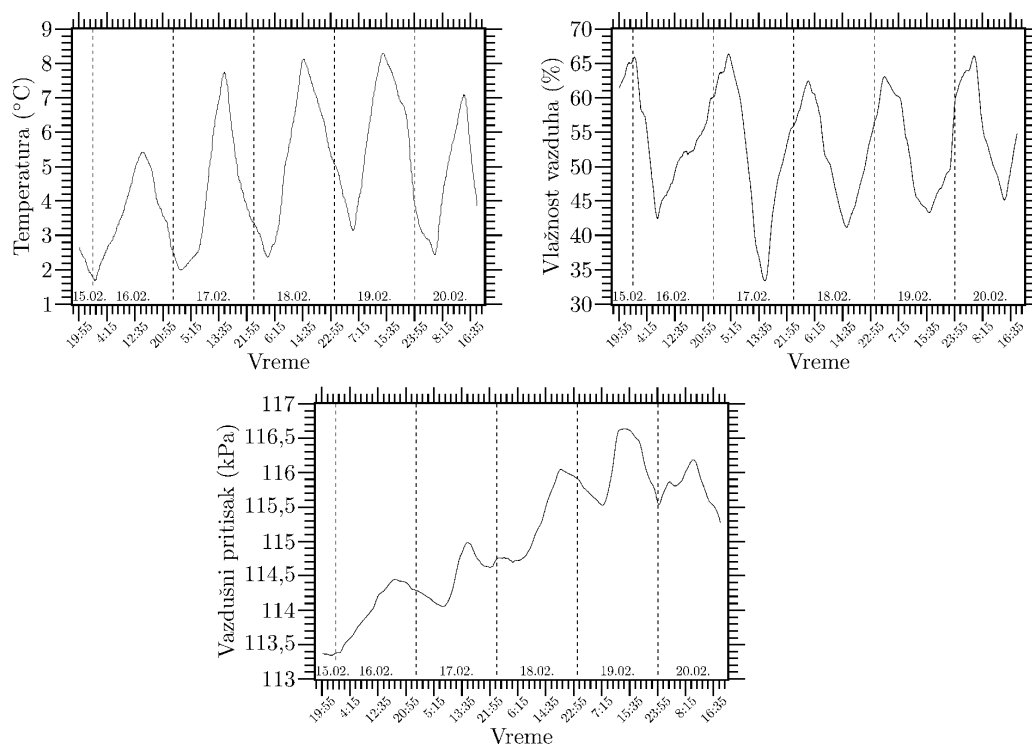
Proces merenja sastoji se od očitavanja vrednosti sa senzora i njihove obrade, odnosno konverzije u paket koji se prosleđuje LoRa modulu. Zatim se vrši slanje pripremljenog paketa nakon čega se pravi pauza od 5 min. Trajanje pauze je izabrano proizvoljno kako bi se u kontinuitetu pratila promena koncentracije gasova. Treba naglasiti da se povećanjem pauze između dva uzastopna merenja može smanjiti ukupna potrošnja energije i povećati trajanje baterije (u slučaju da se sistem napaja na taj način), ali se time smanjuje preciznost praćenja promene merenih vrednosti.

Akvizicija podataka vršena je na računaru sa kojim je prijemnik bio povezan, a predajnik je, pored slanja, izmerene vrednosti upisivao na memorijsku karticu. Memorijska kartica nije neophodna za rad sistema, a upotrebljena je kako bi se nakon završetka merenja podaci sačuvani na njoj uporedili sa podacima koji su stigli i prijemnika i time potvrdila ispravnost rada sistema. Tokom merenja sistem je bio postavljen na adresi Bulevar Nemanjića 1, Niš, na terasi sedmog sprata stambene zgrade. Praktična realizacija celog sistema i lokacija merenja prikazani su na slici 71. Proces merenja trajao je od 15.-og februara u 20 h, do 20.-og februara 2023. god. u isto vreme.



Slika 71: Praktična realizacija sistema za monitoring kvaliteta vazduha i lokacija na kojoj su merenja vršena.

U nastavku su prikazani rezultati merenja, odnosno mereni parametri vremenskih uslova kao i koncentracije CO i NO₂ za navedenu lokaciju u datom vremenskom periodu [123]. Na slici 72 su prikazane promene temperature, relativne vlažnosti vazduha i vazdušnog pritiska.

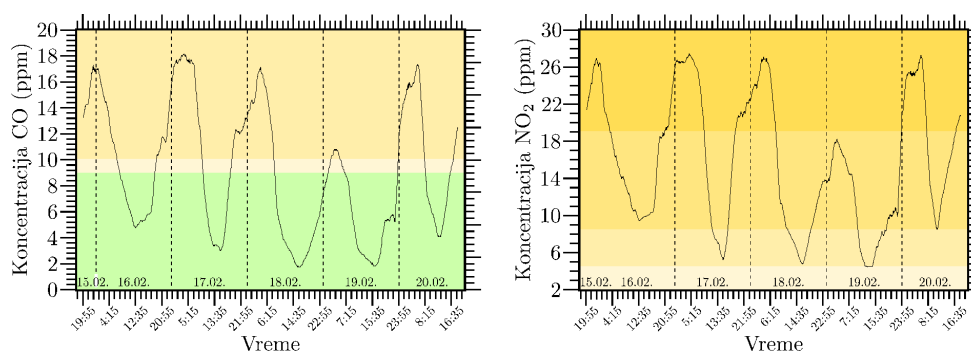


Slika 72: Rezultati merenja temperature, relativne vlažnosti vazduha i vazdušnog pritiska.

U vremenskom periodu kada je vršeno merenje, temperatura se menjala u opsegu od jedan do devet stepeni na Celzijusovoj skali, što je u skladu sa podacima koji se mogu dobiti sa zvaničnih meteoroloških stanica. Najviše temperature su zabeležene tokom poslepodnevnih časova. S obzirom da postoji poklapanje između izmerenih i zvanično dostupnih vrednosti, ovi rezultati se mogu iskoristiti kao potvrda da sistem pouzdano radi. Relativna vlažnost vazduha se menjala u opsegu od 30 do 70 %, pri čemu su najveće vrednosti vlažnosti vazduha

izmerene pri najnižim temperaturama i obrnuto. Dnevne promene vazdušnog pritiska takođe zavise od doba dana, a na petodnevnom nivou je vrednost pritiska bila u opsegu od 113 do 117 kPa.

Kada su u pitanju parametri zagađenosti vazduha, odnosno koncentracije CO i NO₂ njihov nivo se takođe menjao u zavisnosti od doba dana (slika 73).



Slika 73: Rezultati merenja CO i NO₂.

Koncentracija CO bila je najveća u kasnim večernjim ili ranim jutarnjim satima, a na lokaciji merenja je njena vrednost bila do 18 ppm. Izmerene vrednosti koncentracije se mogu posmatrati u okviru tri nivoa. Za koncentracije manje od 9 ppm može se smatrati da vazduh nije zagađen. Drugi značajan opseg je od 9 do 10 ppm što je maksimalna dozvoljena vrednost za zatvorene prostorije. Treba obratiti pažnju na koncentracije veće od 10 ppm, jer se pri tim vrednostima vazduh smatra zagađenim i može imati negativan uticaj na zdravlje ljudi. Maksimalne, a i minimalne vrednosti koncentracije NO₂ su izmerene u istom delu dana kada i maksimalne i minimalne vrednosti koncentracije CO, pri čemu su izmerene vrednosti u opsegu do 30 ppm. Već pri koncentraciji od 5 ppm, NO₂ se može osetiti putem čula mirisa. Izloženost pri koncentraciji od 10 ppm može dovesti do iritacije grla i sluzokože nosa, dok koncentracija od 20 ppm može izazvati iritaciju oka.

Koncentracija merenih gasova se menja u zavisnosti od saobraćajnog toka, tj. broja vozila koja učestvuju u saobraćaju i emituju gasove. Takođe, treba uzeti u obzir da lokalna ložišta emituju značajne količine ovih gasova. Dobijene vrednosti ne treba uzeti kao stoprocentno tačne. Sistem se nalazi na terasi koja je delimično zatvorena tako da nema neometanog protoka vazduha. Da bi se dobila preciznija zavisnost koncentracije gasova od broja vozila u saobraćaju sistem za merenje treba postaviti bliže kolovozu i odrediti broj vozila na saobraćajnicama. Međutim, dobijeni rezultati pokazuju da se ovakav sistem može iskoristiti za pouzdan monitoring kvaliteta vazduha.

5.1.4 Primena protokola rutiranja u cilju uštede energije

Pored upotrebe mikrokontrolera, senzora i radio modula niske potrošnje, postoje i dodatne metode kojima se može ostvariti značajna ušteda električne energije unutar senzorskog čvora i time produžiti njegovo vreme autonomnog rada.

Prenos podataka u bežičnim senzorskim mrežama se može klasifikovati na direktne i indirektne metode. Mreža sa metodom direktnog prenosa podataka obuhvata senzorske čvorove i baznu stanicu. Problemi ove metode se javljaju ako je senzorski čvor na velikoj udaljenosti od bazne stanice. Usled neophodne velike izlazne snage predajnika čvor može relativno brzo ostati bez električne energije (baterijsko napajanje). Drugi problem predstavlja mogućnost da podaci i pored velike izlazne snage predajnika ne stignu do same bazne stanice. Jedno od mogućih rešenja koje bi dovelo do smanjenja potrošnje je smanjenje rastojanja između senzorskih čvorova i bazne stanice. Time bi se postigla mogućnost korišćenja nižeg nivoa izlazne snage radio predajnika koji se nalaze u čvorovima na manjoj udaljenosti od bazne stanice. Jedan od modela optimizacije potrošnje zasnovan na prenosu podataka na nižem energetsom nivou predstavljen je u [124]. Metoda indirektnog prenosa koja može da reši pomenute probleme sadrži senzorske čvorove sa dodatnom funkcionalnošću. Ovi senzorski čvorovi, zvani glave klastera, prikupljaju podatke sa drugih senzorskih čvorova (članovi klastera) i zatim ih šalju baznoj stanici. Odabir čvora koji će biti glava klastera vrši se koristeći statističke operacije zasnovane na trenutno dostupnoj energiji svih čvorova u posmatranom klasteru.

Prikupljanje informacija, tj. njihovo slanje se obično vrši po fiksnom rasporedu. Objedinjeni metod prikupljanja podataka u višestrukom pristupu sa vremenskom raspodelom (*Time Division Multiple Access* - TDMA) može da obezbedi ujednačenu potrošnju energije u svim senzorskim čvorovima [125]. Ovaj metod je primenljiv u ranije pomenutim proaktivnim mrežama.

Drugi način za smanjenje potrošnje leži u smanjenju količine podataka koje senzorski čvor šalje, što se postiže implementacijom takozvanih protokola rutiranja.

5.1.4.1 TEEN protokol

Jedan od protokola rutiranja je TEEN (*Threshold-Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol*) protokol. U ovom protokolu senzorska mreža je podeljena na klastere. Senzorski čvor, član klastera, će prenositi podatke samo ako je ispunjen jedan od dva uslova. Izmerene vrednosti su veće od granične vrednosti *Hard Threshold* - HT, ili je promena izmerene vrednosti veća od unapred definisane granične vrednosti promene *Soft Threshold* - ST. S obzirom da se radi o prenosu podataka usled nastalih promena izmerenih vrednosti, ovaj protokol je razvijen sa ciljem implementacije u reaktivnim mrežama.

Potencijalni problem može nastati ako izmerene vrednosti/promene nikada ne dostignu vrednost HT/ST. U tom slučaju ne postoji komunikacija između senzorskog čvora i bazne stanice, što dovodi do nepoznatog statusa senzorskog čvora. Zbog toga je uvedena dodatna granična vrednost određena vremenom [126]. Prvi uslov za prenos podataka je vezan za HT ili ST vrednosti, a drugi je određen na osnovu graničnog vremenskog intervala. Ako u toku definisanog vremenskog intervala nije bilo slanja podataka usled promena HT ili ST graničnih vrednosti, vrši se prenos podataka sa vremenskim prioritetom. Drugi problem predstavlja pojava izolovanih čvorova koji nastaju zbog nasumične selekcije glave klastera i neravnomerne količine dostupne energije koje imaju senzorski čvorovi. Ovaj problem je rešen modifikovanim TEEN protokolom (TEEN-IN), koji može da oktriže izolovani čvor i ponovo ga priključi mreži [127]. U njemu se odabir glave klastera vrši ne samo na osnovu funkcija verovatnoće, već i na osnovu energetskeg odnosa između čvorova. Takođe, postoji hibridni algoritam za optimizaciju potrošnje energije zasnovan na neuronskoj mreži i *Fuzzy* logici [128], koji uzima u obzir dostupnu energiju, blizinu bazne stanice i faktore mobilnosti.

Implementacija ovog protokola efikasno smanjuje potrošnju energije. Međutim, manje podataka na strani prijemnika ima tendenciju da smanji tačnost merenih parametara. U nastavku će biti opisan jedan od načina za određivanje ST vrednosti kojom se obezbeđuje visoka tačnost podataka na strani prijemnika. Pored toga, biće razmotreno koliko energije može da se uštedi u senzorskom čvoru koji prenos podataka vrši prikazanim LoRa modulom pri implementaciji TEEN protokola sa različitim ST vrednostima.

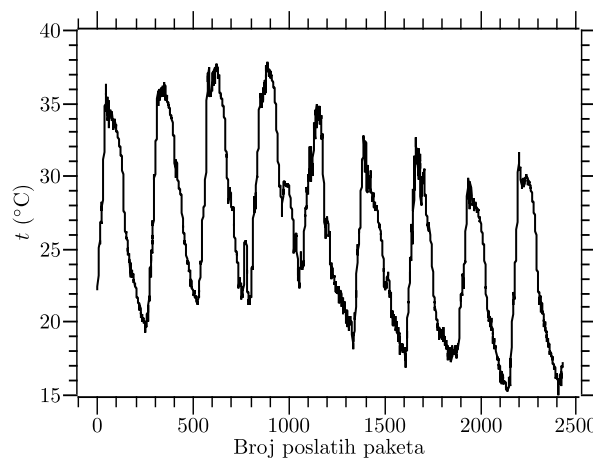
5.1.4.2 Određivanje ST vrednosti u okviru TEEN protokola

Iako je primena TEEN protokola detaljno opisana, naučna literatura ne sadrži radove koji opisuju proces određivanja ST vrednosti. Implementacijom TEEN protokola zasnovanog na ST vrednosti smanjuje se količina podataka koji se prenose sa senzorskog čvora. To doprinosi smanjenju potrošnje energije u senzorskom čvoru, ali manje podataka na strani prijemnika smanjuje tačnost merenog parametra. Prijemnik rekonstruiše originalne podatke koristeći primljene vrednosti sa neizbežnom greškom, koja zavisi od broja primljenih podataka. Dakle, vrednost greške je veća ako se rekonstrukcija vrši korišćenjem manje primljenih vrednosti, tj. ako je vrednost ST veća. S druge strane, manja vrednost ST povećava tačnost na strani prijemnika, ali senzorski čvor troši više energije.

Vrednost ST će se naravno razlikovati u zavisnosti od primene, tj. parametra čiji monitoring senzorski čvor treba da vrši. Analiza potrošnje energije je sprovedena za ranije prikazani senzorski čvor koji je upotrebljen za monitoring kvaliteta vazduha. Pri tome je analizirana samo promena temperature, dok su ostali senzori isključeni, a čvoru je dodato električno kolo za merenje struje na osnovu koje se izračunava potrošnja energije potrebna za jedno

slanje. Tokom merenja senzorski čvor je bio instaliran na adresi Veljka Miljkovića 4 (grad Niš), a merenja su vršena od 25.08.2023., u 7:30, do 03.09.2023., u 10:25 h.

Merenja su vršena na svakih 5 min bez primene protokola rutiranja, tako da je broj ukupno poslatih paketa 2427. Jedan paket se sastoji od sledećih elemenata: *NodeID* - podatak koji predstavlja identifikator čvora koji šalje podatke, *TempID* - podatak koji ukazuje na značenje sledeće vrednosti, i zatim *Temp* - izmerena vrednost temperature. LoRa modul dodaje preambulu na početak svakog paketa. Vreme prenosa jednog ovakvog paketa je 1392 ms, a za njegovo slanje se troši 70,16 mJ energije. Promene temperature u toku vremenskog perioda merenja prikazane su na slici 74.



Slika 74: Rezultati merenja temperature bez primene protokola rutiranja.

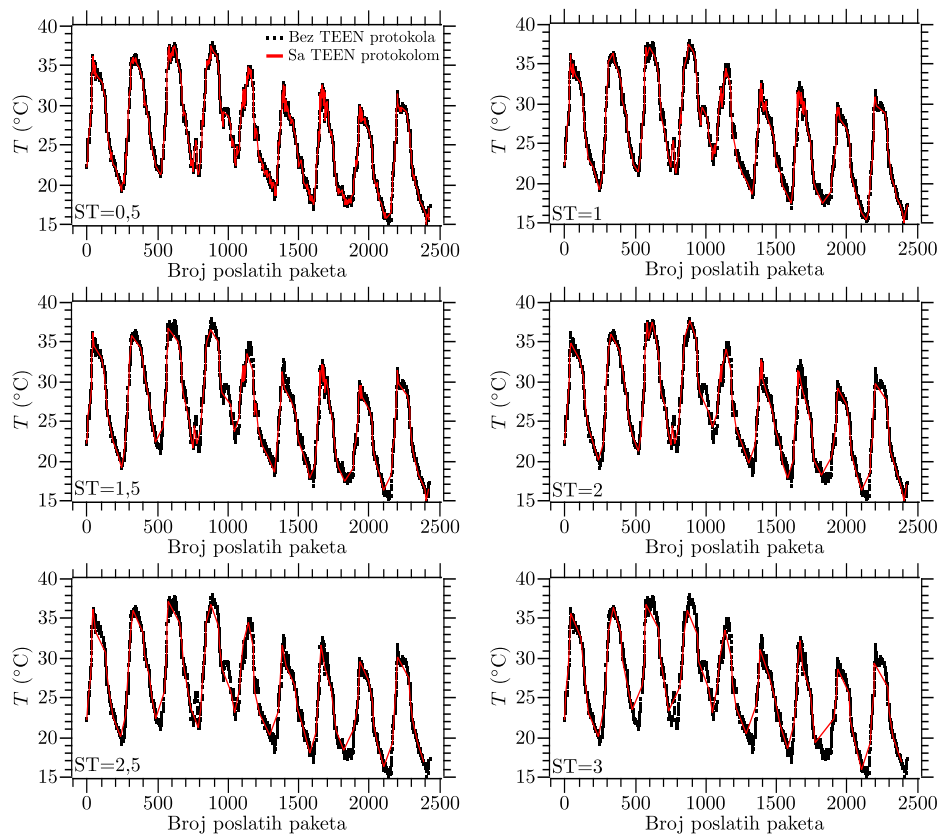
Koristeći rezultate merenja i TEEN protokol rutiranja izvršeno je izračunavanje broja poslatih paketa i uštede električne energije za različite ST vrednosti. Pri tome su ST vrednosti određene na dva načina. Prvi, kao razlika između izmerene i poslednje poslate vrednosti, i drugi kao brzina promene između dve poslednje izmerene vrednosti. Ako je prenos potreban, LoRa modul se uključuje i šalje podatke. Nakon toga, senzorski čvor prelazi u režim mirovanja (*sleep mode*) do sledećeg merenja. Kada prenos nije neophodan, senzorski čvor odmah nakon merenja ide u stanje mirovanja.

Određivanje ST vrednosti na osnovu razlike

Prvi metod za određivanje vrednosti ST zasniva se na razlici između izmerene vrednosti i poslednje poslate vrednosti. U tom slučaju se uslov pri kome se vrši prenos podataka može opisati kao:

$$\text{transmit packet} = \begin{cases} 1, & x_m - x_0 \geq ST, x_0 = x_m \\ 0, & x_m - x_0 < ST, x_0 = x_0 \end{cases} \quad (5.2)$$

Na osnovu vrednosti promenljive *transmit packet* se u softveru određuje da li je potrebno izvršiti slanje. Izmerena vrednost označena je x_m , a poslednje poslata vrednost x_0 . Jednostavnije rečeno, slanje paketa se vrši ako je razlika između izmerene i poslenje poslate vrednosti veća ili jednaka ST. Primenom ovog metoda ostvaruje se redukcija broja paketa koje senzorski čvor treba da pošalje u odnosu na broj paketa kada se podaci šalju nakon svakog merenja. Na slici 75 je prikazana promena temperature na osnovu vrednosti na strani prijemnika u slučaju da se šalje svaka izmerena vrednost i vrednosti koje se šalju pri implementiranom TEEN protokolu sa opisanim načinom za određivanje ST vrednosti.



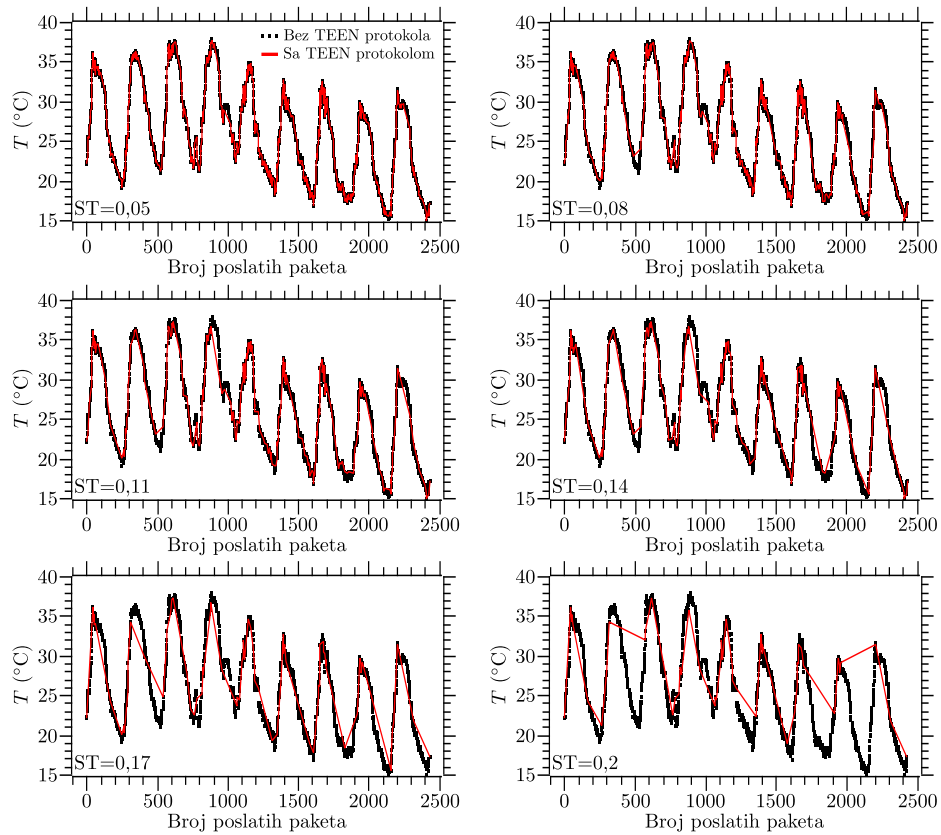
Slika 75: Vrednosti merenja temperature na strani prijemnika bez primene protokola rutiranja i sa primenom TEEN protokola (ST vrednost određena je na osnovu razlike između poslednje izmerene i poslednje poslate vrednosti).

Određivanje ST vrednosti na osnovu brzine promene

Drugi metod na osnovu koga se može odrediti vrednost ST zasniva se na brzini promene posmatrane vrednosti. Brzina promene definiše se kao količnik razlike dve poslednje izmerene vrednosti i vremenskog intervala između dva uzastopna merenja, što se može napisati kao:

$$transmit\ packet = \begin{cases} 1, & \frac{x_m - x_{m-1}}{\Delta t} \geq ST \\ 0, & \frac{x_m - x_{m-1}}{\Delta t} < ST \end{cases}. \quad (5.3)$$

U prikazanoj jednačini x_m označava poslednje izmerenu vrednost, x_{m-1} prethodno izmerenu vrednost, a Δt je vremenski interval između dva merenja. Slanje podataka se vrši ako je brzina promena veća ili jednaka definisanoj ST vrednosti. Na ovaj način se obezbeđuje da do prijemnika stignu vrednosti koje prikazuju intenzivne promene, kao i vrednosti kojima se mogu prikazati nagle promene manjeg intenziteta. Na slici 76 su prikazane vrednosti na strani prijemnika koje senzorski čvor šalje bez primene TEEN protokola i vrednosti poslate sa implementiranim TEEN protokolom zasnovanim na ST vrednosti koja je određena na osnovu brzine promene.

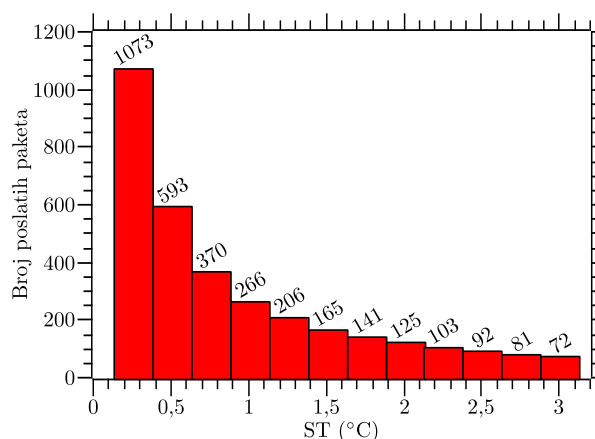


Slika 76: Vrednosti merenja temperature na strani prijemnika bez primene protokola rutiranja i sa primenom TEEN protokola (ST vrednost određena je na osnovu brzine promene merene vrednosti).

5.1.4.3 Ušteda energije pri implementaciji TEEN protokola

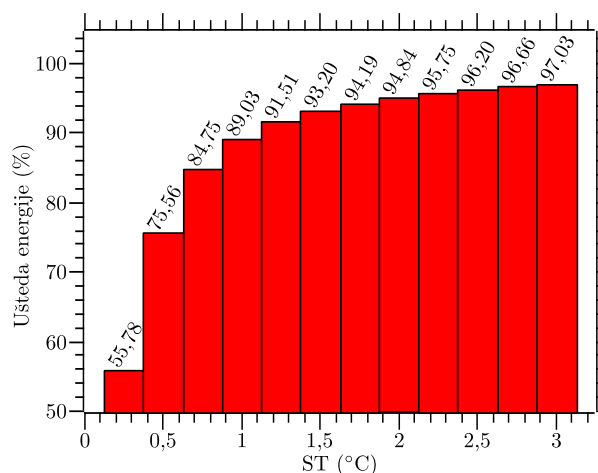
Sa prikazanih grafika se vidi da se sa povećanjem ST vrednosti, bez obzira da li se ona određuje na osnovu razlike ili brzine promene, povećava razlika između talasnih oblika koji prikazuju promenu temperature. Maksimalan broj vrednosti koji se tokom perioda merenja može dobiti na strani prijemnika je 2427, ukoliko se ne primenjuje TEEN protokol, tj. pošalju

sve izmerene vrednosti. Sa povećanjem ST vrednosti, broj vrednosti koje se šalju prijemu se smanjuje. Na slici 77 je prikazan broj poslanih paketa u zavisnosti od ST vrednost izračunate korišćenjem prvog opisanog metoda.



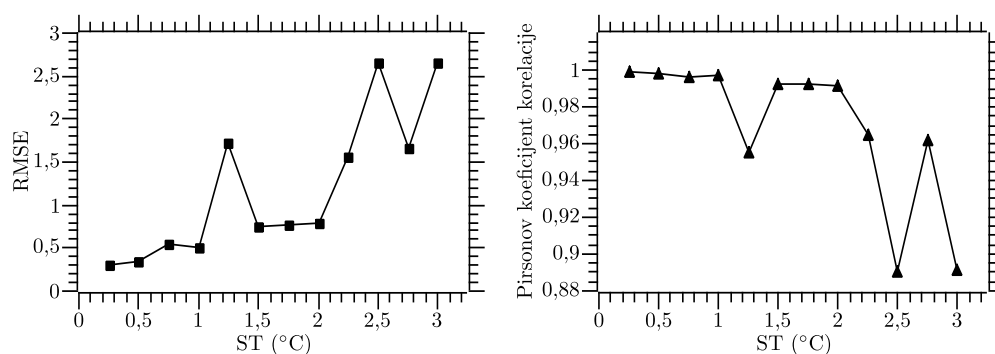
Slika 77: Broj poslanih paketa pri implementaciji TEEN protokola (ST vrednost određena na osnovu razlike između poslednje izmerene i poslednje poslate vrednosti).

Potrošnja energije pri slanju jednog paketa je kontantna pa se na osnovu broja poslanih paketa može se odrediti ušteda u potrošnji energije, za različite vrednosti ST (slika 78).



Slika 78: Ušteda energije pri implementaciji TEEN protokola (ST vrednost određena na osnovu razlike između poslednje izmerene i poslednje poslate vrednosti.)

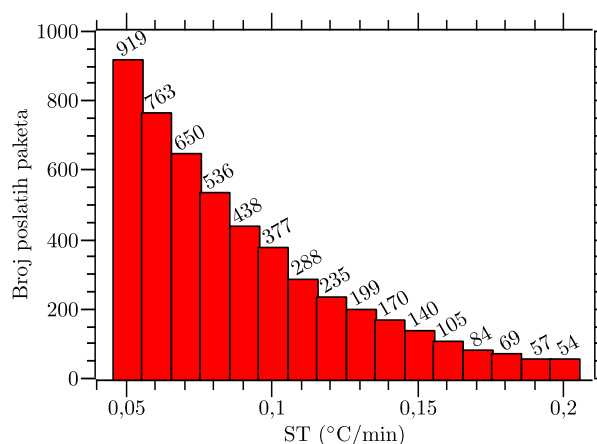
Veća vrednost ST doprinosi većem smanjenju potrošnje energije, što obezbeđuje duži životni vek senzorskog čvora. Međutim, povećanje ST vrednosti smanjuje tačnost na strani prijemnika zbog umanjenog broja paketa. Rekonstruisani podaci, dobijeni interpolacijom primljenih paketa do početnih 2427 vrednosti, poređeni su sa originalnim korišćenjem RMSE i Pirsonovog koeficijenta korelacije, a dobijeni rezultati prikazni su na slici 79.



Slika 79: RMSE i Pirsonov koeficijent korelacije između rekonstruisanih i originalnih podataka u zavisnosti od ST vrednosti određenoj na osnovu razlike između poslednje izmerene i poslednje poslate vrednosti.

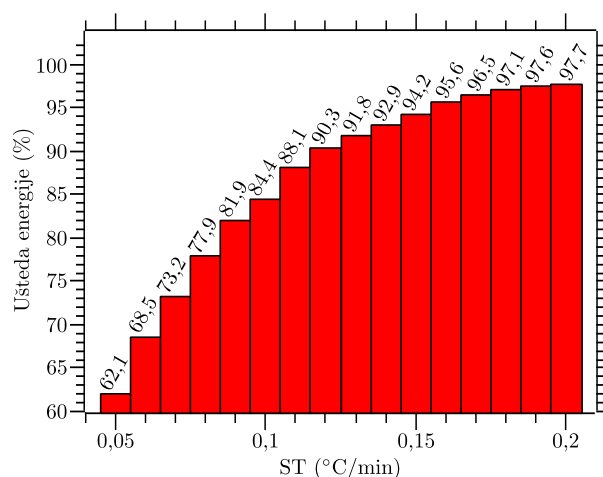
Za prikazani primer merenja temperature uzeto je da je prihvatljiva vrednost RMSE jednaka ili manja od jedan, a Pirsonov koeficijent korelacije jednak ili veći od 0,95. Kao što se može videti na slici, kada se ST vrednost određuje kao razlika između izmerene i poslednje poslate vrednosti, ne postoji pravilnost kojom se može opisati zavisnost RMSE i Pirsonovog koeficijenta korelacije od ST vrednosti. Zbog toga se mogu uzeti u razmatranje samo četiri najmanje vrednosti ST. Na posmatranom opsegu se najveća ušteda energije može postići kada je ST jednak jedan. U ovom slučaju, ušteda energije u senzorskom čvoru je oko 89%.

Kao što je ranije opisano, drugi metod za određivanje ST vrednosti zasniva se na izračunavanju količnika razlike dva uzastopna merenja i vremenskog intervala između njih. Broj primljenih paketa za različite ST vrednosti određene na ovaj način prikazan je na slici 80.



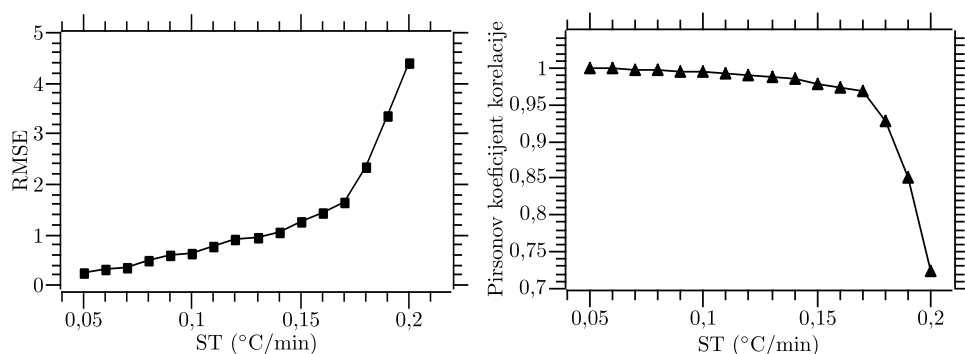
Slika 80: Broj poslatih paketa pri implementaciji TEEN protokola u zavisnosti od ST vrednosti određenoj na osnovu brzine promene merene vrednosti.

Sa povećanjem ST vrednosti, broj paketa koje je potrebno poslati se smanjuje, a samim tim i potrošnja ukupne energije neophodne za slanje. Na slici 81 je prikazana ušteda energije u zavisnosti od ST vrednosti.



Slika 81: Ušteda energije pri implementaciji TEEN protokola u zavisnosti od ST vrednosti na osnovu brzine promene merene vrednosti.

Kao i pri određivanju ST vrednosti prvim opisanim metodom, veća vrednost ST doprinosi manjem broju paketa za prenos i manjoj potrošnji energije. Vrednosti uštede energije su slične za oba metoda za posmatrani opseg ST vrednosti. Upoređivanje poslatih i izmerenih vrednosti za metod određivanja ST vrednosti zasnovan na brzini promene temperature urađeno je na isti način kao u prvom opisano slučaju. Na slici 82 prikazana je zavisnost RMSE i Pirsonovog koeficijenta korelacije od ST vrednosti.



Slika 82: RMSE i Pirsonov koeficijent korelacije između rekonstruisanih i originalnih podataka u zavisnosti od ST vrednosti određenoj na osnovu brzine promene merene vrednosti.

Sa prikazane slike se vidi da RMSE blago raste do ST vrednosti od $0,17^{\circ}/\text{min}$, dok je za veće ST vrednosti porast intenzivniji. Takođe, može se videti da je smanjenje Pirsonovog koeficijenta korelacije manje izraženo do $0,17^{\circ}/\text{min}$, nakon čega naglo opada. Korišćenjem istih graničnih vrednosti RMSE i Pirsonovog koeficijenta korelacije, kao u prvom slučaju, ušteda energije sa ST vrednostima određenim na osnovu brzine promene je oko 95 %. U ovom slučaju, za promenu vrednosti RSME i Pirsonovog koeficijenta korelacije u zavisnosti od ST vrednosti se može utvrditi određena zavisnost, tako da se u zavisnosti od primene, tj.

potrebne preciznosti merenja, može nedvosmisleno utvrditi koliko se električne energije može uštedeti implementacijom TEEN protokola. Takođe, ovaj način određivanja ST vrednosti se primenjuje da bi se obezbedila mogućnost detekcije naglih promena manjeg intenziteta.

Dobijeni rezultati pokazuju da određivanje ST vrednosti na osnovu brzine promene merenog parametra može obezbediti tačnije podatke na strani prijemnika sa manjim brojem poslatih paketa. Energija koju troši senzorski čvor da bi se utvrdilo da li je potrebno izvršiti slanje je zanemarljiva u poređenju sa energijom neophodnom za slanje.

5.2 Senzorski čvor za merenje temperature sa direktnom komunikacijom sa serverom

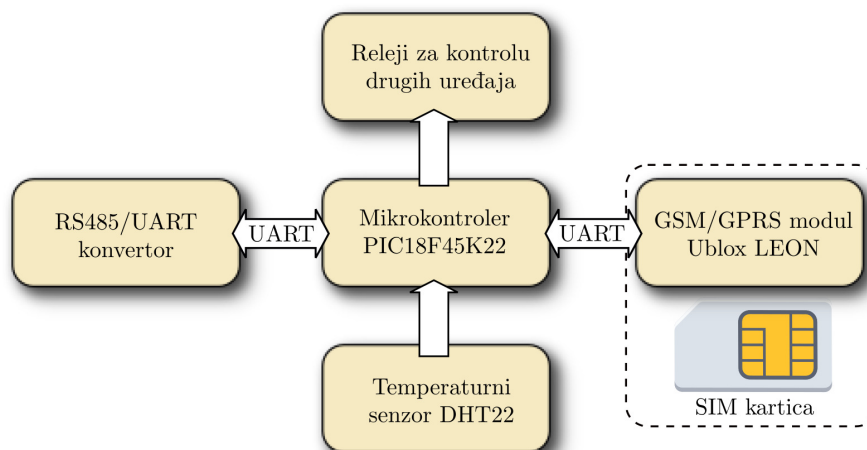
Pored prikazanog načina realizacije senzorske mreže, gde se sva komunikacija odvira preko bazne stanice, senzorski čvor može imati mogućnost direktne komunikacije sa serverom. To se ostvaruje korišćenjem WiFi ili GSM modula. Zbog kompleksnije strukture, potrošnja električne energije je povećana, pa se ovaj princip komunikacije uglavnom implementira u senzorskim čvorovima koji nemaju značajnih limita kada su u pitanju energetske resursi.

Jedna od potencijalnih primena ovakvih senzorskih čvorova je u industrijskim aplikacijama (IIoT). Različiti industrijski uređaji se mogu opremiti senzorskim čvorovima u cilju praćenja parametara rada, kao i razmene podataka sa drugim uređajima i međusobne kontrole. To omogućava brzu identifikaciju mogućih problema u realnom vremenu i unapređenje postojećih procesa. U nastavku ovog dela disertacije će biti prikazana arhitektura senzorskog čvora za merenje temperature i prikaz rezultata na serveru preko implementiranog MQTT protokola.

5.2.1 Arhitektura senzorskog čvora

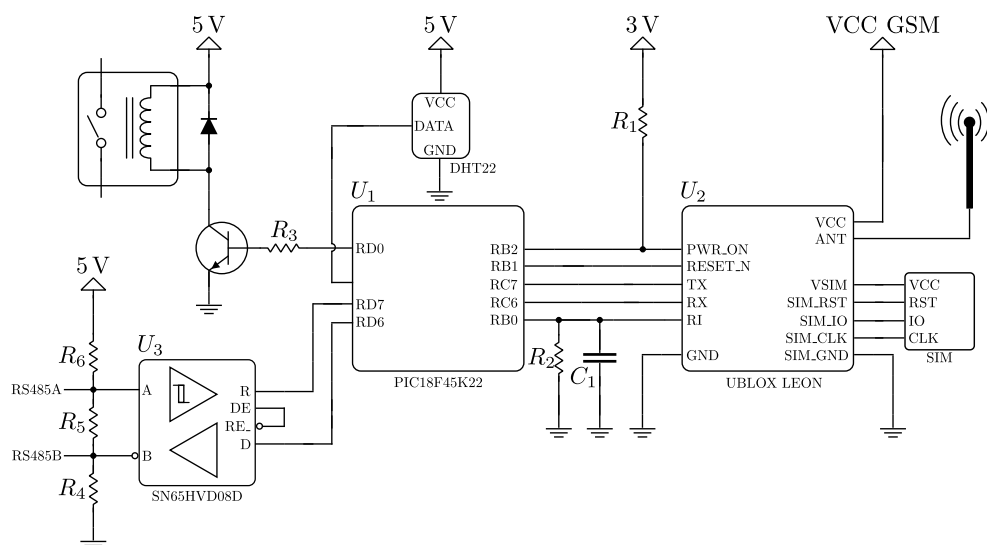
Projektovani senzorski čvor koji ima mogućnost direktne komunikacije sa serverom sastoji se od mikrokontrolera, temperaturnog senzora, GSM/GPRS modula, RS485 komunikacionog interfejsa i četiri releja. Njegova pojednostavljena blok šema prikazana je na slici 83.

Digitalni temperaturni senzor DHT22 [129] odlikuje se visokom preciznošću ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$) i malom potrošnjom energije. Može se primeniti za merenja u širokom temperaturnom opsegu (od -40 do 80°C), što ga čini pogodnim za širok spektar aplikacija, uključujući i razne industrijske procese. U zavisnosti od konkretne primene, na senzorski čvor se preko RS485 konvertora mogu povezati i drugi senzori. Releji se koriste za povezivanje drugih uređaja čime se postiže mogućnost njihove kontrole. GSM/GPRS modul (Ublok LEON



Slika 83: Blok šema senzorskog čvora za merenje temperature koji ima mogućnost komunikacije sa serverom.

[130]) se koristi za uspostavljanje komunikacije između senzorskog čvora i korisnika, ili senzorskog čvora i servera. Komunikacija sa korisnikom vrši se preko SMS poruka, a TCP/IP protokol senzorskom čvoru omogućava razmenu podataka sa serverom. Direktna komunikacija sa serverom pruža mogućnost da se ovaj senzorski čvor može iskoristiti kao bazna stanica. Upravljanje GSM/GPRS modulom vrši mikrokontroler preko AT komandi koje mu se prosleđuju preko UART protokola. Pored toga mikrokontroler prihvata podatke sa temperaturnog senzora i upravlja radom releja. Na slici 84 prikazana je pojednostavljena električna šema ovog senzorskog čvora.



Slika 84: Pojednostavljena električna šema senzorskog čvora za merenje temperature koji ima mogućnost komunikacije sa serverom.

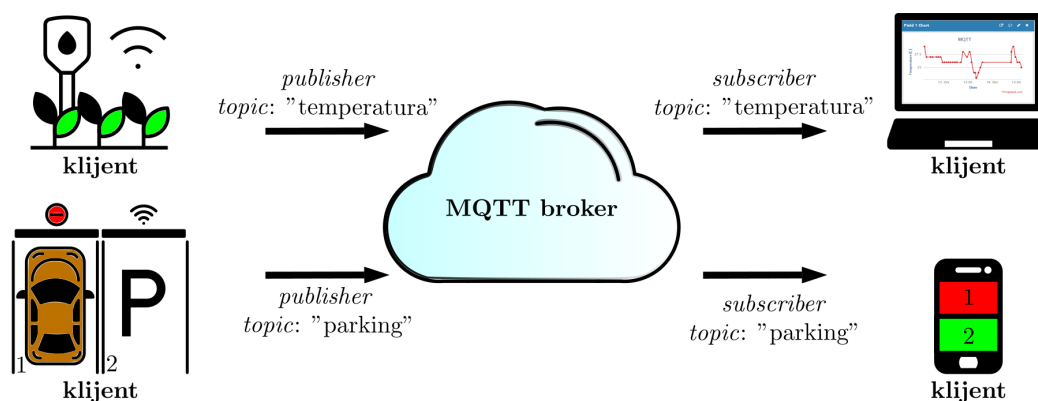
Softver mikrokontrolera je zasnovan na operativnom sistemu u realnom vremenu (*Real Time Operating System* - RTOS). Ova j princip realizacije softvera uključuje različite tajmere pomoću kojih se definišu različiti intervali izvršavanja određenih operacija. Neke od njih su provera dostupnosti servera, provera zahteva korisnika, merenje temperature, kontrola uređaja koji povezani preko releja, i dr.

5.2.2 MQTT protokol

MQTT je komunikacioni protokol otvorenog koda koji su kreirali Andi Stanford-Clark i Arlen Nipper [131]. Najčešće se pokreće preko TCP/IP steka, ali postoje i drugi načini implementacije (npr. *Bluetooth*). Termin MQTT predstavlja akronim od *Message Queuing Telemetry Transport*.

Zbog efikasnog iskorišćenja propusnog opsega i niske potrošnje energije, MQTT je adekvatan protokol za prenos podataka u sistemima male snage kao i u IoT-u i IIoT sistemima, jer se može koristiti na različitim platformama. Neki od najčešćih primera upotrebe MQTT protokola u IoT-u i IIoT-u su prikupljanje podataka sa senzorskih čvorova i njihovo prosleđivanje serveru, kao i prijem podataka i instrukcija sa servera sa ciljem daljinskog konfigurisanja IoT i IIoT uređaja.

U ovom protokolu postoje dva entiteta, kao što je prikazano na slici 85. Jedan je broker (server), a drugi su klijenti. Broker je centralni softverski entitet i radi kao posrednik između klijenata, što su zapravo pametni uređaji ili senzorski čvorovi koji mogu da pošalju podatke na server ili ih sa njega pročitaju.



Slika 85: Arhitektura i primer entiteta u MQTT protokolu.

Neke od uloga brokera su:

- Rutiranje poruka: MQTT broker prima poruke i usmerava ih odgovarajućim klijentima na osnovu odabrane teme. To osigurava da se poruke isporučuju efikasno i tačno, bez potrebe za direktnom vezom između klijenata;

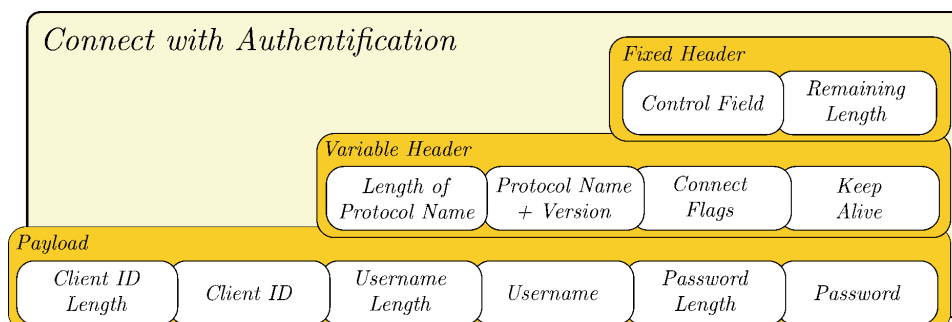
- Skalabilnost: MQTT broker može istovremeno da obrađuje veliki broj veza, što je od suštinskog značaja za IoT sisteme koji mogu sadržati hiljade povezanih uređaja;
- Bezbednost: Korišćenjem bezbednosnih mera kao što su autentifikacija i enkripcija, MQTT broker može da obezbedi sigurnost podataka koji se prenose između IoT uređaja;
- Integracija: Integracija sa drugim komunikacionim protokolima i platformama u oblaku obezbeđuje kompletan sistem za razmenu podataka;
- Upravljanje sesijama: Ova funkcija osigurava da se poruke ne izgube kada klijenti prekinu vezu i kasnije se ponovo povežu sa brokerom.

Prema ulozi koji imaju klijenti se mogu podeliti u dve grupe. U prvu grupu spadaju oni koji šalju podatke na server (*publisher*), a u drugu oni koji čitaju podatke sa servera (*subscriber*). Podaci su na samom serveru organizovani na nivou pojedinačnih tema (*topic*). Klijenti koji su prijavljeni na odredjenu temu kao *publisher* mogu da šalju podatke, dok klijenti prijavljeni kao *subscriber* mogu da procitaju objavljene podatke.

Arhitektura MQTT brokera može biti centralizovana ili distribuirana. U centralizovanoj arhitekturi, jedan broker upravlja celokupnom komunikacijom između klijenata. U distribuiranoj arhitekturi, više brokera radi zajedno kako bi obezbedilo skalabilnu infrastrukturu za razmenu poruka. Svaki broker u distribuiranoj arhitekturi može da koordiniše drugim brokerima kako bi upravljao rutiranjem poruka, obezbeđujući da se poruke isporuče željenim primaocima [132].

5.2.2.1 Organizacija podataka u MQTT protokolu

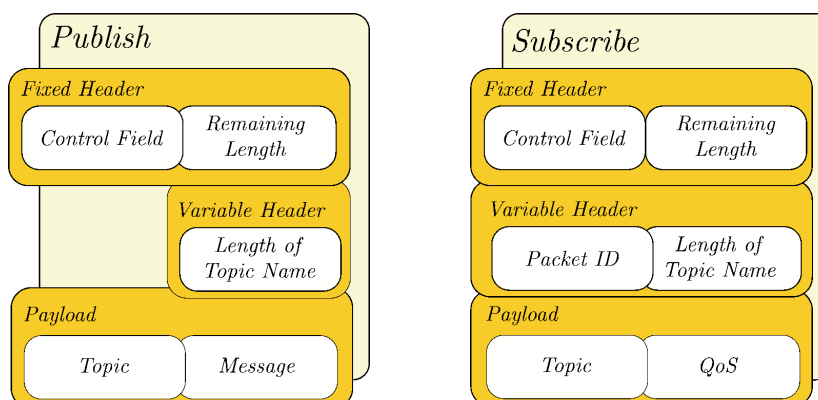
I poslati i primljeni podaci u MQTT protokolu su organizovani u okviru paketa. Standardni MQTT paket ima tri centralna polja, kao što se može videti na slici 86. Fiksno zaglavlje (*Fixed Header*) i sadržaj poruke (*Payload*) su obavezna polja paketa, dok polje promenljivo zaglavlje (*Variable Header*) može biti u sastavu paketa, ali nije neophodno.



Slika 86: Struktura MQTT paketa kojim uređaj uspostavlja konekciju sa brokerom.

Fiksno zaglavlje sadrži dva potpolja, kontrolno polje (*Control Field*) i preostala dužina (*Remaining Length*). Veličina prvog potpolja je jedan bajt, a njegov sadržaj predstavlja tip paketa (povezivanje (*Connect*), objavljivanje (*Publish*), itd.). U drugom potpolju upisuje se veličina preostala dužina paketa izražena u bajtovima, uključujući ovo potpolje (jedan bajt). Promenljivo zaglavlje sadrži potpolja koja pružaju informacije o protokolu. Dužina imena protokola (*Length of Protocol Name*) je veličine jednog bajta o dužini naziva i verziji protokola, nakon čega sledi naziv i podatak o verziji protokola (*Protocol Name + Version*). Sledeće potpolje, veličine jednog bajta (*Connect Flags*) prikazuje status MQTT veze, a naredna dva bajta (*Keep-Alive*) određuje trajanje veze između klijenta i brokera. Sadržaj poruke zavisi od tipa paketa, a u prikazanom primeru koji predstavlja paket kojim se vrši uspostavljanje veze između klijenta i brokera, ovo polje sadrži informacije o klijentu, a to su: veličina identifikatora klijenta (*Client ID Length*), identifikator klijenta (*Client ID*), veličina korisničkog imena (*Username Length*), korisničko ime (*Username*), veličina lozinke (*Password Length*) i lozinka (*Password*).

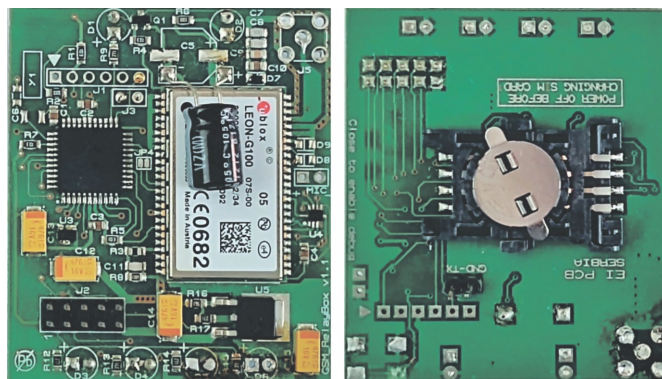
Korisnik se povezuje sa brokerom sa ciljem slanja ili čitanja podataka putem paketa za objavljivanje (*Publish*) ili kasnijeg čitanja dostupnih podataka na određenu temu (*Subscribe*). Fiksna zaglavlja u tim paketima su ista, što je prikazano na slici 87. Promenljivo zaglavlje u paketu za objavljivanje sadrži jedno potpolje (*Length of Topic Name*) koje pruža informaciju o dužini naziva teme izraženu u bajtovima. Isto polje paketa za preuzimanje podataka, pored ovog potpolja sadrži i potpolje u koje se upisuje identifikator paketa (*Packed ID*). Klijent koji objavljuje podatke, o okviru polja sadržaj poruke šalje naziv teme (*Topic*) i poruku (*Message*), dok klijent koji treba da preuzme podatke, u okviru ovog polja, šalje naziv teme (*Topic*) i QoS (*Quality of Service*). Dodatne informacije o svim vrstama paketa mogu se naći u tehničkoj dokumentaciji samog protokola [133].



Slika 87: Strukture MQTT paketa kojim se podaci šalju brokeru (*Publish*) i preuzimaju sa brokera (*Subscribe*).

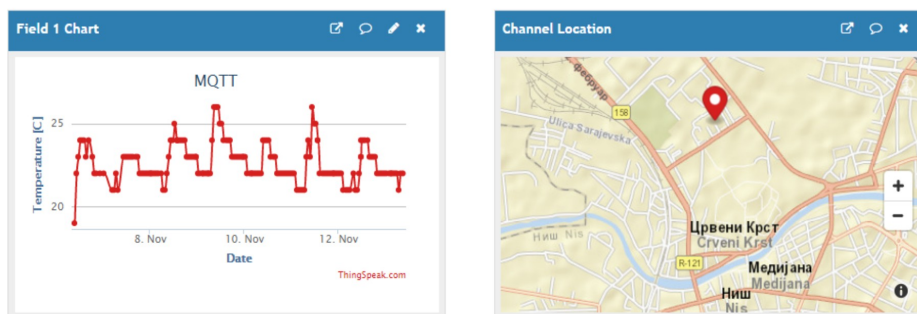
5.2.2.2 Implementacija MQTT protokola i rezultati merenja

Realizovan senzorski čvor, na kome je implementiran MQTT protokol, prikazan je na slici 88.



Slika 88: Senzorski čvor za merenje temperature i slanje podataka na server korišćenjem MQTT protokola.

Senzorski čvor može da radi u obe konfiguracije, da postavlja podatke na server i da ih preizima sa njega. U prvoj konfiguraciji senzorski čvor meri temperaturu i objavljuje dobijene podatke na tu temu. Za naziv teme, u ovom primeru, izabran je MQTT. Za prikaz rezultata merenja temperature korišćenjem opisanog senzorskog čvora izabran je MQTT broker ThingSpeak [134]. Pored ovog brokera postoje i drugi javno dostupni brokeri otvorenog koda, kao što su EMQX, Mosquito, NanoMQ, HiveMQ, i dr.). Prikaz podataka koji su poslali brokeru može se izvršiti na različite načine, a u opisanom primeru izabran je grafički prikaz rezultata, kao što je prikazano na slici 89. Period merenja bio je sedam dana, na lokaciji Aleksandra Medvedeva 4, Niš.



Slika 89: Rezultati merenja temperature realizovanim senzorskim čvorom i njegova lokacija tokom merenja.

U drugoj konfiguraciji podaci o određenoj temi se preuzimaju sa ThingSpeak-a. Nakon prijema, podaci se klasifikuju i na osnovu njih se pokreću odgovarajuće akcije. Ovi podaci mogu biti izmerene vrednosti drugih parametara ili uputstva za konfiguraciju samog senzorskog čvora. Važno je napomenuti da senzorski čor može preuzimati podatke na samo jednu odabranu temu, ali ima mogućnost objavljivanja podataka o različitim temama.

Glava 6

Primena superkondenzatora u okviru napajanja autonomnih senzora

Jedna od najbitnijih karakteristika autonomnih sistema, odnosno osobina u kojoj se ogleda njihova autonomija je samostalno napajanje. U prethodnim poglavljima predstavljani su neki od primera autonomnih senzora čije su funkcije detekcija vozila i monitoring parametara životne sredine. Bez obzira na funkcionalnost koju obavljaju i lokaciju na kojoj su instalirani za sve autonomne senzore postoji zajednički problem. To je obezbeđivanje pouzdanog i dugotrajnog napajanja. Iako je za njihov rad potrebno relativno malo energije (red veličine nekoliko desetina mW) princip realizacije njihovog napajanja sadrži određene specifične zahteve. U tu svrhu razvijene su različite metode i specijalizovana električna kola.

Zbog rasprostranjenosti i lokacija senzorskih čvorova i IoT uređaja, napajanja zasnovana na korišćenju komercijalnih mrežnih struktura su postepeno zamenjena baterijama i sistemima kojima se energija okoline konvertuje u električnu (*Energy Harvesting* - EH) [135]. Jedan od najčešće korišćenih tipova ovih sistema zasniva se na konverziji sunčeve energije u električnu (*Solar Energy Harvesting*). Najsloženiji deo EH sistema predstavlja mehanizam skladištenja energije. Dve dostupne mogućnosti za skladištenje energije su baterije i superkondenzatori [136]. Superkondenzatori su pasivne elektronske komponente koje se koriste za skladištenje energije. Polarizovani su i slični elektrolitskim kondenzatorima, međutim imaju složeniju unutrašnju strukturu zbog koje je njihova kapacitivnost znatno veća i može biti i do nekoliko Farada.

Baterije su dobro poznata i tehnološki ispitana opcija. Imaju veću gustinu energije (veći kapacitet za datu zapreminu) od superkondenzatora. Četiri vrste punjivih baterija, koje se obično koriste u autonomnim senzorima, su: nikel-kadmijumske (NiCd), nikel-metal-hidrid (NiMH), litijum-jonske (Li-Ion) i baterije na bazi olovne kiseline (SLA). NiCd baterije imaju relativno nisku gustinu energije, a usled većeg broja ciklusa nepotpunog pražnjenja, kapacitet SLA baterija se smanjuje, tako da ove dve vrste baterija nisu najbolje rešenje. Izbor između NiMH i Li-Ion baterije uključuje nekoliko kompromisa. Li-Ion baterije su mnogo efikasnije od

NiMH-nih, imaju duži vek trajanja i nižu stopu samopražnjenja, ali i višu cenu. Generalno, izbor baterije zavisi od potrošnje energije senzorskog čvora koji se projektuje, struje punjenja, kao i kompromisa između troškova i efikasnosti koju treba postići.

Superkondenzatori imaju veću gustinu snage od baterija i mogu da obezbede kratkotrajne struje visokog intenziteta. Odlikuju se većim nivoom robusnosti za različite nivoe pražnjenja u odnosu na baterije, ali je njihov kapacitet osetljiviji na temperaturne promene. Superkondenzatori se mogu koristiti za nekoliko hiljada ciklusa punjenja-pražnjenja u poređenju sa nekoliko stotina ciklusa karakterističnih za Li-Ion baterije. Životni vek baterije se značajno smanjuje kada je izložena niskim temperaturama, dok superkondenzatore odlikuje pouzdan rad u širokom temperaturnom opsegu. Međutim, glavni nedostaci superkondenzatora su veće struje curenja i visoka cena.

Shodno tome, izbor komponente za skladištenje energije zavisi od niza faktora uključujući zahteve za maksimalnom snagom, životni vek, kapacitet skladištenja energije i cenu. Takođe, moguće je implementirati višestepeni mehanizam za skladištenje energije koristeći bateriju i superkondenzator kako bi bilo moguće iskoristiti prednosti obe komponente, ali to stvara dodatne troškove zbog složenijeg električnog kola za upravljanje napajanjem.

U nastavku ovog dela disertacije predstavljeni su različiti načini punjenja superkondenzatora korišćenjem solarnih ćelija male snage. Izmereno je vreme punjenja superkondenzatora za različito povezivanje solarnih ćelija pri različitim nivoima intenziteta osvetljenosti. Takođe, analizirane su prednosti i nedostaci upotrebe naponskih regulatora kojima se menja vrednost napona punjenja superkondenzatora.

6.1 Napajanje autonomnih senzora korišćenjem solarnih ćelija

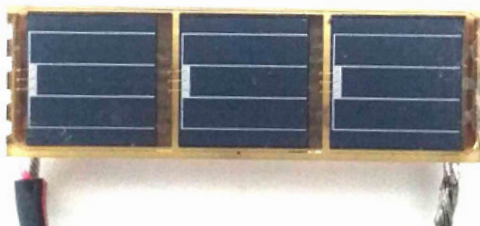
Životni vek autonomnog senzora (period tokom kojeg može da radi potpuno autonomno) određen je potrošnjom samog autonomnog senzora i kapacitetom izvora energije. To ukazuje da se isti može se produžiti na dva načina. Prvi je smanjenje potrošnje energije, a drugi povećanje kapaciteta izvora energije. Smanjenje potrošnje energije vrši se na različite načine koji obuhvataju brojna hardverska i softverska rešenja, od kojih je jedno predstavljeno u prethodnom poglavlju disertacije. Kako je reč o povećanju kapaciteta izvora energije, veći kapacitet istovremeno zahteva i povećanje dimenzija baterije. Međutim umesto povećanja kapaciteta, isti rezultat se može postići konverzijom energije iz okoline u električnu i njenim korišćenjem za punjenje baterije ili superkondenzatora.

Prikupljanje solarne energije predstavlja jednu od najčešćih metoda za dobijanje dodatne električne energije. Razlozi za to su sveprisutnost solarne energije, kao i razvoj tehnologija

proizvodnje solarnih ćelija kojima se vrši konverzija ovog tipa energije u električnu. Za implementaciju u okviru autonomnih senzora obično se koriste solarne ćelije malih dimenzija, koje imaju malu izlaznu snagu (reda veličine mW). Snaga koje se dobija na ovaj način najviše zavisi od intenziteta osvetljenosti, ali i od drugih fizičkih parametara, kao što je temperatura. S obzirom da je potrošnja energije autonomnih senzora istog reda veličine kao i dostupna energija, obično je za napajanje jednog autonomnog senzora dovoljno koristiti jednu solarnu ćeliju. Međutim, ukoliko je to neophodno, solarne ćelije se mogu povezivati redno i paralelno kako bi se dobio veći izlazni napon, odnosno veća izlazna struja kojom se vrši punjenje superkondenzatora. U zavisnosti od načina povezivanja potrebno je upotrebiti električna kola kojima se napon i struja solarne ćelije prilagođavaju na adekvatne vrednosti.

S obzirom da napon i struja zavise od načina povezivanja solarnih ćelija, cilj eksperimenta opisanog u nastavku je da se odredi na koji način će se superkondenzator brže napuniti. Preciznije rečeno, za koje vreme će napon superkondenzatora dostići vrednost 3,3 V, jer se ne može sa sigurnošću odrediti kada je on u potpunosti napunjen, tj. kada je u njemu akumulirana maksimalna količina naelektrisanja. Ova vrednost napona izabrana je jer predstavlja napon napajanja mnogih mikrokontrolera, senzora i radio modula, što su glavne komponente unutar autonomnog senzora. Kapacitivnost superkondenzatora čije se punjenja posmatra je 470 mF.

Za realizaciju eksperimenta upotrebljene su dve identične solarne ćelije IXYS 17-04x3, prikazane na slici 90. Napon otvorenog kola ove solarne ćelije je $V_{OC} = 1,89 \text{ V}$, a struja kratkog spoja $I_{SC} = 42 \text{ mA}$. Treba naglasiti da su ove vrednosti dobijene pri standardnim uslovima za testiranje solarnih ćelija (*Standard Test Condition*), tj. pri upadnoj snazi solarnog zračenja od 1000 W/m^2 i temperaturi od 25°C , tako da se u realnim uslovima mogu značajno razlikovati.

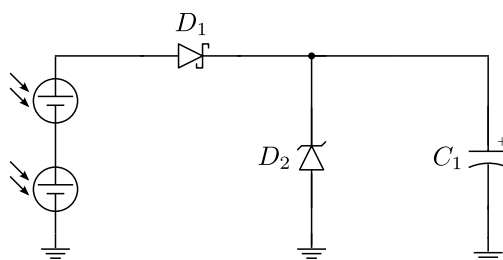


Slika 90: Izgled solarne ćelije IXYS 17-04x3.

Ove solarne ćelije su napravljene od monokristalnog silicijuma. Njihova efikasnost je oko 17 %, i mogu da rade u uslovima slabog osvetljenja. Zahvaljujući ovoj karakteristici i malim dimenzijama pogodne su za realizaciju napajanja autonomnih senzora.

6.2 Električna kola za punjenje superkondenzatora iz solarnih ćelija

Kada je potrebno koristiti više od jedne solarne ćelije, prvi način na koji se to može uraditi je njihovim rednim povezivanjem. Time se postiže veći izlazni napon, dok jačina struje koja se njima generiše ostaje nepromenjena. Rednim povezivanjem dve identične IXYS 17-04x3 solarne ćelije dobija se izlazni napon od oko 3,5-3,6 V. S obzirom da je napon punjenja superkondenzatora 3,3V, on se pri ovako povezanim solarnim ćelijama može puniti bez upotrebe dodatnih regulatora napona, kao što je prikazano na slici 91.

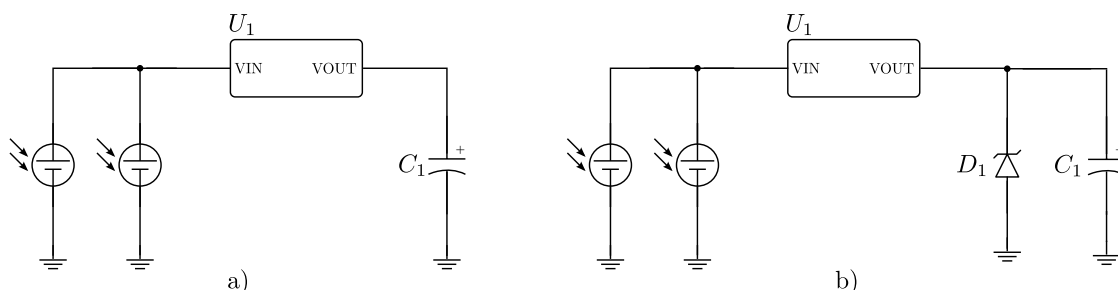


Slika 91: Električno kolo za punjenje seprkondenzatora iz redno povezanih solarnih ćelija.

U uslovima slabog osvetljenja ili u mraku, izlazni napon solarnih ćelija se smanjuje. Ukoliko je napon koji generišu solarne ćelije manji od vrednosti napona superkondenzatora onda dolazi da proticanja struje u suprotnom smeru od željenog. Solarne ćelije se tada ponašaju kao potrošač, a superkondenzator se prazni. Kako bi se to izbeglo neophodno je između solarnih ćelija i superkondenzatora povezati diodu (D_1 na slici), tako da pri punjenju superkondenzatora ona bude polarisana direktno. Time se sprečava praznjenje superkondenzatora, ali se istovremeno smanjuje napon koji se tokom punjenja dovodi do njega. Kako bi smanjenje napona bilo što je moguće manje upotrebljava se Šotki (*Schottky*) dioda. Sa druge strane, pri većim energijama upadnog zračenja dolazi do porasta napona na izlazu solarnih ćelija, tj. napona kojim se superkondenzator puni. Kako bi se osiguralo na vrednost napona na njemu bude konstantno 3,3 V potrebno je paralelno sa njim povezati Zener diodu (D_2 na slici). Time se reguliše vrednost napona, ali i umanjuje struja punjenja, jer deo struje protiče kroz samu diodu. Zener dioda je odabrana tako da je maksimalna struja koju ona može da provede u inverznom režimu veća od struje kratkog spoja solarne ćelije kako ne bi došlo do njenog oštećenja.

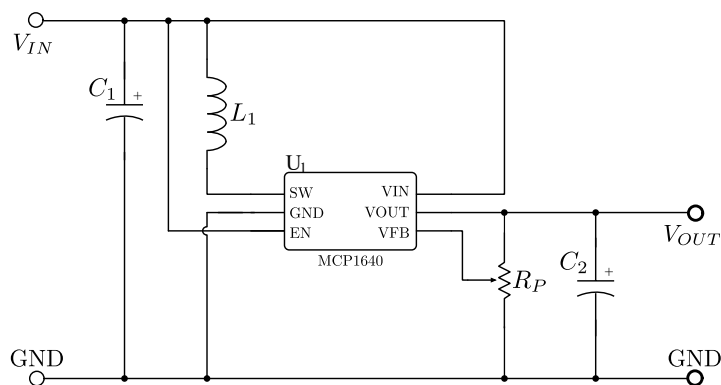
Drugi mogući način za povezivanje solarnih ćelija je paralelna veza. U ovoj konfiguraciji solarne ćelije generišu struju većeg intenziteta, tako da bi vreme punjenja superkondenzatora trebalo da bude kraće nego pri rednom povezivanju. Međutim, napon na izlazu ovako povezanih ćelija je 1,8 V (napon jedne solarne ćelije) što nije dovoljno za punjenje

superkondenzatora. Zbog toga je neophodno koristiti dodatno električno kolo naponskog regulatora kojim se vrednost napona povećava do potrebnog nivoa (*voltage booster*). Na slici 92 prikazan je princip povezivanja superkondenzatora u zavisnosti od vrednosti napona na izlazu naponskog regulatora.



Slika 92: Električna kola za punjenje seprkondenzatora iz paralelno povezanih solarnih ćelija.

U slučaju da je vrednost napona na izlazu regulatora 3,3 V nije potrebno koristiti dodatne komponente između njega i superkondenzatora (slika 92a). Pri većim vrednostima napona neophodno je dodati Zener diodu (slika 92b), kao što je to urađeno u kolu pri redno povezanim solarnim ćelijama. U ovom slučaju Zener dioda treba da bude takva da može da provodi struju koja je veća od maksimalne struje koju obezbeđuje naponski regulator. Za realizaciju ekperimenta koji se opisuje, pri paralelno povezanim solarnim ćelijama, iskorišćen je DC-DC naponski regulator MCP1640 [137], čija je električna šema prikazana na slici 93.



Slika 93: Električna šema kola naponskog regulatora MCP1640.

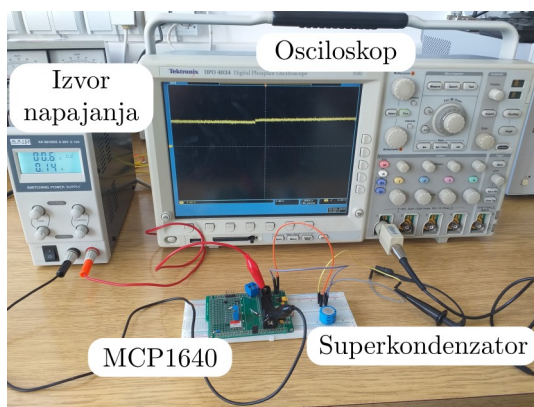
Ovo kolo, pored regulacije tj. mogućnosti da se njime dobije veći izlazni napon, se može koristiti za punjenje baterija i superkondenzatora. Radi pri ulaznom naponu u opsegu od 0,35 V do 5,5 V, pri čemu je potrebno 0,65 V kako bi se uspostavio njegov rad. Vrednost izlaznog napona podešava se odabirom vrednosti dva otpornika, a može biti u opsegu od 2 V do 5 V. Vrednost izlaznog napona, tj. napona koji se dovodi na superkondenzator, može se izračunati na osnovu jednačine:

$$V_{OUT} = V_{FB} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right), \quad (6.1)$$

pri čemu je V_{FB} fiksni referentni napon od 1,21 V, R_1 otpornost između VFB kontakta i mase, a R_2 otpornost između VOUT (kontakt na kome se dobija izlazni napon) i kontakta VFB. Pri praktičnoj realizaciji se umesto ova dva otpornika može upotrebiti potencijometar (R_P na slici). Time se dobija mogućnost podešavanja proizvoljne vrednosti napona kojim se vrši punjenje superkondenzatora [138].

6.3 Izmerene vrednosti vremena punjenja superkondenzatora

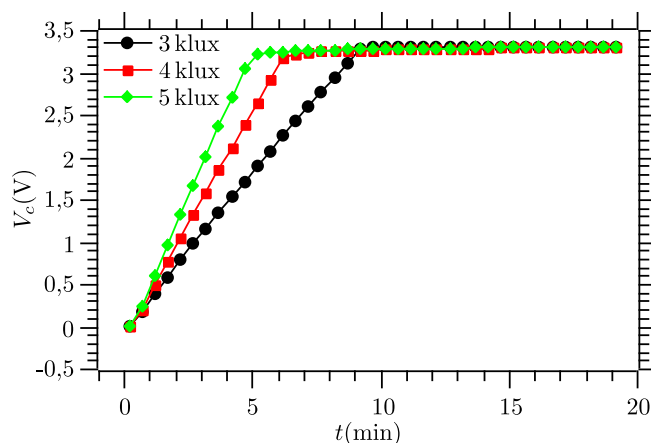
Kako bi se postigli nepromenljivi uslovi pri realizaciji eksperimenata, solarna ćelija je zamenjena izvorom napajanja. Izlazne vrednosti napona napajanja podešene su tako da se njima simuliraju naponi koji se dobijaju rednom i paralelnom vezom solarnih ćelija pri osvetljenostima od 3, 4 i 5 klux, što predstavlja nivoe osvetljenosti pri direktnoj izloženosti suncu tokom oblačnog dana. Izlazna struja izvora napajanja je limitirana tako da ne prelazi vrednosti koje mogu da se dobiju solarnim ćelijama pri njihovom rednom i paralelnom povezivanju. Na slici 94 je prikazana eksperimentalna postavka korišćenja za merenje vremena punjenja superkondenzatora.



Slika 94: Eksperimentalna postavka za merenje vremena punjenja superkondenzatora.

Rezultati punjenja superkondenzatora, naponom koji je ekvivalentan redno povezanim solarnim ćelijama, dobijeni korišćenjem električnog kola sa slike 91, prikazani su na slici 95.

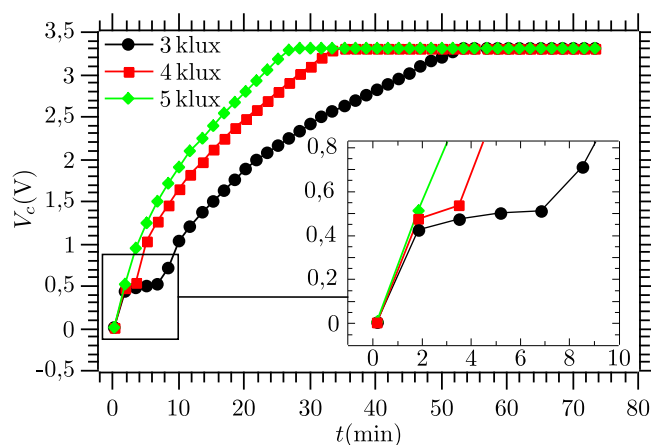
Potrebno je nekoliko minuta da se superkondenzator napuni do 3,3 V, a krive punjenja imaju različit nagib pri različitim nivoima intenziteta osvetljenosti. Pri osvetljenosti od 3 klux potrebno je oko 8 min da vrednost napona superkondenzatora dostigne 3,3 V. Sa



Slika 95: Vreme punjenja superkondenzatora iz redno povezanih solarnih ćelija.

porastom intenziteta osvetljenosti vreme potrebno da napon superkondenzatora dostigne navedenu vrednost se smanjuje, pa je pri osvetljenosti od 4 klux i 5 klux potrebno oko 6 min, odnosno 5 min, respektivno. Dakle, sa porastom intenziteta osvetljenosti vreme punjenja se smanjuje, što se i očekivalo s obzirom da struja i napon na izlazu solarne ćelije rastu pri povećanju intenziteta osvetljenosti.

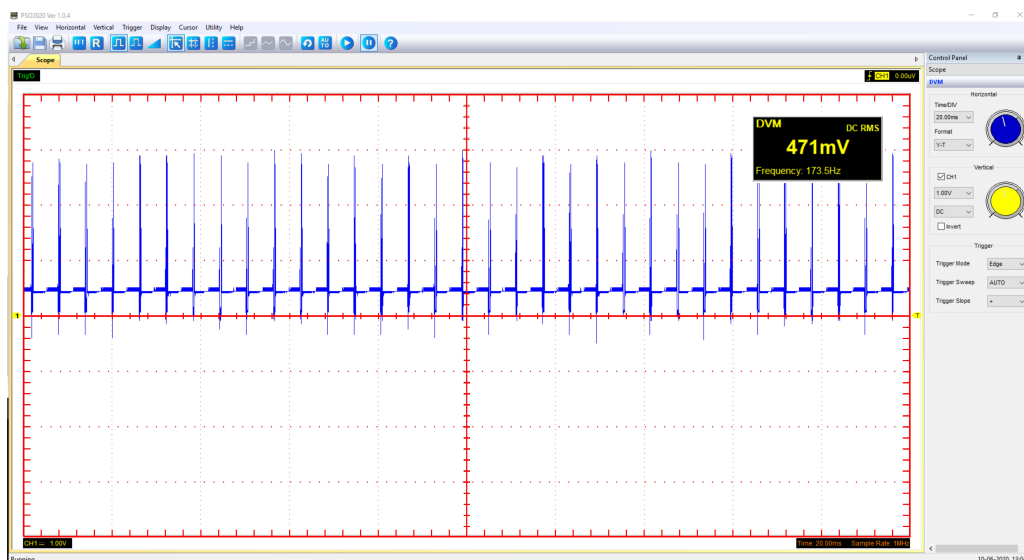
Merenje napona punjenja superkondenzatora ulaznim naponom koji oponaša paralelno povezane solarne ćelije, izvršeno je korišćenjem električnih kola prikazanih na slici 92. U prvom slučaju vrednost napona na izlazu naponskog regulatora je 3,3 V, a rezultati merenja prikazani su na slici 96.



Slika 96: Vreme punjenja superkondenzatora iz paralelno povezanih solarnih ćelija pri izlaznom naponu regulatora od 3,3 V.

Iako je pri paralelnoj vezi solarnih ćelija struja koju one generišu veća (struja napajanja je limitirana na veću vrednost), vreme punjenja je, kao što se može videti na slici 96, duže nego u slučaju njihovog rednog povezivanja. Potrebno vreme da napon na superkondenzatoru

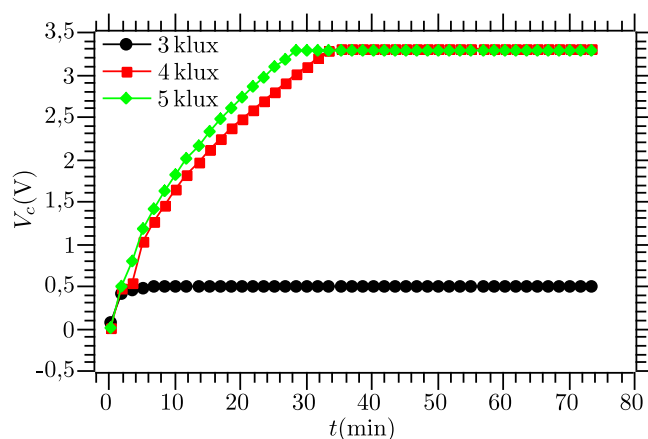
u ovom slučaju dostigne 3,3 V je oko 50, 35 i 25 min pri osvetljenostima od 3, 4 i 5 klux, respektivno. Naponski regulator, koji je u ovom slučaju neophodan da bi se na superkondenzatoru dobila potrebna vrednost napona, deo ulazne snage troši tokom svog rada. To je razlog zašto je vreme punjenja u ovom slučaju duže nego prilikom punjenja naponom koji je ekvivalentan rednoj vezi solarnih ćelija. Trenutak kada se regulator aktivira prikazan je na uvećanom delu slike 96. Kao što se može videti, potrebno je neko vreme da regulator akumulira dovoljno energije kako bi generisao napon od 3,3 V na svom izlazu. Ovo vreme je duže pri nižim nivoima osvetlosti. Na slici 97 je prikazan napon na SV kontaktu regulatora kada je u aktivnom stanju. Kratkotrajni impulsi potvrđuju da postoje oscilacije u kolu kojima se vrši kontinualno presipanje aukumulirane energije na izlaz kola.



Slika 97: Napon na SV kontaktu regulatora MCP1640 pri aktivnom režimu rada.

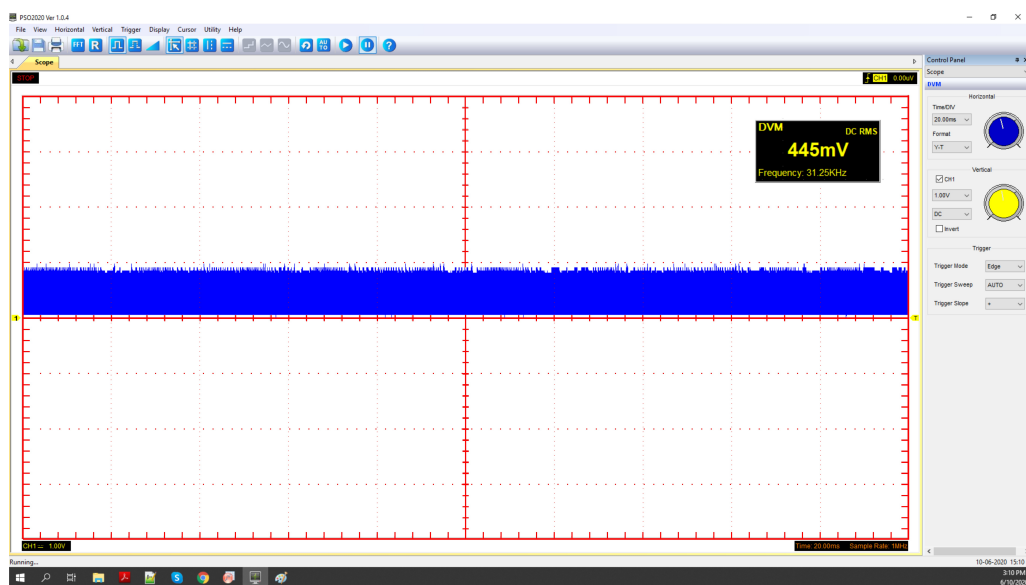
Drugi način punjenja superkondenzatora pri paralelnoj vezi solarnih ćelija je postavljanje izlaznog napona regulatora na viši nivo nego što je potrebno, tj. 5 V. Sa većim izlaznim naponom regulatora može se očekivati da će vreme punjenja superkondenzatora biti kraće. Međutim, neophodan uslov za to je da intenzitet struje ostane nepromenjen. To se ne može postići upotrebom regulatora zbog ograničene izlazne snage (kada se napon poveća struja se smanjuje), što rezultati prikazani na slici 98 potvrđuju.

Vreme punjenja pri 4 i 5 klux je nekoliko minuta duže nego kada je izlazni napon regulatora 3,3 V. Pri konstantnoj ulaznoj snazi i fiksnoj vrednosti opterećenja, izlazna snaga će takođe biti konstantna. Posledica toga je manja izlazna struja sa povećanjem izlaznog napona, pa je zbog toga potrebno više vremena da napon na superkondenzatoru dostigne potrebnu vrednost. Dodatni problem koji se može da nastane u ovom slučaju je nedovoljno



Slika 98: Vreme punjenja superkondenzatora iz paralelno povezanih solarnih ćelija pri izlaznom naponu regulatora od 5 V.

snage da se aktivira regulator, što se može videti pri osvetljenosti od 3 klux. Zbog male ulazne snage regulator se ne može aktivirati (slika 99).

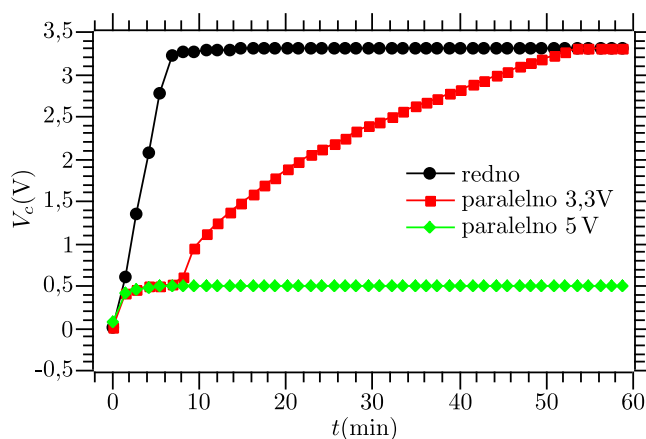


Slika 99: Napon na SV kontaktu regulatora MCP1640 pri neaktivnom režimu rada.

Nestabilna frekvencija signala na SV kontaktu i vrednost amplitude ovog signala od oko 450 mV ukazuju na nedovoljno ulazne snage da bi bilo moguće generisati izlazni napon od 5 V. Kao što je ranije rečeno, da bi se regulator aktivirao neophodno je 650 mV.

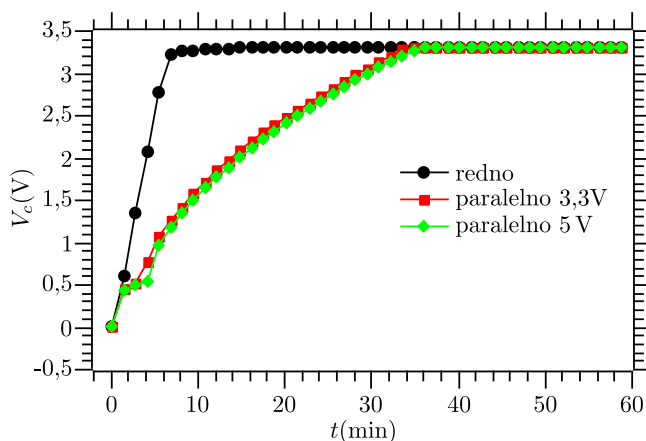
Na slici 100 je predstavljeno poređenje vremena punjenja superkondenzatora pri intenzitetu osvetljenosti od 3 klux iz solarnih ćelija povezanih na različite načine.

Sa prikazanog grafika se može videti da je daleko najefikasnije način za punjenje superkondenzatora u ovom slučaju koristiti rednu vezu solarnih ćelija. Takođe, pri ovom nivou osvetljenosti nije moguće dobiti 5 V na izlazu regulatora.



Slika 100: Vreme punjenja superkondenzatora pri osvetljenosti od 3 klux.

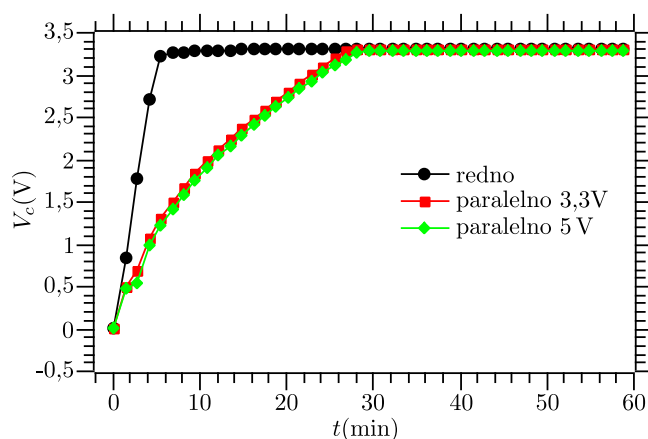
Pri osvetljenosti od 4 klux solarne ćelije generišu više električne energije tako da se tada na izlazu regulatora može dobiti i vrednost napona veća od 3,3 V, što potvrđuju grafici na slici 101. Međutim, i u ovom slučaju je vreme punjenja superkondenzatora najkraće kada se ne koriste dodatna integrisana kola, a solarne ćelije su povezane redno.



Slika 101: Vreme punjenja superkondenzatora pri osvetljenosti od 4 klux.

Gotovo identične krive punjenja kao pri osvetljenosti od 4 klux, dobijaju se pri osvetljenosti od 5 klux, što se može videti na slici 102. Povećanje intenziteta osvetljenosti doprinosi da solarne ćelije generišu više električne energije pa se vreme punjenja superkondenzatora smanjuje.

Na osnovu dobijenih i prikazanih rezultata može se zaključiti da je najefikasniji način za punjenje superkondenzatora preko solarnih ćelija korišćenjem električnog kola bez regulatora. To je zato što nema dodatnog gubitka snage, pa se veći procenat snage proizvedene solarnim ćelijama prenosi do superkondenzatora.



Slika 102: Vreme punjenja superkondenzatora pri osvetljenosti od 5 klux.

S druge strane, kada je napon na izlazu solarnih ćelija manji od potrebnog, regulator kojim se povećava vrednost napona je dobro rešenje. Treba imati na umu da se pri tome troši deo generisane snage pa je i vreme punjenja superkondenzatora duže. Takođe, deo generisane snage se troši na aktiviranje regulatora, što produžava vreme punjenja superkondenzatora i može biti problem pri nižem nivou intenziteta osvetljenosti. Ako se izlazni napon regulatora podesi na veću vrednost, izlazna struja se smanjuje i vreme punjenja je duže, tako da izlazni napon regulatora ne bi trebalo da bude veći od neophodne vrednosti.

Glava 7

Zaštita podataka u autonomnim senzorima

Usled razvoja tehnologije bežičnih senzorskih mreža, kome je između ostalih značajno doprinela bežična komunikacija, došlo je do novih bezbednosnih problema koji se mogu javiti pri prenosu podataka. U bežičnim medijima komunikacija je podložna presretanju, prisluškivanju i modifikaciji podataka, bilo da se radi o komunikaciji između samih autonomnih senzora (senzorskih čvorova), senzorskih čvorova i bazne stanice, ili između bazne stanice i servera. Bežične senzorske mreže su ranjive na različite pretnje i napade, što može dovesti do kašnjenja, prekida komunikacije i gubitka informacija. Zbog toga je neophodno obezbediti efikasne bezbednosne mehanizme kako bi se postigao određeni nivo sigurnosti [139], što uključuje:

- Autentifikaciju: Osnovni sistem za kontrolu pristupa mreži. Prilikom povezivanja novog senzorskog čvora na postojeću mrežu njegov identitet mora biti potvrđen od strane bazne stanice;
- Poverljivost: Zaštita informacija od neželjenog pristupa kako bi se obezbedila poverljivost poruka koje se razmenjuju, kao i potvrda da podaci potiču od navedenog pošiljaoca;
- Integritet: Potvrđuje da se primljeni podaci nisu promenili tokom prenosa.

Tradicionalna bezbednosna rešenja, koja se primenjuju u računarskim sistemima se ne mogu primeniti u bežičnim senzorskim mrežama zbog ograničenih energetske i memorijske resursa. Kako je ranije spomenuto, senzorski čvorovi se obično postavljaju u okruženjima bez pristupa električnoj mreži tako da potrošnju energije senzorskog čvora treba maksimalno smanjiti. Pored ograničene dostupne energije, dodatna ograničenja senzorskih čvorova su procesorska snaga i memorija. Zbog toga implementirani sigurnosni mehanizam treba da se izvrši u što kraćem vremenskom intervalu, troši minimalno električne energije i zauzima što je moguće manje programske memorije.

Jedna od tema istraživanja u oblasti bežičnih senzorskih mreža odnosi se na razvoj bezbednosnih mehanizama [140]. Postoji nekoliko metoda kojima se može obezbediti sigurnost tokom prenosa podataka. To su bezbednosni protokoli [141], digitalni potpisi i enkripcija [142]. Trenutna istraživanja kada je u pitanju bezbednosti podataka uglavnom se odnose na enkripcione algoritme, kao jednim od najefikasnijih načina rešavanja ovog problema. Enkripcija podataka je proces transformacije podataka iz čitljivog formata (*plain text*) u format koji se može pročitati samo uz odgovarajući dekripcioni ključ (*cipher text*). Enkripcioni algoritmi se dele na dve vrste, simetrične i asimetrične. Neki od najkorišćenijih simetričnih algoritama su AES, DES (*Data Encryption Standard*), Skipjack, TEA (*Tiny Encryption Algorithm*), XTEA (*eXtended Tiny Encryption Algorithm*), dok su najpoznatiji asimetrični algoritmi ECC (*Elliptic Curve Cryptography*) i RSA (*Rivest Shamir Adleman*) [143]. Simetrični algoritmi enkriptuju podatke simetričnim ključem (privatni ključ). Predajnik i prijmnik koriste isti ključ za enkripciju i dekripciju podataka. Simetrični algoritmi enkripcije dele se na dve osnovne kategorije. Jedna je blok (*block cipher*) kojom se enkriptuju podaci fiksne veličine, i druga, čiji bi naziv u bukvalnom prevodu bio tok (*stream cipher*), kojoj se mogu enkriptovati podaci različitih veličina. Enkripcija i dekripcija podataka asimetričnim algoritmima vrši se upotrebom dva ključa. Predajnik enkriptuje podatke koristeći javni ključ, a prijemnik vrši dekripciju primljenih podataka svojim privatnim ključem.

U ovom poglavlju analizirane su performanse hardverske i softverske implementacije AES enkripcionog algoritma u okviru autonomnog senzora, odnosno senzorskog čvora. Hardverska implementacija je bazirana na integrisanom kolu ATECC608A, dok je softverska implementacija realizovana kroz programski kôd mikrokontrolera. Analizirani parametri uključuju vreme izvršenja, potrošnju energije i memorijske zahteve, pri različitim radnim frekvencijama i naponima napajanja.

7.1 Metode zaštite podataka - pregled literature

Jedan način na koji se može obezbediti sigurnost podataka tokom prenosa u okviru bežičnih senzorskih mreža je korišćenje protokola rutiranja. Sigurna i energetski efikasna šema rutiranja podataka poznata kao SEER (*Simple Energy Efficient Routing*), obezbeđuje sigurnost podataka i nastoji da minimizuje potrošnju energije [144]. Ova šema, dizajnirana da se implementira na nivou hardvera, štedi energiju baterije i pruža visok nivo bezbednosti od presretanja podataka. Drugi pristup je kombinacija bezbednosnog protokola i algoritma za enkripciju. Primer ovog načina zaštite podataka je hibridni algoritam kreiran kombinacijom bezbednosnog protokola za senzorske mreže (SPINS - *Security Protocol for Sensor Networks*) i enkripcionim algoritmom za IoT uređaje je (SIT - *Secure Internet of Things*)

[145]. Protokoli rutiranja su pogodne metode bezbednosti za senzorske mreže koje se sastoje od velikog broja senzorskih čvorova. Njihov glavni nedostatak je neizbežan kompromis između potrošnje energije i visokog nivoa bezbednosti.

Ukoliko je potrebno obezbediti autentifikaciju, poverljivost i integritet podataka, a da pri tome nije neophodno da njihov sadržaj bude skriven, koriste se algoritmi digitalnog potpisa. Ovi algoritmi su zasnovani na asimetričnoj enkripciji. U tu svrhu se najčešće koristi ECC algoritam. Različiti načini implementacije ovog algoritma zahtevaju manje ili više resursa, a od toga zavisi i nivo bezbednosti koji se može postići [146, 147].

Enkripcija predstavlja napredniji nivo zaštite u odnosu na pomenute protokole i digitalni potpis, ali treba uzeti u obzir ograničenja koja postoje zbog ograničenih resursa autonomnih senzora [148]. Analiza karakteristika enkripcionih algoritama može se izvršiti korišćenjem softverskih alata. Poređenje karakteristika Skipjack XXTEA i AES simetričnih enkripcionih algoritama (memorijski zahtevi, potrošnja energije i vreme izvršenja), izvršeno upotrebom simulatora TOSSIM, predstavljeno je u radu [149], dok su u radu [150] analizirani TEA, XTEA i RC5 algoritmi korišćenjem simulatora NS2. Uticaj veličine podataka i ključeva na potrošnju energije i brzinu enkripcije/dekripcije za RC4, DES, AES i RSA algoritme ispitivan je u radu [151]. Jedan od najkorišćenijih simetričnih algoritama je AES. U radu [152] je predstavljeno poređenje karakteristika simetričnih algoritama, a rezultati pokazuju da je AES najpouzdanije rešenje za bezbednost podataka u autonomnim senzorima. Potrošnja energije pri različitim načinima implementacije AES algoritma, što obuhvata implementaciju AES-ECB (*Electronic Code Book*) algoritma u hardveru i softveru i hardversku implementaciju AES-CCM (*Counter with Cipher Block Chaining-Message Authentication Code*) algoritma, analizirana je u radu [153]. Rezultati analize performansi za četiri različite hardverske i softverske implementacije AES algoritma, dobijeni merenjima na senzorskom čoru Sparrov v3.2, koji sadrži ATmega128RFA1 mikrokontroler, pokazuju da je hardverska implementacija AES algoritma brža i da zahteva manje energije od softverske implementacije [154]. Pored implementacije postojećih verzija AES algoritma, istraživanja obuhvataju i njegovu implementaciju na različitim platformama, kao i modifikaciju samog algoritma radi dodatnog unapređenja [155]. Enkripcioni algoritam zasnovan na dinamičkom ključu (proizvoljni niz slova, numeričkih karaktera ili specijalnih znakova koji se dodaju lozinki), predložen u [156], pokazuje smanjenu potrošnju energije i u poređenju sa AES algoritmom.

Asimetrični algoritmi se, pored digitalnog potpisa, takođe koriste za enkripciju podataka. U radu [157] predstavljena je enkripcija zasnovana na distribuciji ključeva korišćenjem RSA i ECC algoritama. Poređenje vremena izvršenja ove dve vrste enkripcije prikazano je u radu [158]. Unapređena verzija ECC algoritma (*Improved Elliptic Key Cryptography* - IECC), predstavljena u radu [159], pruža manje kašnjenje u prenosu paketa i smanjenu potrošnju energije. Takođe, pri korišćenju asimetričnih algoritama posebna pažnja je posvećena samoj

distribuciji ključeva [160].

Hibridna enkripcija, koja se koristi u nekim aplikacijama, predstavlja kombinaciju simetričnih i asimetričnih algoritama. Enkripcioni algoritam se bira prema količini energije u senzorskom čvoru. Kada je dostupno više energije (u odnosu na zadatu graničnu vrednost) koristi se asimetrični enkripcioni algoritam ECIES (*Elliptic Curve Integrated Encryption Scheme*), a pri manjem nivou energije podaci se enkriptuju AES algoritmom [161]. Drugi način implementacije hibridnih algoritama je da se za generisanje ključeva koristi ECC algoritam, dok je enkripcija podataka vrši AES algoritmom. Na ovaj način se postiže veća brzina rada i manja potrošnja energije u poređenju sa asimetričnim algoritmima, kao i povećan nivo bezbednosti u odnosu na simetrične algoritme [162].

Postoje i drugi pristupi za enkriptovanje podataka. U radu [163] opisan je algoritam za ekripciju 64-bitnog podatka upotrebom 128-bitnog ključa, zasnovan na osnovnim operacijama kao što su ekskluzivno ILI (XOR) i pomeranje. Jednostavan algoritam koji koristi permutacione vektore kao enkripcione ključeve predstavljen je u radu [164]. Pored visokog nivoa sigurnosti predloženi sistem se odlikuje jednostavnom implementacijom i energetsom efikasnošću u poređenju sa drugim algoritmima (AES, DES, 3DES). U radu [165], predstavljena je enkripcija zasnovana na hibridnom haotičnom sistemu mapiranja. Neke druge tehnologije, kao što je *blockchain* [166, 167], pružaju visok nivo bezbednosti, ali zahtevaju više resursa od enkripcionih algoritama. Neke od osnovnih karakteristika metoda zaštite podataka sumirane su u tabeli 11.

Tabela 11: Karakteristike različitih metoda zaštite podataka, koje se koriste u autonomnim senzorima

Izvor	Metod		Platforma	Karakteristike
[144]	Protokoli rutiranja	SEER	MATLAB	• Povećan životni vek senzorskog čvora • Smanjen broj poruka • Smanjena potrošnja energije
[145]		SPINS protokol + SIT enkripcija	MATLAB	• Smanjeno vreme generisanja ključeva • Smanjena potrošnja za prenos podataka • Povećana sigurnost podataka
Nastavak na sledećoj strani				

Tabela 11 – nastavak

Ref.	Metod		Platforma	Karakteristike
[146]	Digitalni potpis	ASCW zasnovan na ECDSA	Senzorski čvor (<i>Zigbee</i>)	• Redukovana dužina ključa • Sigurna komunikacija na nivou čvora • Povećana otpornost na napade
[147]		Modifikovani ECDSA	FPGA	• Smanjeni računarski zahtevi • Povećana sigurnost u poređenju sa ECDSA
[149]	Simetrična enkripcija	Skipjack, XXTEA, AES	TOSSIM	U poređenju sa sistemom bez enkripcije: • Skipjack - 4,7 % duže vreme izvršavanja i 5 % veća potrošnja energije • XXTEA - 5,1 % duže vreme izvršavanja i 6 % veća potrošnja energije • AES - 8,4 % duže vreme izvršavanja i 13 % veća potrošnja energije
[150]		TEA, XTEA, RC5	NS2	• Propusnost mreže se smanjuje ako se broj ključeva poveća
[151]		RC4, DES, AES	ARM9TDMI	• Rastojanje između čvorova ima mali uticaj na potrošnju energije • Veličina podatka ima uticaj na potrošnju energije (veći podatak - više energije)
Nastavak na sledećoj strani				

Tabela 11 – nastavak

Ref.	Metod		Platforma	Karakteristike
				Potrošnja energije (opadajući poredak): AES-256, AES-192, AES-128, DES-CBC, RC4
[153]		SW-AES-CB, HW-AES-ECB, HW AES-CCM	LAUNCHXL-CC1310 (48 MHz)	- Vreme izvršavanja raste sa povećanjem podatka koji se enkriptuje - Intenzitet struje pri enkripciji: - SW-AES-CB = bez enkripcije - HW-AES-ECB, 1,14 mA više nego bez enkripcije
[154]		AES-ECB, AES-CBC, AES-CFB, AES-CTR	AtMega128 (16 MHz)	- Vreme izvršavanja raste sa povećanjem podatka koji se enkriptuje - Vreme izvršavanja je duže pri softverskoj enkripciji - Potrošnja energije je veća pri softverskoj enkripciji
[155]		AES (Optimizovana S-Box)	ASIC (10 MHz)	- Potrošnja energije: - 38,46 % manje nego Canright Sbox - 20-25 % manje nego LBS-CRS - 20-25 % manje nego DSE-CRS - 13 % manje nego DSE
Nastavak na sledećoj strani				

Tabela 11 – nastavak

Ref.	Metod		Platforma	Karakteristike
[156]	Asimetrična enkripcija	Algoritam zasnovan na dinamičkom ključu	Java, Intel(R) Pentium(R)	• Visok nivo bezbednosti uz manimalne komunikacione i računarske resurse • U odnosu na AES: - manje vreme izvršavanja (841 ms vs. 1066 ms) - manje memorijskog prostora (8307 b vs. 13 178 b)
[157]		BMAC, LMAC protokoli + AES, RSA, ECC	OMNet++	• Smanjena potrošnja energije • Smanjen broj izgubljenih paketa
[158]		RSA, ECC	Nije navedeno	• RSA se izvršava brže i zahteva manje memorije od ECC
[159]		IEKC	Nije navedeno	• Visoka efikasnost u pogledu kašnjenja, potrošnje energije i gubitka paketa
[160]		ECC	NS2	• Novi sistem distribucije ključeva • Smanjena memorija za skladištenje ključeva • Povećana sigurnost konekcije i otpornost na napade
[161]	Hibridna enkripcija	ECIES + AES	Senzorski čvor TelosB	• Povećan nivo sigurnosti i smanjena potrošnja energije u poređenju sa drugim algoritmima
Nastavak na sledećoj strani				

Tabela 11 – nastavak

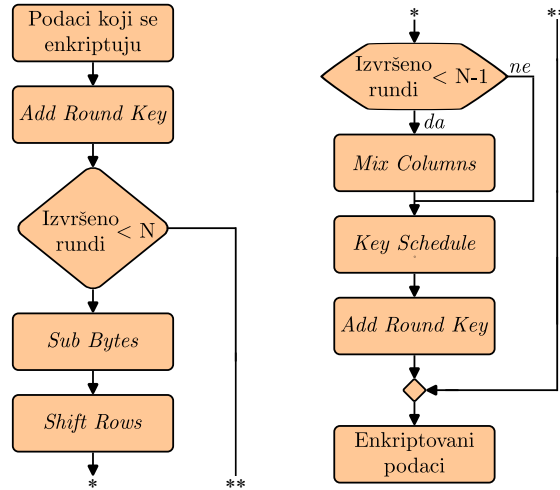
Ref.	Metod		Platforma	Karakteristike
[162]		ECC + AES	Nije navedeno	• Veća brzina izvršavanja, povećan nivo sigurnosti i smanjena potrošnja energije u poređenju sa drugim algoritmima
[163]	Ostale metode	Algoritam zasnovan na XOR i pomeraanju	Verilog	• Implementacija zahteva malo resursa, smanjena potrošnja energije u poređenju sa HIGHT
[164]		SDES	Nije navedeno	• Manja potrošnja energije u poređenju sa AES, DES i 3DES
[165]		Enkripcija zasnovana na haotičnim sistemima	Nije navedeno	• Veća brzina izvršavanja i manje memorisjkih resursa u poređenju sa RC5 i CWSN

7.2 AES enkripcioni algoritam

Obe vrste enkripcionih algoritama imaju prednosti i nedostatke [168]. Simetrični algoritmi su efikasni i jednostavni za implementaciju. Sa druge strane, asimetrični algoritmi su složeni i zahtevaju više vremena za izvršenje, ali pružaju viši nivo bezbednosti. Iako simetrični algoritmi pružaju niži nivo bezbednosti od asimetričnih, oni se obično koriste u autonomnim senzorima zbog ograničenih resursa. AES enkripcioni algoritam odlikuje se velikom brzinom (malo vreme izvršenja) i pruža veći nivo bezbednosti od drugih simetričnih algoritama. Zbog malih zahteva za memorijom i visoke otpornosti na napade, AES je jedan od najčešće korišćenih metoda zaštite podataka u IoT sistemima i autonomnim senzorima [169, 170].

AES algoritam predložen je od strane Nacionalnog instituta za standarde i tehnologiju (NIST) 2002, pod nazivom Rijndael, po dvojici belgijskih kriptografa koji su ga kreirali. Nakon što je odobren od Agencije za nacionalnu bezbednost (NSA), AES je postao bezbednosni standard za enkripciju podataka [171]. AES se danas široko koristi i za njega su

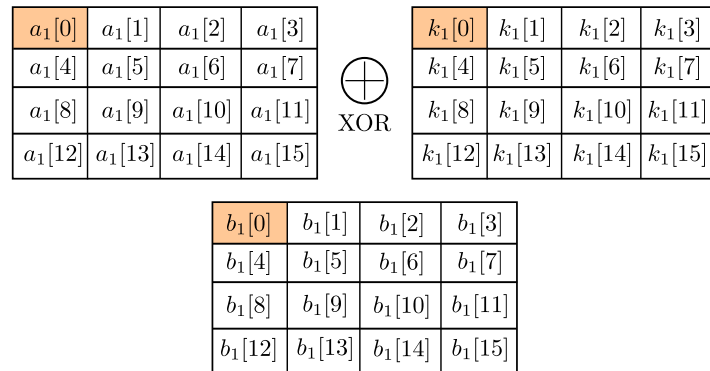
kreirane mnoge biblioteke u različitim programskim jezicima, kao što su, Java, C, C++, i dr. AES je algoritam kojim se enkriptuju/dekriptuju podaci fiksne veličine (128 bitova) koristeći simetrične ključeve [172]. Enkriptovanje podatata izvršava se kroz 10, 12 ili 14 rundi, upotrebom ključeva veličine 128, 192 ili 256 bitova, respektivno. Pojednostavljeni strukturni algoritam AES enkripcije prikazan je na slici 103.



Slika 103: AES - strukturni algoritam.

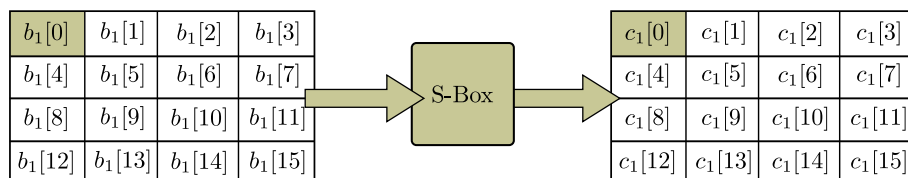
Ulazni 128-bitni podatak koji treba enkriptovati se deli na 16 bajtova, organizovanih u okviru matrice 4x4, nakon čega se nad njime izvršavaju sledeće operacije:

Add Round Key se izvršava na kraju svake runde i jednom na početku algoritma (pre prve runde). Ova deo algoritma zasniva se na XOR operaciji između ulaznih podataka i ključa, za trenutnu rundu (slika 104). Ulazni podaci označeni su $a_1[0] - a_1[15]$, a ključevi $k_1[0] - k_1[15]$. Rezultat ove operacije je novih 16 bajtova $b_1[0] - b_1[15]$, koji se koriste kao ulazni podaci za narednu rundu. Broj u indeksu označava trenutnu rundu.



Slika 104: AES - operacija *Add Round Key*.

Sub Bytes predstavlja korak nelinearne zamene, svaki bajt niza trenutnog stanja zamenjuje se odgovarajućom vrednošću iz tabele 12, nakon čega se dobijaju bajtovi označeni $c_1[0] - c_1[15]$ (slika 105).

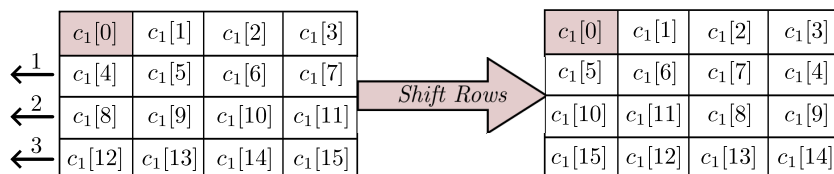


Slika 105: AES - operacija *Sub Bytes*.

Tabela 12: S-Box tabela na osnovu koje se vrši operacija *Sub Bytes*

		y															
x		00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	0a	0b	0c	0d	0e	0f
	00	63	7c	77	7b	f2	6b	6f	c5	30	01	67	2b	fe	d7	ab	76
	10	ca	82	c9	7d	fa	59	47	f0	ad	d4	a2	af	9c	a4	72	c0
	20	b7	fd	93	26	36	3f	f7	cc	34	a5	e5	f1	71	d8	31	15
	30	04	c7	23	c3	18	96	05	9a	07	12	80	e2	eb	27	b2	75
	40	09	83	2c	1a	1b	6e	5a	a0	52	3b	d6	b3	29	e3	2f	84
	50	53	d1	00	ed	20	fc	b1	5b	6a	cb	be	39	4a	4c	58	cf
	60	d0	ef	aa	fb	43	4d	33	85	45	f9	02	7f	50	3c	9f	a8
	70	51	a3	40	8f	92	9d	38	f5	bc	b6	da	21	10	ff	f3	d2
	80	cd	0c	13	ec	5f	97	44	17	c4	a7	7e	3d	64	5d	19	73
	90	60	81	4f	dc	22	2a	90	88	46	ee	b8	14	de	5e	0b	db
	a0	e0	32	3a	0a	49	06	24	5c	c2	d3	ac	62	91	95	e4	79
	b0	e7	c8	37	6d	8d	d5	4e	a9	6c	56	f4	ea	65	7a	ae	08
	c0	ba	78	25	2e	1c	a6	b4	c6	e8	dd	74	1f	4b	bd	8b	8a
	d0	70	3e	b5	66	48	03	f6	0e	61	35	57	b9	86	c1	1d	9e
	e0	e1	f8	98	11	69	d9	8e	94	9b	1e	87	e9	ce	55	28	df
	f0	8c	a1	89	0d	bf	e6	42	68	41	99	2d	0f	b0	54	bb	16

Shift Rows je operacija kojom se vrši pomeranje bajtova u okviru vrste, kao što je prikazano na slici 106.



Slika 106: AES - operacija *Shift Rows*.

Mix Columns je operacija koja predstavlja proizvod transformacione matrice i podataka dobijenih nakon *Shift Rows* operacije (slika 107) i izvršava se u svim rundama osim poslednje.

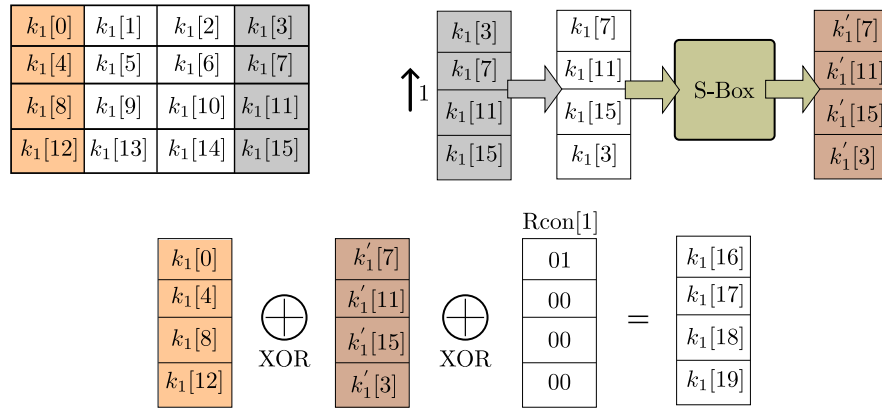
$$\begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 02 & 03 & 01 & 01 \\ \hline 01 & 02 & 03 & 01 \\ \hline 01 & 01 & 02 & 03 \\ \hline 03 & 01 & 01 & 02 \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline c_1[0] & c_1[1] & c_1[2] & c_1[3] \\ \hline c_1[5] & c_1[6] & c_1[7] & c_1[4] \\ \hline c_1[10] & c_1[11] & c_1[8] & c_1[9] \\ \hline c_1[15] & c_1[12] & c_1[13] & c_1[14] \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline d_1[0] & d_1[1] & d_1[2] & d_1[3] \\ \hline d_1[4] & d_1[5] & d_1[6] & d_1[7] \\ \hline d_1[8] & d_1[9] & d_1[10] & d_1[11] \\ \hline d_1[12] & d_1[13] & d_1[14] & d_1[15] \\ \hline \end{array}$$

$$d_1[0] = (02 \times c_1[0]) \text{ XOR } (03 \times c_1[5]) \text{ XOR } (01 \times c_1[10]) \text{ XOR } (01 \times c_1[15])$$

Slika 107: AES - operacija *Mix Columns*.

Od dobijenih vrednosti, $d_1[0] - d_1[15]$, se operacijom *Add Round Key* generišu početne vrednosti za narednu rundu, tj. $b_2[0] - b_2[15]$.

Operacijom *Key Schedule* vrši se generisanje ključa za narednu rundu. Uključuje tri koraka: Novi ključ se dobija XOR operacijom između tri kolone, što je prikazano na slici 108. U prvoj koloni su vrednosti iz prve kolone postojećeg ključa, u drugoj su vrednosti dobijene od četvrte kolone postojećeg ključa nad kojima se vrše operacije rotacije i zamene (S-Box), i poslednja kolona su vrednosti koje se uzimaju iz Rcon tabele.



Slika 108: AES - operacija *Key Schedule*.

Vrednosti elemenata Rcon[i] tabele mogu se predstaviti kao:

$$\text{Rcon}[i] = [rc_i \quad 00_{16} \quad 00_{16} \quad 00_{16}], \quad (7.1)$$

pri čemu se vrednosti rc_i izračunavaju koristeći izraz:

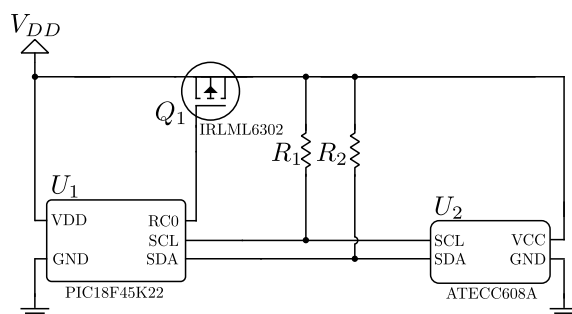
$$rc_i = \begin{cases} 1 & , i = 1 \\ 2 \cdot rc_{i-1} & , i > 1 \wedge rc_i < 80_{16} \\ (((2 \cdot rc_{i-1}) \oplus 11B'16) \bmod 100_{16}) & , i > 1 \wedge rc_i \geq 80_{16} \end{cases} \quad (7.2)$$

7.3 Implementacija AES enkripcionog algoritma

AES enkripcioni algoritam se u okviru autonomnog senzora može implementirati na dva načina. Prvi način, hardverska implementacija, vrši se dodavanjem eksternog integrisanog kola sa ugrađenim enkripcionim algoritmom. Drugi način je softverska implementacija. Kao što se može naslutiti iz samog naziva, ovaj način implementacije vrši se upisivanjem algoritma enkripcije u okviru programskog kôda mikrokontrolera koji se koristi u autonomnom senzoru.

7.3.1 Hardverska implementacija

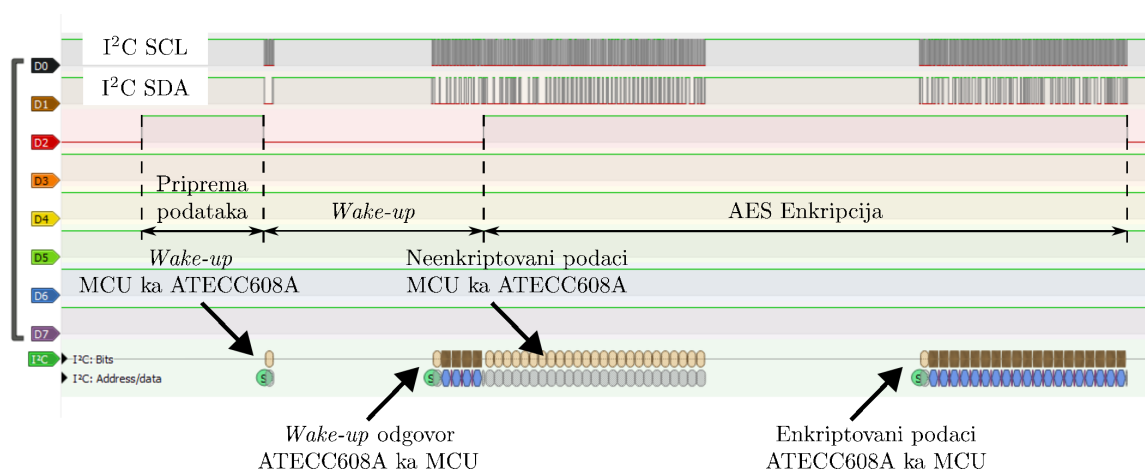
Hardverska implementacija AES algoritma realizovana je korišćenjem eksternog integrisanog kola ATECC608A [173]. Ovo integrisano kolo odlikuje se niskom potrošnjom energije, radi pri naponu napajanja od 2 do 5,5 V i integriše različite enkripcione algoritme (AES, SHA-256, generator slučajnih brojeva i ECC digitalni potpis). U memoriji ATECC608A-a može se sačuvati do 16 različitih ključeva za AES algoritam. Razmena podataka između ovog kola i mikrokontrolera vrši se preko I²C komunikacije, pri frekvenciji taktnog signala do 1 MHz. Razlozi za odabir ovog integrisanog kola su, pored niske potrošnje energije, niska cena i dostupnost na tržištu. Na električnoj šemi (slika 109) prikazan je način povezivanja mikrokontrolera i ATECC608A-a u okviru autonomnog senzora. PMOS tranzistor, IRLML6302, omogućava isključivanje integrisanog kola ATECC608A, kako bi se eliminisao njegov uticaj na potrošnju energije pre i posle procesa enkripcije.



Slika 109: Električna šema povezivanja integrisanog kola ATECC608A sa mikrokontrolerom pri hardverskoj implementaciji AES enkripcionog algoritma.

Neophodno je konfigurisati ATECC608A pre upotrebe. To obuhvata odabir AES enkripcije i upisivanje ključa. Enkripcija pri hardverskoj implementaciji ima tri koraka, kao što je prikazano na slici 110: priprema podataka, uključivanje ATECC608A i uspostavljanje komunikacije između njega i mikrokontrolera (*Wake-up*), i enkriptovanje. Priprema podataka predstavlja upisivanje podatka koji treba da se enkriptuje u niz od 16 bajtova. U drugom

koraku, mikrokontroler preko tranzistora uključuje ATECC608A, šalje mu signal za uspostavljanje komunikacije i čeka odgovor. Ovaj proces traje oko 1500 μ s. Nakon toga podatak za enkripciju se prosleđuje sa mikrokontrolera na ATECC608A. Za izvršavanje enkripcionog algoritma unutar ATECC608A potrebno je oko 2030 μ s, nakog čega mikrokontroler može da pročita enkriptovani podatak.



Slika 110: Komunikacija između mikrokontrolera i ATECC608A pri procesu enkripcije.

7.3.2 Softverska implementacija

Kao što je navedeno, drugi način za enkriptovanje podataka u autonomnom senzoru je implementacija enkripcionog algoritma kroz programski kôd mikrokontrolera [174]. Pri tome se u memoriji mikrokontrolera skladišti i enkripcioni ključ. Enkripcija pri softverskoj implementaciji obuhvata iste korake kao pri hardverskoj, osim dela u kome se vrši uključivanje eksternog integrisanog kola. Priprema podatka je ista kao pri hardverskoj implementaciji, dok je enkripcija podatka pojednostavljena, jer se ceo proces obavlja unutar mikrokontrolera (nema komunikacije između mikrokontrolera i eksternog integrisanog kola). Pri implementaciji enkripcionog algoritma na oba načina iskorišćen je mikrokontroler PIC18F45K22.

7.3.3 Eksperimentalno određivanje performansi enkripcionog algoritma

Performanse na osnovu kojih se vrši upoređivanje hardverske i softverske implementacije AES algoritma su vreme izvršavanja, potrošnja energije i memorijski prostor mikrokontrolera koji algoritam zauzima [175]. Vreme izvršavanja enkripcije vrši se korišćenjem osciloskopa, merenjem trajanja impulsa koji mikrokontroler generiše na svom GPIO izvodu. Promena

naponskog nivoa na ovom izvodu označava početak/kraj određene operacije u okviru enkripcionog algoritma. Svi neiskorišćeni GPIO izводи mikrokontrolera su konfigurisani kao izlazni i postavljeni na nizak naponski nivo, kako bi se minimizovala potrošnja energije [176].

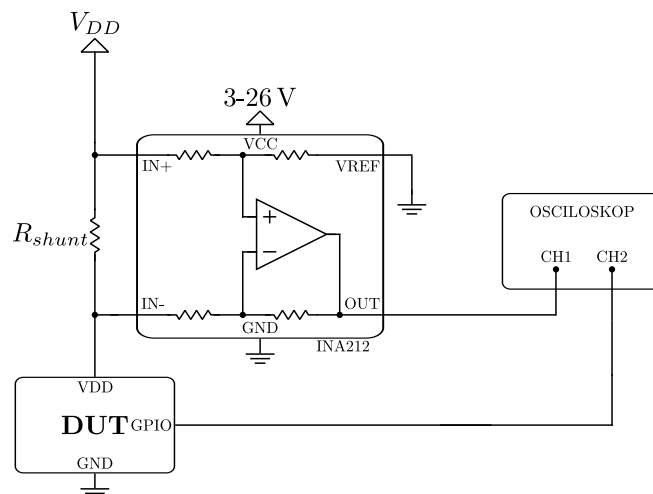
Potrošnja energija tokom enkripcije podataka može se izračunati pomoću jednačine:

$$E = P \cdot t = I \cdot V \cdot t = Q \cdot V, \quad (7.3)$$

gde je E potrošena energija, P snaga, t vreme izvršavanja algoritma, I jačina struje, V napon napajanja, a Q proteklo naelektrisanje. Jačina struje koja protiče kroz sam autonomni senzor nije konstantna tako da se potrošnja energije može izračunati kao:

$$E = Q \cdot V = V \int_0^t I \cdot dt, \quad (7.4)$$

pri čemu vrednost integrala predstavlja količinu proteklog naelektrisanja kroz autonomni senzor tokom procesa enkripcije u vremenskom intervalu određenom granicama integracije. Jačina struje koja protiče kroz potrošač, što je u ovom slučaju autonomni senzor, se može meriti različitim metodama zasnovanim na šant otporniku, naponskom pretvaraču na osnovu strujnog ogledala [177], izvoru konstantne struje [178] i dr. [179]. Za potrebe merenje struje pri enkripciji podataka upotrebljeno je električno kolo prikazano na slici 111, koje je zasnovano na šant otporniku i integrisanom kolu INA212 (instrumentacioni pojačavač). Ova metoda se odlikuje visokom preciznošću i ima mali uticaj na radni napon napajanja potrošača.



Slika 111: Električna šema kola za merenje struje - DUT (*Device Under Test* potrošač kroz koji se meri jačina struje. Pri hardverskoj impementaciji enkripcije to je električno kolo prikazano na slici 109, a pri softverskoj implementaciji mikrokontroler).

Vrednost otpornika R_{shunt} mora biti odabrana tako da pad napona na njemu ne umanjuje vrednost napona napajanja. Sa druge strane, taj pad napona mora biti dovoljno veliki kako bi se mogao detektovati integrisanim kolom INA212. Za merenje struje pri enkripciji podataka odabran je otpornik čija je otpornost $100\text{ m}\Omega$, tolerancije 1 %. Postupak merenja sastoji se od sledećih koraka:

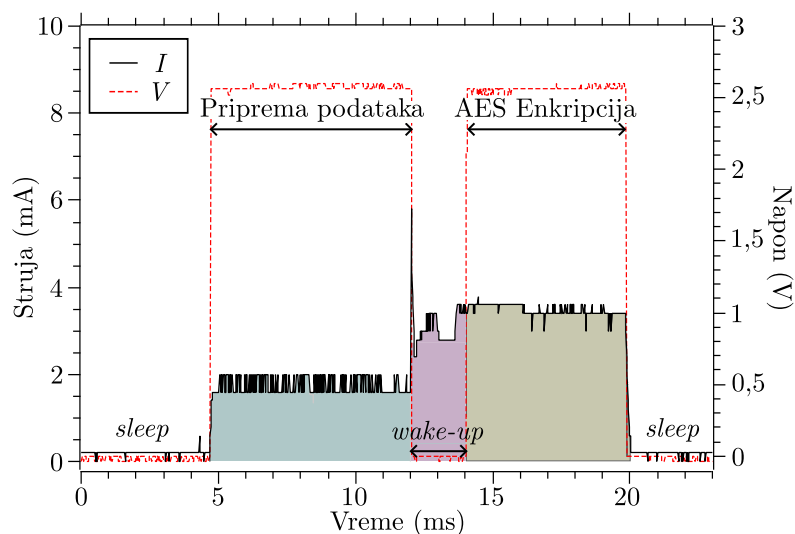
1. R_{shunt} se povezuje izmneđu IN+ i IN- kontakata integrisanog kola INA212;
2. IN+ kontakt se povezuje na napon napajanja, a IN- kontakt na masu;
3. Jedan kanal osciloskopa (CH1) se povezuje na OUT kontakt integrisanog kola INA212;
4. Drugi kanal osciloskopa (CH2) se povezuje na GPIO izvod mikrokontrolera;
5. Trajanje određene operacije unutar mikrokontrolera meri se na kanalu CH2;
6. Jačina struje koja pri tom procesu protiče kroz sistem meri se na kanalu CH1.

Eksperimentalno okruženje za merenje struje radi pri istom naponu napajanja kao mikrokontroler i ATECC608A, što znači da se isto može realizovati u okviru samog autonomnog senzora. Napajanje okruženja za merenje vršeno je iz drugog izvora, kako sam postupak merenja ne bi dodatno povećao potrošnju.

7.4 Analiza performansi hardverske i softverske implementacije AES algoritma

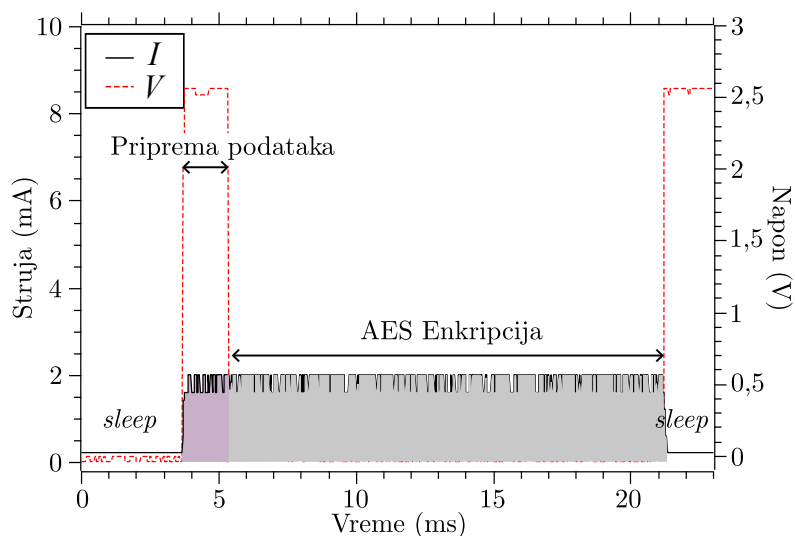
Vreme izvršavanja enkripcije i potrošnja energije, izmereni su i izračunati pri tri različita nivoa napona napajanja i četiri različite radne frekvencije mikrokontrolera. Iako su minimalne vrednosti napona napajanja mikrokontrolera PIC18F45K22 i integrisanog kola ATECC608A 2,3 i 2 V, respektivno, za minimalni nivo napona napajanja uzeto je 2,6 V. Ovaj nivo napona je neophodan da bi se obezbedila pouzdana kontrola PMOS tranzistora, kojim se uključuje/isključuje ATECC608A. Druge dve vrednosti napona napajanja, pri kojima je vršeno merenje navedenih parametara, su 3,3 i 5 V, jer su najčešći u autonomnim senzorima (napajanje mikrokontrolera, senzora, radio modula, itd.). Izabrane radne frekvencije su 8, 16, 32 i 64 MHz, što je najveća radna frekvencija korišćenog mikrokontrolera.

Na slici 112 prikazan je talasni oblik struje koja predstavlja zbir struja kroz mikrokontroler i ATECC608A tokom izvršavanja enkripcionog algoritma, pri hardverskoj implementaciji. Na slici se može videti i talasni oblik promene napona na GPIO izvodu mikrokontrolera, koji se koristi za merenje vremena potrebnog za specifičnu operaciju.



Slika 112: Talasni oblik struje kroz autonomni senzor tokom enkripcije podataka pri hardverskoj implementaciji AES algoritma.

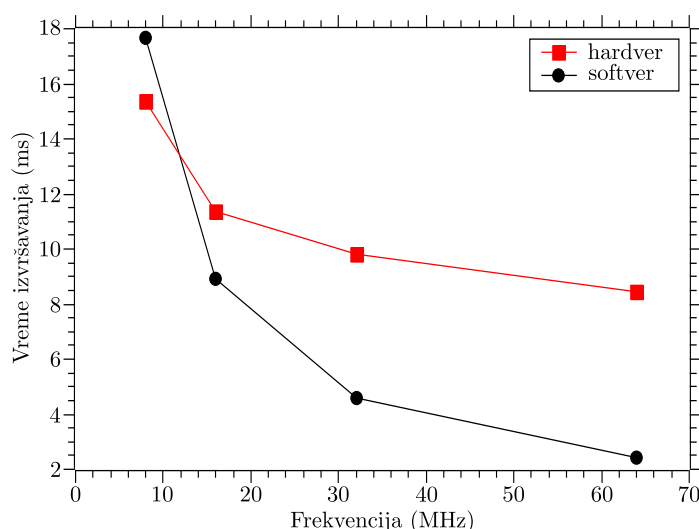
Iste vrednosti, u slučaju izvršavanja softverski implementiranog enkripcionog algoritma prikazane su na slici 113. U oba slučaja napon napajanja je 2,6 V, a radna frekvencija mikrokontrolera 8 MHz.



Slika 113: Talasni oblik struje kroz autonomni senzor tokom enkripcije podataka pri softverskoj implementaciji AES algoritma.

Mikrokontroler je u režimu minimalne potrošnje (*sleep mode*) pre i posle procesa enkripcije, da bi se smanjila potrošnja energije tokom neaktivnog perioda (nema merenja ili slanja podataka). Ukupno vreme izvršavanja enkripcije pri hardverskoj implementaciji izračunava

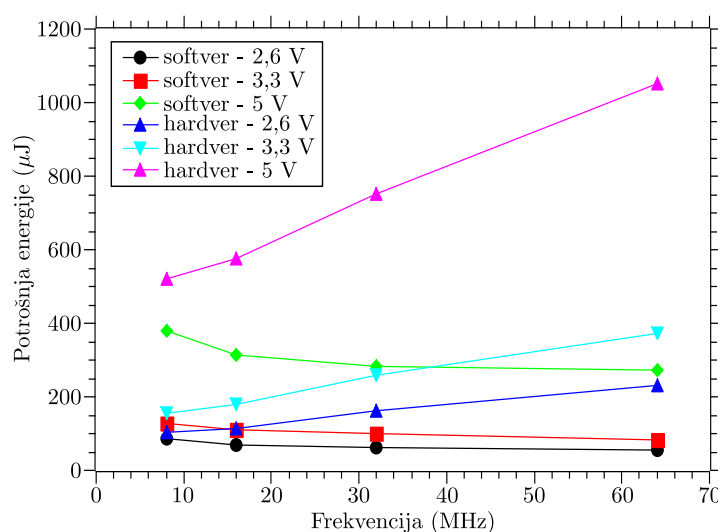
se kao zbir vremena potrebnog za pripremu podataka, uspostavljanje komunikacije sa integriranim kolom ATECC608A i enkriptovanje podataka. Proces enkripcije podataka pri softverskoj implementaciji, kao što je već rečeno, sadrži operacije pripreme i enkriptovanja podataka. Zavisnost vremena izvršavanja za oba načina implementacije, pri četiri različite radne frekvencije prikazana je na slici 114.



Slika 114: Vreme izvršavanja u zavisnosti od radne frekvencije pri hardverskoj i softverskoj implementaciji AES algoritma.

Vreme izvršavanja se smanjuje sa povećanjem radne frekvencije mikrokontrolera. Može se reći da su ovakve promene očekivane, s obzirom da je mikrokontroleru potrebno manje vremena da obavi istu operaciju pri višoj radnoj frekvenciji. Smanjenje vremena izvršavanja, pri porastu frekvencije je intenzivnije pri softverskoj nego hardverskoj implementaciji enkripcije. Kada se radna frekvencija udvostruči, vreme izvršavanja softverski implementirane enkripcije se smanjuje za skoro 50 %. Slična zavisnost je zabeležena i pri hardverskoj implementaciji, ali je smanjenje vremena izvršavanja manje: 25, 15 i 13 % za promene frekvencije od 8-16 MHz, 16-32 MHz i 32-64 MHz, respektivno. Razlog za to je fiksni vremenski interval, koji je neophodan da se određene operacije (uspostavljanje komunikacije, enkriptovanje podataka) izvrše unutar integrisanog kola ATECC608A, a čije trajanje ne zavisi od radne frekvencije mikrokontrolera. Proces enkripcije podataka traje kraće pri hardverskoj nego pri softverskoj implementaciji pri nižim vrednostima radnih frekvencija u okviru posmatranih (do oko 12 MHz). Dakle, ako je vreme izvršavanja primarni cilj, a radna frekvencija je manja od 12 MHz, enkripcioni algoritam treba implementirati upotrebom hardvera, dok implementacija u softveru obezbeđuje veću brzinu (manje vreme izvršavanja) na višim radnim frekvencijama.

Na slici 115 je prikazano kako napon napajanja i radna frekvencija utiču na potrošnju energije potrebne da se izvrši enkriptovanje podataka. Pri istim vrednostima napona napajanja i jednakim radnim frekvencijama, potrebno je manje energije ukoliko se podaci enkriptuju algoritmom koji je implementiran u softveru. Ovakve vrednosti su očekivane, s obzirom da se kompletna enkripcija podataka vrši unutar mikrokontrolera bez korišćenja eksternih komponenata i integrisanih kola. Povećanje napona napajanja pri konstantnoj radnoj frekvenciji utiče na povećanje potrošnje energije bilo da se radi o hardverskoj ili softverskoj implementaciji, što je u skladu sa jednačinom (7.4), koja se koristi za izračunavanje potrošnje.



Slika 115: Potrošnja energije u zavisnosti od radne frekvencije pri hardverskoj i softverskoj implementaciji AES algoritma.

Pri enkripciji podataka korišćenjem hardverski implementiranog algoritma i konstantnom naponu napajanja, potrošnja energije raste sa povećanjem radne frekvencije. Intenzivnije promene zabeležene su pri najvišim radnim frekvencijama. Glavni uzrok povećanja potrošnje energije je porast jačine struje, koji je na višim frekvencijama izraženiji od smanjenja vremena izvršavanja. Sa druge strane, pri enkripciji podataka softverskim implementiranim algoritmom, smanjenje vremena izvršavanja ima nešto značajniji uticaj na potrošnju energije od porasta jačine struje. Zbog toga se potrošnja energije smanjuje pri porastu radne frekvencije. U tabeli 13 su podaci kojima je numerički predstavljena razlika u potrošnji energije za opisane načine implementacije i navedene parametre.

Rezultati pokazuju da je potrošnja energije pri enkripciji podataka veća kada se koristi hardverski realizovan AES algoritam, za sve ispitivane radne frekvencije i napone napajanja. Na primer, pri radnoj frekvenciji od 8 MHz i naponu napajanja od 2,6 V, potrebno je 16 % više

Tabela 13: Poređenje potrošnje energije pri enkripciji podataka upotrebom hardverski i softverski implementiranog AES algoritma

Radna frekvencija (MHz)	Razlika u potrošnji energije (hardver vs. softver) (%)		
	Napon (V)		
	2,6	3,3	5
8	+16	+17	+27
16	+40	+39	+45
32	+60	+61	+61
64	+75	+75	+78

energije da se podaci enkriptuju AES algoritmom implementiranom u hardveru, u poređenju sa istim načinom enkripcije u pomoću softvera.

Treći parametar na osnovu koga se enkripcioni algoritmi mogu porediti i koji je analiziran u okviru istraživanja, je memorijski prostor neophodan za njegovu implementaciju. Ova vrednost je naročito značajna kada se enkripcioni algoritam implementira u okviru autonomnog senzora. U ovom slučaju, izabrani mikrokontroler (PIC18F45K22) ima 4 kB programabilne memorije, koja se koristi za implementaciju programskog kôda od strane korisnika. Hardverska implementacija AES enkripcionog algoritma zauzima 4,58 % memorije, dok je za softversku implementaciju neophodno iskoristiti 10,13 % iste. Stoga je hardverska implementacija bolji izbor kada je potrebno obezbediti sigurnost podataka uz minimalnu upotrebu memorijskih resursa.

Dobijeni rezultati mogu biti od koristi za izbor odgovarajućeg enkripcionog algoritma u odnosu na raspoložive resurse. To može smanjiti vreme razvoja i obezbediti minimalnu potrošnju energije, produžavajući vreme rada autonomnog senzora. Izbor načina implementacije ne zavisi od praćenih fizičkih parametara i primene senzorskog čvora. Na osnovu vremena izvršavanja, dostupne energije i memorijskih resursa mikrokontrolera (kapacitet programabilne memorije i radna frekvencija) određuje se koji način implementacije je pogodniji. Ako je vreme izvršavanja primarni parametar koji treba optimizovati i ne postoje ograničenja po pitanju dostupne energije, softverska implementacija AES enkripcionog algoritma je bolje rešenje od hardverske. Takođe, potrošnja energije pri enkripciji podataka upotrebom AES algoritma je manja u slučaju softverske implementacije algoritma, nego pri implementaciji istog upotrebom dodatnih integrisanih kola. Dakle, ako je primarni cilj ušteda energije, onda za zaštitu podataka treba primeniti softverski implementiran enkripcioni algoritam. Sa druge strane, za hardversku implementaciju potrebno je manje programabilne memorije, što je značajno za autonomne senzore koji su zasnovani na mikrokontrolerima sa ograničenim kapacitetom memorije.

Glava 8

Zaključak

Porast broja stanovnika u velikim gradovima, koji je naročito izražen poslednjih godina, doveo je do potrebe da se svakodnevni život stanovnika učini jednostavnijim. Iz tog razloga su u oblasti elektronike razvijeni različiti uređaji koji omogućavaju jednostavan i brz pristup potrebnim informacijama i efikasnije izvršavanje određenih aktivnosti. Posebnu ulogu u tim sistemima imaju senzori pomoću kojih se vrši merenje različitih fizičkih parametara okruženja. Naročito su značajni autonomni senzori, tj. uređaji koji mogu da prikupljaju informacije bez potrebe za upravljanjem od strane ljudi i da te informacije proslede do centra za obradu. Integracijom više ovakvih uređaja formiraju se sistemi kojima se vrši monitoring parametara u okviru iste gradske strukture. Neki od njih su sistemi za monitoring saobraćaja, kao i sistemi za monitoring parametara životne sredine, itd. Skup više sistema čini strukturu koja se u literaturi sreće pod nazivom pametan grad.

U ovoj disertaciji prikazan je koncept pametnog grada i nekih njegovih sistema. Posebna pažnja posvećana je uređaju za detekciju vozila baziranom na mikrokontroleru i senzoru za merenje magnetnog polja, koji se može implementirati u okviru saobraćajnih sistema. Pored razvoja algoritma detekcije i prototipa samog uređaja sprovedena je detaljna analiza promena magnetnog polja koja na nastaje pod uticajem kretanja vozila (magnetni potpis). Realizovan je generator magnetnog polja kojim se u laboratorijskim uslovima sa visokom preciznošću može izvršiti rekonstrukcija magnetnih potpisa različitih vozila, čime se sam proces razvoja i testiranja detektora čini jednostavnijim i bržim. Realizovani generator magnetnog polja se takođe može koristiti u i druge svrhe jer ima mogućnost da generiše magnetno polje predefinisanog talasnog oblika. Testiranjem je pokazano da realizovani detektor ima visoku preciznost detekcije, a ono što ga razlikuje od drugih, postojećih detektora, je jednostavna implementacija.

Realizovan je sistem za monitoring parametara životne sredine sastavljen od senzora za merenje temperature, vlažnosti vazduha, vazdušnog pritiska, kao i senzora za merenje zagađenosti vazduha (ugljen-monoksid i azot-dioksid). Pri tome je poseban akcenat stavljen na bežični prenos podataka upotrebom LoRa radio modula, kao i primenu TEEN protokola

radi smanjenja potrošnje energije. Rezultati pokazuju da se modifikovanom verzijom ovog protokola može ostvariti veća ušteda energije, a da se pri tome tačnost podataka na strani prijemnika ne smanji. Takođe opisan je MQTT protokol i njegova implementacija u ovakvim sistemima.

Autonomnost senzora, pored samostalnog rada, odlikuje se i u samostalnom prikupljanju energije iz okoline. To se može vršiti na više načina, a u disertaciji je prikaz princip konverzije sunčeve energije i njeno skladištenje u superkondenzatoru. Analizirana je efikasnost različitih načina punjenja superkondenzatora, pri čemu je izvor energije solarna ćelija. Pokazano je da se efikasnije punjenje ostvaruje bez upotrebe specijalizovanih integrisanih kola, ali je njihova upotreba neophodna pri manjim vrednostima napona koje obezbeđuje solarne ćelije.

Prilikom bežičnog prenosa podataka može doći do njihove modifikacije. Kako bi se to izbeglo, a samim tim i sprečila njihova zloupotreba, podaci se na neki način moraju zaštititi. U tu svrhu, implementiran je AES enkripcioni algoritam na dva različita načina. Hardverski, korišćenjem dodatnog integrisanog kola i softverski, gde je algoritam implementiran u okviru samog mikrokontrolera oko koga je realizovan autonomni senzor. Vreme izvršavanja samog algoritma, potrošnja energije i potrebni memorijski resursi se razlikuju u zavisnosti od radne frekvencije mikrokontrolera. Dobijeni podaci se mogu iskoristiti radi optimalne implemetacije enkripcionog algoritma u zavisnosti od performansi autonomnog senzora.

Dalji rad će biti usmeren ka svim prikazanim delovima disertacije. U okviru saobraćajnih sistema će biti razvijan autonomni senzor za detekciju poledice na kolovozu. Kada je reč o prenosu podataka biće analizirana mogućnost primene TEEN protokola u okviru multi-senzorskih uređaja. Biće analizirano punjenje superkondenzatora i baterija dodatnim integrisanim kolima. Na nivou zaštete podataka plan je implementacija različitih enkripcionih algoritama sa ciljem pronalaska optimalnog rešenja.

Dodatak A

Izračunavanje magnetnog polja višeslojnog cilindričnog kalema

Diferencijalno mala vrednost magnetnog polja po aksijalnoj osi jednoslojnog cilindričnog vazdušnog kalema, u odnosu na njegov centar može se predstaviti kao [65]:

$$dB(z) = \frac{\mu_0 d(NI)}{2l} \left(\frac{\frac{l}{2} - z}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{l}{2} - z\right)^2}} + \frac{\frac{l}{2} + z}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{l}{2} + z\right)^2}} \right). \quad (\text{A.1})$$

Diferencijalni priraštaj indukcije je:

$$d(NI) = \frac{NI}{(r_2 - r_1)} dr, \quad (\text{A.2})$$

pa se zamenom u izraz (A.1) dobija:

$$dB(z) = \frac{\mu_0 NI}{2l(r_2 - r_1)} \left(\frac{\frac{l}{2} - z}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{l}{2} - z\right)^2}} + \frac{\frac{l}{2} + z}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{l}{2} + z\right)^2}} \right) dr. \quad (\text{A.3})$$

Ukupna vrednosti magnetnog polja višeslojnog cilindričnog vazdušnog kalema po aksijalnoj osi dobija se integracijom izraza (A.3), pri čemu su granice integracije od r_1 do r_2 :

$$B(z) = \frac{\mu_0 NI}{2l(r_2 - r_1)} \int_{r_1}^{r_2} \left(\frac{\frac{l}{2} - z}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{l}{2} - z\right)^2}} + \frac{\frac{l}{2} + z}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{l}{2} + z\right)^2}} \right) dr. \quad (\text{A.4})$$

Prvi korak u rešavanju određenog integrala je njegovo razdvajanje na dva dela:

$$B(z) = \frac{\mu_0 N I}{2l(r_2 - r_1)} \left[\int_{r_1}^{r_2} \frac{\frac{l}{2} - z}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{l}{2} - z\right)^2}} dr + \int_{r_1}^{r_2} \frac{\frac{l}{2} + z}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{l}{2} + z\right)^2}} dr \right]. \quad (\text{A.5})$$

S obzirom da su oba integrala u izrazu (A.5) istog oblika u nastavku će biti prikazan postupak rešavanja jednog od njih. Prvi korak u rešavanju je izvlačenje konstanti ispred integrala, pa se tako dobija:

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{\frac{l}{2} - z}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{l}{2} - z\right)^2}} dr = \left(\frac{l}{2} - z\right) \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{l}{2} - z\right)^2}} dr, \quad (\text{A.6})$$

što se svodi na rešavanje integrala oblika:

$$I = \int_a^b \frac{1}{\sqrt{x^2 + C^2}} dx, \quad (\text{A.7})$$

pri čemu je C konstanta. Rešavanje ovog integrala počinje uvođenjem smene:

$$u = \frac{x}{C},$$

a njenim diferenciranjem se dobija:

$$du = \frac{1}{C} dx,$$

odnosno:

$$dx = C du,$$

pa se zamenom u (A.7) dobija:

$$I = \int_a^b \frac{1}{\sqrt{C^2 u^2 + C^2}} C du. \quad (\text{A.8})$$

Sređivanjem izraza (A.8) dobija se:

$$I = \int_a^b \frac{1}{\sqrt{C^2(u^2 + 1)}} C du = \int_a^b \frac{1}{C\sqrt{u^2 + 1}} C du = \int_a^b \frac{1}{\sqrt{u^2 + 1}} du. \quad (\text{A.9})$$

Dalje izračunavanje vrši se uvođenjem još jedne smene:

$$u = \tan v,$$

čijim diferenciranjem se dobija:

$$du = \frac{d}{dv} \tan v = \frac{d}{dv} \left(\frac{\sin v}{\cos v} \right),$$

$$du = \frac{\sin' v \cos v - \sin v \cos' v}{\cos^2 v} dv = \frac{\cos v \cos v - \sin v (-\sin v)}{\cos^2 v} dv$$

$$du = \frac{\cos^2 v + \sin^2 v}{\cos^2 v} dv = \frac{1}{\cos^2 v} dv.$$

Zamenom u izraz (A.9) integral postaje:

$$I = \int_a^b \frac{1}{\sqrt{\tan^2 v + 1}} \frac{1}{\cos^2 v} dv. \quad (\text{A.10})$$

Koristeći jednakost:

$$\tan^2 v + 1 = \frac{\sin^2 v}{\cos^2 v} + \frac{\cos^2 v}{\cos^2 v} = \frac{1 - \cos^2 v}{\cos^2 v} + \frac{\cos^2 v}{\cos^2 v} = \frac{1 - \cos^2 v + \cos^2 v}{\cos^2 v} = \frac{1}{\cos^2 v},$$

odnosno:

$$\sqrt{\tan^2 v + 1} = \frac{1}{\cos v},$$

izraz (A.10) se dodatno pojednostavljuje:

$$I = \int_a^b \frac{1}{\frac{1}{\cos v}} \frac{1}{\cos^2 v} dv = \int_a^b \cos v \frac{1}{\cos^2 v} dv = \int_a^b \frac{1}{\cos v} dv. \quad (\text{A.11})$$

Proširivanjem izraza (A.11) sa:

$$\frac{\frac{1}{\cos v} + \tan v}{\frac{1}{\cos v} + \tan v},$$

dobija se:

$$I = \int_a^b \frac{1}{\cos v} \frac{\frac{1}{\cos v} + \tan v}{\frac{1}{\cos v} + \tan v} dv = \int_a^b \frac{\frac{1}{\cos^2 v} + \frac{1}{\cos v} \tan v}{\frac{1}{\cos v} + \tan v} dv. \quad (\text{A.12})$$

Uvođenjem nove smene:

$$\frac{1}{\cos v} + \tan v = w,$$

i njenim diferenciranjem dobija se:

$$\frac{d}{dv} \left(\frac{1}{\cos v} + \tan v \right) = dw,$$

$$\frac{d}{dv} \left(\frac{1}{\cos v} \right) + \frac{d}{dv} (\tan v) = dw.$$

Diferencijal prvog člana u prethodnoj jednačini je:

$$\frac{d}{dv} \left(\frac{1}{\cos v} \right) = \frac{1' \cos v - 1(-\sin v)}{\cos^2 v} dv = \frac{\sin v}{\cos^2 v},$$

dok je vrednost diferencijala drugog člana ranije izračunata i iznosi:

$$\frac{1}{\cos^2 v} dv,$$

pa se dobija:

$$\left(\frac{\sin v}{\cos^2 v} + \frac{1}{\cos^2 v} \right) dv = \left(\frac{1}{\cos v} \tan v + \frac{1}{\cos^2 v} \right) dv = dw,$$

odnosno:

$$dv = \frac{1}{\left(\frac{1}{\cos v} \tan v + \frac{1}{\cos^2 v} \right)} dw.$$

Zamenom u jednačinu (A.12) dobija se:

$$I = \int_a^b \frac{\left(\frac{1}{\cos^2 v} + \frac{1}{\cos v} \tan v \right)}{w} \frac{1}{\left(\frac{1}{\cos v} \tan v + \frac{1}{\cos^2 v} \right)} dw, \quad (\text{A.13})$$

što se svodi na tablični integral:

$$I = \int_a^b \frac{1}{w} dw. \quad (\text{A.14})$$

Rešenje integrala u izrazu (A.14) je:

$$I = \ln w \Big|_a^b. \quad (\text{A.15})$$

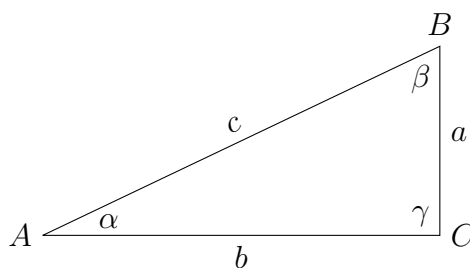
Sada je potrebno u izraz (A.15) vratiti prvobitne promenljive kako bi se dobila vrednost izraza u zavisnosti od promenljive x . Najpre se menja promenljiva w , čime se dobija:

$$I = \ln \left(\frac{1}{\cos v} + \tan v \right) \Big|_a^b. \quad (\text{A.16})$$

Kako je prethodna smena bila $u = \tan v$, odakle je $v = \arctan u$, pa izraz (A.16) postaje:

$$I = \ln \left(\frac{1}{\cos(\arctan u)} + \tan(\arctan u) \right) \Big|_a^b. \quad (\text{A.17})$$

Sada treba pronaći način za izračunavanje vrednosti $\cos(\arctan u)$. Korišćenjem relacija koje važe za pravougli trougao:



$$\tan \alpha = \frac{a}{b},$$

pri čemu takođe važi:

$$\alpha = \arctan u,$$

pa je:

$$\tan \alpha = \tan(\arctan u) = u,$$

odakle se dobija:

$$\frac{a}{b} = \frac{u}{1} \Rightarrow a = u, b = 1.$$

Koristeći Pitagorinu teoremu dobija se:

$$c^2 = a^2 + b^2 = u^2 + 1 \Rightarrow c = \sqrt{u^2 + 1},$$

pa se može napisati:

$$\cos \gamma = \cos(\arctan(u)) = \frac{b}{c} = \frac{1}{\sqrt{u^2 + 1}}.$$

Zamenom poslednjeg izraza u (A.17) dobija se:

$$I = \ln \left(\frac{1}{\frac{1}{\sqrt{u^2 + 1}}} + u \right) \Bigg|_a^b = \ln \left(\sqrt{u^2 + 1} + u \right) \Bigg|_a^b. \quad (\text{A.18})$$

Na kraju, vraćanjem vrednosti koje su zamenjene prvom smenom dobija se:

$$I = \ln \left(\sqrt{1 + \frac{x^2}{C^2}} + \frac{x}{C} \right) \Bigg|_a^b = \ln \left(\sqrt{1 + \frac{b^2}{C^2}} + \frac{b}{C} \right) - \ln \left(\sqrt{1 + \frac{a^2}{C^2}} + \frac{a}{C} \right),$$

što se dalje može pojednostaviti tako da se dobija:

$$I = \ln \left(\frac{\sqrt{1 + \frac{b^2}{C^2}} + \frac{b}{C}}{\sqrt{1 + \frac{a^2}{C^2}} + \frac{a}{C}} \right) = \ln \left(\frac{\frac{1}{C} (\sqrt{C^2 + b^2} + b)}{\frac{1}{C} (\sqrt{C^2 + a^2} + a)} \right) = \ln \left(\frac{\sqrt{b^2 + C^2} + b}{\sqrt{a^2 + C^2} + a} \right). \quad (\text{A.19})$$

Korišćenjem izraza (A.19), izraz (A.6) postaje:

$$\left(\frac{l}{2} - z\right) \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{l}{2} - z\right)^2}} dr = \left(\frac{l}{2} - z\right) \ln \left(\frac{r_2 + \sqrt{r_2^2 + \left(\frac{l}{2} - z\right)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{l}{2} - z\right)^2}} \right). \quad (\text{A.20})$$

Ponavljanjem istog postupka na drugi deo izraza (A.5) dobija se:

$$\left(\frac{l}{2} + z\right) \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{l}{2} + z\right)^2}} dr = \left(\frac{l}{2} + z\right) \ln \left(\frac{r_2 + \sqrt{r_2^2 + \left(\frac{l}{2} + z\right)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{l}{2} + z\right)^2}} \right), \quad (\text{A.21})$$

a konačni oblik izraza koji opisuje jačinu magnetnog polja višeslojnog cilindričnog vazdušnog kalema je:

$$B(z) = \frac{\mu_0 N I}{2l(r_2 - r_1)} \left[\left(\frac{l}{2} - z\right) \ln \frac{r_2 + \sqrt{r_2^2 + \left(\frac{l}{2} - z\right)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{l}{2} - z\right)^2}} + \left(\frac{l}{2} + z\right) \ln \frac{r_2 + \sqrt{r_2^2 + \left(\frac{l}{2} + z\right)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{l}{2} + z\right)^2}} \right]. \quad (\text{A.22})$$

Dodatak B

Određivanje struje kalema korišćenjem diferencijalnih jednačina

Električno kolo generatora magnetnog polja, predstavljeno na slici 30, može se opisati diferencijalnim jednačinama. Pri tome je potrebno napisati jednačinu kojom se opisuje zavisnost struje kalema od vrednosti kapacitivnosti kondenzatora. Napon na kondenzatoru C_1 jednak je zbiru napona na kalemu i kondenzatoru C_2 , što se može napisati kao

$$\frac{i_3}{C_1 D} = L D i_L + \frac{i_4}{C_2 D}, \quad (\text{B.1})$$

pri čemu je $D = \frac{d}{dt}$, prvi izvod po vremenu. Vrednosti struja i_3 i i_4 se mogu dobiti iz jednačina kojima se opisuje napon na generatorima

$$V_n = R_1(i_L + i_3) + \frac{i_3}{C_1 D}, \quad (\text{B.2})$$

$$V_p = -R_2(i_L - i_4) + \frac{i_4}{C_2 D}. \quad (\text{B.3})$$

Iz jednačina (B.2) i (B.3) dobija se

$$i_3 = \frac{V_n - R_1 i_L}{R_1 + \frac{1}{C_1 D}}, \quad (\text{B.4})$$

$$i_4 = \frac{V_p + R_2 i_L}{R_2 + \frac{1}{C_2 D}}. \quad (\text{B.5})$$

Ubacivanjem (B.4) i (B.5) u jednačinu (B.1) dobija se

$$\frac{V_n - R_1 i_L}{R_1 + \frac{1}{C_1 D}} \cdot \frac{1}{C_1 D} = L D i_L + \frac{V_p + R_2 i_L}{R_2 + \frac{1}{C_2 D}} \cdot \frac{1}{C_2 D}. \quad (\text{B.6})$$

Nakon izvršavanja označene operacije množenja na levoj i desnoj strani jednačine, i prebacivanja činilaca koji sadrže i_L sa jedne strane jednakosti, dobija se

$$LDi_L + \frac{R_1 i_L}{R_1 C_1 D + 1} + \frac{R_2 i_L}{R_2 C_2 D + 1} = \frac{V_n}{R_1 C_1 D + 1} - \frac{V_p}{R_2 C_2 D + 1}. \quad (\text{B.7})$$

Daljim sređivanjem izraza (B.7) se dobija

$$LR_1 R_2 C_1 C_2 i_L D^3 + L(R_1 C_1 + R_2 C_2) i_L D^2 + (L + R_1 R_2 (C_1 + C_2)) i_L D + (R_1 + R_2) i_L = R_2 C_2 V_n D + R_1 C_1 V_p D + V_n - V_p, \quad (\text{B.8})$$

odnosno,

$$LR_1 R_2 C_1 C_2 \frac{d^3 i_L}{dt^3} + L(R_1 C_1 + R_2 C_2) \frac{d^2 i_L}{dt^2} + (L + R_1 R_2 (C_1 + C_2)) \frac{di_L}{dt} + (R_1 + R_2) i_L = R_2 C_2 \frac{dV_n}{dt} + R_1 C_1 \frac{dV_p}{dt} + V_n - V_p. \quad (\text{B.9})$$

Dodatak C

Određivanje struje kalema metodom superpozicije

Primena metoda superpozicije za određivanje struje koja protiče kroz kalem, u električnom kolu sa slike 30, zasniva se na izračunavanju zbira struja kalema koje protiču kroz njega kada je aktivan svaki generator ponaosob. Kako u prikazanom kolu postoje dva naponska generatora ukupna struja kroz kalem se dobija kao zbir struje i'_L i i''_L . Struja i'_L protiče kroz kalem kada je generator V_n aktivan, a generator V_p zamenjen kratkim spojem, a struja i''_L kada je generator V_p aktivan, V_n zamenjen kratkim spojem. Struja i'_L može se izračunati preko strujnog razdelnika kao

$$i'_L = i_1 \frac{X_{C_1}}{X_{C_1} + X_L + R_2 \parallel X_{C_2}}, \quad (\text{C.1})$$

pri čemu je

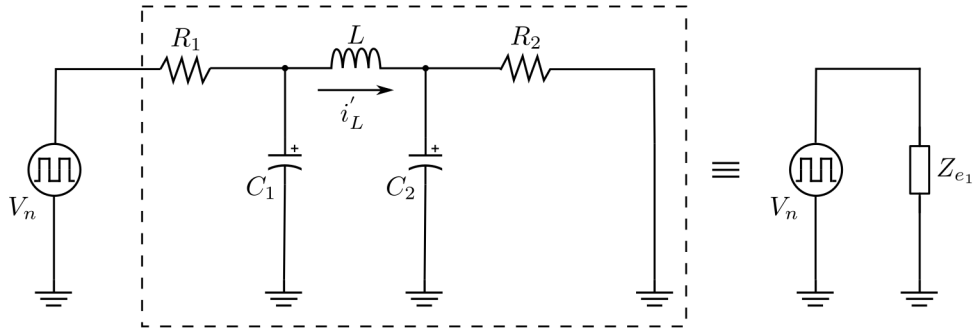
$$i_1 = \frac{V_n}{X_{e_1}}. \quad (\text{C.2})$$

U prikazanim jednačinama $X_{C_1} = \frac{1}{j\omega C_1}$ predstavlja impedansu kondenzatora C_1 , a $X_{C_2} = \frac{1}{j\omega C_2}$ impedansu kondenzatora C_2 . $X_L = j\omega L$ je impedansa kalema L , a X_{e_1} je ekvivalentna otpornost kola priključenog na generator V_n , kada je generator V_p zamenjen kratkim spojem (slika 116), koja je jednaka

$$X_{e_1} = (R_2 \parallel X_{C_2} \oplus X_L) \parallel X_{C_1} \oplus R_1.$$

Impedansa paralelne veze otpornika R_2 i kondenzatora C_2 je

$$R_2 \parallel X_{C_2} = \frac{R_2 \cdot \frac{1}{j\omega C_2}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} = \frac{\frac{R_2}{j\omega C_2}}{\frac{R_2 j\omega C_2 + 1}{j\omega C_2}} = \frac{R_2}{R_2 j\omega C_2 + 1}.$$



Slika 116: Električna šema generatora negativnih promena magnetnog polja.

Kada se na ovu impedansu redno poveže kalem dobija se impedansa

$$R_2 \parallel X_{C_2} \oplus X_L = \frac{R_2}{R_2 j\omega C_2 + 1} + j\omega L,$$

na koju je paralelno povezan kondenzator C_1 . Iz toga se dobija

$$(R_2 \parallel X_{C_2} \oplus X_L) \parallel X_{C_1} = \frac{\left(\frac{R_2}{R_2 j\omega C_2 + 1} + j\omega L \right) \frac{1}{j\omega C_1}}{\frac{R_2}{R_2 j\omega C_2 + 1} + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_1}}.$$

Na kraju, dodavanjem otpornosti otpornika R_1 koji je povezan redno sa ostatkom kola dobija se vrednosti ekvivalentne impedanse X_{e1} , odnosno

$$(R_2 \parallel X_{C_2} \oplus X_L) \parallel X_{C_1} \oplus R_1 = \frac{\left(\frac{R_2}{R_2 j\omega C_2 + 1} + j\omega L \right) \frac{1}{j\omega C_1}}{\frac{R_2}{R_2 j\omega C_2 + 1} + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_1}} + R_1. \quad (C.3)$$

Zamenom izraza sa desne strane jednakosti iz jednačine (C.3) u jednačinu (C.2), a zatim ubacivanjem dobijene vrednosti struje i'_L u jednačinu (C.1) dobija se

$$i'_L = \frac{V_n}{\frac{\left(\frac{R_2}{R_2 j\omega C_2 + 1} + j\omega L \right) \frac{1}{j\omega C_1}}{\frac{R_2}{R_2 j\omega C_2 + 1} + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_1}} + R_1} \cdot \frac{\frac{1}{j\omega C_1}}{\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{R_2}{R_2 j\omega C_2 + 1} + j\omega L} \quad (C.4)$$

Struja i''_L se na istin način može izračunati kao

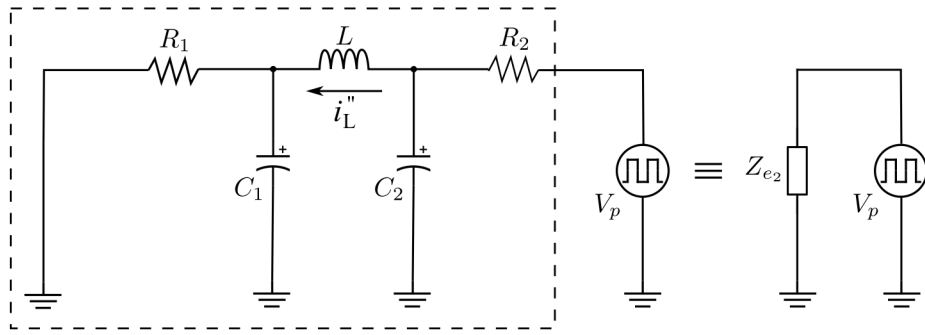
$$i_L'' = i_2 \frac{X_{C_2}}{X_{C_2} + X_L + R_1 \parallel X_{C_1}}, \quad (\text{C.5})$$

pri čemu je

$$i_2 = \frac{V_p}{X_{e_2}}. \quad (\text{C.6})$$

Ekvivalentna otpornost kola priključenog na generator V_p , kada je generator V_n zamenjen kratkim spojem (slika 117), jednaka je

$$X_{e_2} = (R_1 \parallel X_{C_1} \oplus X_L) \parallel X_{C_2} \oplus R_2.$$



Slika 117: Električna šema generatora pozitivnih promena magnetnog polja.

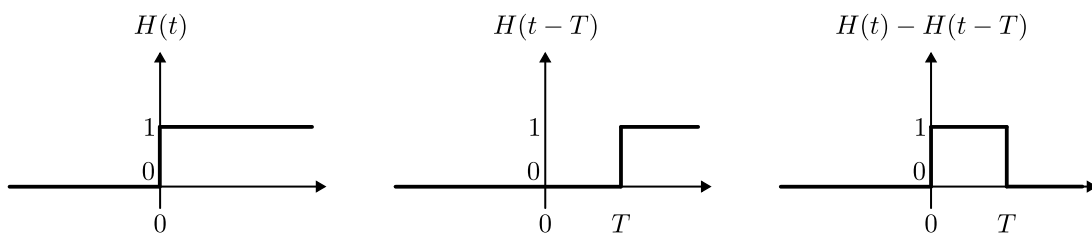
Izračunavanjem ove impedanse istim postupkom kao što je izračunata vrednost X_{e_1} i zamenom u jednačinu (C.6), koja se zatim ubacuje u jednačinu (C.5) dobija se da je vrednost struje i_L'' jednaka

$$i_L'' = \frac{V_p}{\left(\frac{R_1}{R_1 j\omega C_1 + 1} + j\omega L \right) \frac{1}{j\omega C_2} + R_2} \cdot \frac{\frac{1}{j\omega C_2}}{\frac{1}{j\omega C_2} + \frac{R_1}{R_1 j\omega C_1 + 1} + j\omega L}. \quad (\text{C.7})$$

Sabiranjem jednačina (C.4) i (C.7) dobija se ukupna struja koja protiče kroz kalem u slučaju da su V_n i V_p generatori konstantnog jednosmernog napona

$$i_L = \frac{V_n}{\left(\frac{R_2}{R_2 j\omega C_2 + 1} + j\omega L \right) \frac{1}{j\omega C_1} + R_1} \cdot \frac{\frac{1}{j\omega C_1}}{\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{R_2}{R_2 j\omega C_2 + 1} + j\omega L} + \frac{V_p}{\left(\frac{R_1}{R_1 j\omega C_1 + 1} + j\omega L \right) \frac{1}{j\omega C_2} + R_2} \cdot \frac{\frac{1}{j\omega C_2}}{\frac{1}{j\omega C_2} + \frac{R_1}{R_1 j\omega C_1 + 1} + j\omega L}. \quad (\text{C.8})$$

Impulsi koje zapravo generišu V_n i V_p mogu se posmatrati kao razlika Hevisajdove funkcije $H(t)$ i Hevisajdove funkcije koja ima vremensko kašnjenje jednako periodu impulsa koji se generiše $H(t - T)$, kao što je prikazano na slici 118.



Slika 118: Impuls perioda T predstavljen preko razlike Hevisajdovih funkcija.

Radi jednostavnijeg opisivanja struje kroz kalem pri impulsnoj pobudi iskorišćena je Laplasova transformacija, koja se definiše kao

$$L\{f(t)\} = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st}dt. \quad (\text{C.9})$$

Razlika navedenih Hevisajdovih funkcija se može napisati kao Hevisajdova funkcija na intervalu od 0 do T , pa je njena Laplasova transformacija

$$L\{H(t)\} = \int_0^T H(t)e^{-st}dt = \int_0^T e^{-st}dt. \quad (\text{C.10})$$

Izračunavanje ovog izraza vrši se uvođenjem smene

$$-st = x,$$

čijim diferenciranjem se dobija

$$-sdt = dx, dt = -\frac{1}{s}dx$$

pri čemu se granice integracije menjaju i postaju $x_1 = 0$ i $x_2 = -sT$, pa jednačina (C.10) postaje

$$L\{H(t)\} = \int_0^{-sT} -e^x \frac{1}{s} dx = -\frac{1}{s} \int_0^{-sT} e^x dx = -\frac{1}{s}(e^{-sT} - e^0) = \frac{1}{s} - \frac{e^{-sT}}{s}. \quad (C.11)$$

Na osnovu dobijenog izraza se može napisati da je Laplasova transformacija struje kalema koja se generiše po jednim impulsom generatora V_n i V_p

$$i_L = \frac{V_n \left(\frac{1}{s} - \frac{e^{-sT}}{s} \right)}{\left(\frac{R_2}{R_2 j\omega C_2 + 1} + sL \right) \frac{1}{sC_1} + R_1} \cdot \frac{\frac{1}{sC_1}}{\frac{1}{sC_1} + \frac{R_2}{R_2 sC_2 + 1} + sL} + \frac{V_p \left(\frac{1}{s} - \frac{e^{-sT}}{s} \right)}{\left(\frac{R_1}{R_1 sC_1 + 1} + sL \right) \frac{1}{sC_2} + R_2} \cdot \frac{\frac{1}{sC_2}}{\frac{1}{sC_2} + \frac{R_1}{R_1 sC_1 + 1} + sL} \quad (C.12)$$

Kako ukupna struja kroz kalem nastaje pod uticajem 100 naponskih impulsa generatora V_n i V_p , njena vrednost se može predstaviti kao zbir struja nastalih pojedinačnim impulsima, odnosno

$$\begin{aligned}
 i_L = & \sum_{n=0}^{99} \frac{V_n \left(\frac{e^{-snT}}{s} - \frac{e^{-s(nT + t_n[n])}}{s} \right)}{\left(\frac{R_2}{R_2 j\omega C_2 + 1} + sL \right) \frac{1}{sC_1} + R_1} \cdot \frac{\frac{1}{sC_1}}{\frac{1}{sC_1} + \frac{R_2}{R_2 sC_2 + 1} + sL} + \\
 & \sum_{n=0}^{99} \frac{V_p \left(\frac{e^{-snT}}{s} - \frac{e^{-s(nT + t_p[n])}}{s} \right)}{\left(\frac{R_1}{R_1 sC_1 + 1} + sL \right) \frac{1}{sC_2} + R_2} \cdot \frac{\frac{1}{sC_2}}{\frac{1}{sC_2} + \frac{R_1}{R_1 sC_1 + 1} + sL}. \quad (C.13)
 \end{aligned}$$

Literatura

- [1] M. Ferreira, *How Smart Is Your City?: Technological Innovation, Ethics and Inclusiveness*, Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering, Springer International Publishing, 2020, ISBN: 9783030569266, DOI: 10.1007/978-3-030-56926-6.
- [2] Z. Allam, *The Rise of Autonomous Smart Cities: Technology, Economic Performance and Climate Resilience*, Dec. 2020, ISBN: 978-3-030-59447-3, DOI: 10.1007/978-3-030-59448-0.
- [3] B. Norman, Are autonomous cities our urban future?, *Nature Communications* 9 (2018), DOI: 10.1038/s41467-018-04505-0.
- [4] A.-V. Anttiroiko, P. Valkama, S. Bailey, Smart Cities in the New Service Economy: Building Platforms for Smart Services, *AI and Society* 29 (Nov. 2014), 323–334, DOI: 10.1007/s00146-013-0464-0.
- [5] C. S. Lai, L. L. Lai, Q. H. Lai, *Smart Energy for Transportation and Health in a Smart City*, IEEE Press Series on Power and Energy Systems, Willey, Nov. 2022, ISBN: 9781119790334, DOI: 10.1002/9781119790402.
- [6] B. Chowdhry, F. Shaikh, N. Mahoto, *IoT Architectures, Models, and Platforms for Smart City Applications*, Advances in computer and electrical engineering (ACEE) book series, IGI Global, 2019, ISBN: 9781799812531.
- [7] L. Gaur, V. Agarwal, P. Chatterjee, *Decision Support Systems for Smart City Applications*, Concise Introductions to AI and Data Science, Dec. 2022, ISBN: 9781119896432, DOI: 10.1002/9781119896951.
- [8] *CO2 Emissions from fuel combustion 2020 edition*, Database documentation, International Energy Agency, 2020.
- [9] V. Piuri et al., *AI and IoT for Smart City Applications*, Sept. 2021, ISBN: 978-981-16-7498-3, DOI: 10.1007/978-981-16-7498-3.
- [10] V. Basetti et al., *Artificial Intelligence and Machine Learning in Smart City Planning*, Elsevier Science, 2023, ISBN: 9780323995047.

- [11] A. Paul et al., *Intelligent Vehicular Networks and Communications: Fundamentals, Architectures and Solutions*, Elsevier Science, 2016, ISBN: 9780128095461.
- [12] C. Benevolo, R. P. Dameri, B. D'Auria, Smart Mobility in Smart City, *Empowering Organizations*, Springer International Publishing, 2016, 13–28, ISBN: 978-3-319-23784-8.
- [13] Y. Fangchun et al., An Overview of Internet of Vehicles, *Communications, China* 11 (Oct. 2014), 1–15, DOI: 10.1109/CC.2014.6969789.
- [14] *Is Smart Transportation the Future of Transportation?*, URL: <https://www.terionn.com/is-smart-transportation-the-future-of-transportation/>.
- [15] Z. Xiong et al., Intelligent transportation systems for smart cities: A progress review, *Science China Information Sciences* 55.12 (2012), DOI: 10.1007/s11432-012-4725-1.
- [16] H. Makino, *Intelligent Transport Systems (ITS)*, Introduction Guide, Japan Society of Civil Engineers, The Asian Civil Engineering Coordinating Council, 2016.
- [17] K. Iqbal et al., Intelligent Transportation System (ITS) for Smart-Cities using Mamdani Fuzzy Inference System, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications* 9.2 (2018), DOI: 10.14569/IJACSA.2018.090215.
- [18] M. Grote et al., Including congestion effects in urban road traffic CO2 emissions modelling: Do Local Government Authorities have the right options?, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 43 (2016), 95–106, ISSN: 1361-9209, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.12.010>.
- [19] L. Gaur, V. Agarwal, P. Chatterjee, *Intelligent Decision Support Systems for Smart City Applications*, Concise Introductions to AI and Data Science, Wiley, 2023, ISBN: 9781119896432, URL: <https://books.google.rs/books?id=2augEAAAQBAJ>.
- [20] M. Takruri et al., Design and Implementation of a Real-Time Street Light Dimming System Based on a Hybrid Control Architecture, *International Journal of Distributed Sensor Networks* 2023.1 (2023), 6641563, DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/6641563>.
- [21] S. Tamane, N. Dey, A. Hassanien, *Security and Privacy Applications for Smart City Development*, Studies in Systems, Decision and Control, Springer International Publishing, 2020, ISBN: 9783030531492, URL: <https://books.google.rs/books?id=i5EAEAAAQBAJ>.

- [22] A. Chakraborty et al., Smart Home System: A Comprehensive Review, *Journal of Electrical and Computer Engineering* 2023.1 (2023), 7616683, DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/7616683>.
- [23] U. Singh, M. A. Ansari, Smart Home Automation System Using Internet of Things, *2019 2nd International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC)*, 2019, 144–149, DOI: 10.1109/PEEIC47157.2019.8976842.
- [24] E. Hozdic, Smart factory for industry 4.0: A review, *Journal of Modern Manufacturing Systems and Technology* 7 (Jan. 2015), 28–35.
- [25] *What is Smart Factory? The Impact of Factory 4.0*, URL: <https://avsystem.com/blog/iot/smart-factory>.
- [26] S. Phuyal, D. Bista, R. Bista, Challenges, Opportunities and Future Directions of Smart Manufacturing: A State of Art Review, *Sustainable Futures* 2 (2020), 100023, ISSN: 2666-1888, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2020.100023>.
- [27] A. Kathirvel et al., Manufacturing Smart Industry Perspective an Overview, *American Journal of Engineering and Applied Sciences* 17.1 (2024), 33–39, DOI: 10.3844/ajeassp.2024.33.39.
- [28] J. G. Bayo, International Case Studies of Smart Cities: Santander, Spain, 2016, URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:133065910>.
- [29] C. Schreiner, International Case Studies of Smart Cities: Rio de Janeiro, Brazil, 2016, URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:132952980>.
- [30] *Top 7 Smart Cities in the World in 2024*, URL: <https://earth.org/top-7-smart-cities-in-the-world/>.
- [31] M. Di Paolo Emilio, *Microelectronic Circuit Design for Energy Harvesting Systems*, Springer International Publishing, 2016, ISBN: 9783319475875, URL: <https://books.google.rs/books?id=-g6kDQAAQBAJ>.
- [32] Y. Tan, *Energy Harvesting Autonomous Sensor Systems: Design, Analysis, and Practical Implementation*, CRC Press, 2017, ISBN: 9781439894354, URL: <https://books.google.rs/books?id=IGPNBQAAQBAJ>.
- [33] S. Elhadi, A. Marzak, N. Sael, Operating models of Network protocols IoT: Short-range protocols, *2020 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT)*, 2020, 1–6, DOI: 10.1109/ISAECT50560.2020.9523646.

- [34] D. Bujari, E. Aribas, Encryption Issues in Traffic Control Systems in Smart Cities and Traffic Signal Control Optimization, *Innovations in Smart Cities Applications Volume 4*, Springer International Publishing, 2021, 410–422, ISBN: 978-3-030-66840-2.
- [35] A. Pell, A. Meingast, O. Schauer, Trends in Real-time Traffic Simulation, *Transportation Research Procedia* 25 (2017), 1477–1484, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.175>.
- [36] N. N. Nor Azlan, M. Md Rohani, Overview Of Application Of Traffic Simulation Model, *MATEC Web of Conferences* 150 (2018), 03006, DOI: [10.1051/mateconf/201815003006](https://doi.org/10.1051/mateconf/201815003006).
- [37] P. Jaworski et al., Microscopic traffic simulation tool for Intelligent Transportation Systems, Sept. 2012, 552–557, DOI: [10.1109/ITSC.2012.6338659](https://doi.org/10.1109/ITSC.2012.6338659).
- [38] C.-S. Wang, D.-y. Liu, K.-S. Hsu, Simulation and application of cooperative driving sense systems using prescan software, *Microsystem Technologies* 27 (2021), DOI: [10.1007/s00542-018-4164-z](https://doi.org/10.1007/s00542-018-4164-z).
- [39] D. Dissanayake et al., Real-time dynamic traffic light timing adaptation algorithm and simulation software, 2009, 563–567, DOI: [10.1109/ICIINFS.2009.5429797](https://doi.org/10.1109/ICIINFS.2009.5429797).
- [40] M. E. Hmidi, I. B. Salem, L. E. Amraoui, An efficient method for energy management optimization control: Minimizing fuel consumption for hybrid vehicle applications, *Transactions of the Institute of Measurement and Control* 42.1 (2020), 69–80, DOI: [10.1177/0142331219874152](https://doi.org/10.1177/0142331219874152).
- [41] G. Budan et al., An analysis of vehicle-to-infrastructure communications for non-signalised intersection control under mixed driving behaviour, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing* 95 (2018), DOI: [10.1007/s10470-018-1152-2](https://doi.org/10.1007/s10470-018-1152-2).
- [42] A. M. Kadhim, W. Birk, T. Gustafsson, Evaluation of Vehicle Tracking for Traffic Monitoring Based on Road Surface Mounted Magnetic Sensors, *IFAC Proceedings Volumes* 46.29 (2013), 13–18, DOI: <https://doi.org/10.3182/20131111-3-KR-2043.00009>.
- [43] K. Oh et al., Functional perspective-based probabilistic fault detection and diagnostic algorithm for autonomous vehicle using longitudinal kinematic model, *Microsystem Technologies* 24.11 (2018), 4527–4537.
- [44] S. Park et al., Model predictive control-based fault detection and reconstruction algorithm for longitudinal control of autonomous driving vehicle using multi-sliding mode observer, *Microsystem Technologies* 26.1 (2020), 239–264, DOI: [10.1007/s00542-019-04634-6](https://doi.org/10.1007/s00542-019-04634-6).

- [45] J.-H. Park, Y.-W. Tai, A simulation based method for vehicle motion prediction, *Computer Vision and Image Understanding* 136 (2015), 79–91, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2015.03.004>.
- [46] C. Huang, P. Hu, J. Lian, Online optimum velocity calculation under V2X for smart new energy vehicles, *Transactions of the Institute of Measurement and Control* 43.10 (2021), 2368–2377, DOI: 10.1177/0142331221997280.
- [47] O. Haas et al., Urban Traffic Simulators for Intelligent Transportation Systems, *Measurement and Control* 46.10 (2013), 309–314, DOI: 10.1177/0020294013510472.
- [48] G. Kararsiz et al., An adaptive control approach for semi-active suspension systems under unknown road disturbance input using hardware-in-the-loop simulation, *Transactions of the Institute of Measurement and Control* 43.5 (2021), 995–1008, DOI: 10.1177/0142331219895935.
- [49] F. Mocholi Belenguer et al., Vehicle modeling for the analysis of the response of detectors based on inductive loops, *PLOS ONE* 14.9 (Sept. 2019), 1–28, DOI: 10.1371/journal.pone.0218631.
- [50] Y. Sui et al., Simulation of the Magnetic Signature for Ferromagnetic Objects in Motion Using 3D-Printing Data, *IEEE Access* 7 (2019), 61756–61763, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2915674.
- [51] *3-Axis Digital Magnetometer IC, BM1422AGMV*, ROHM Semiconductor, 2016, URL: <https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/ic/sensor/geomagnetic/bm1422agmv-e.pdf>.
- [52] *28/40/44-Pin, Low-Power, High-Performance Microcontrollers with XLP Technology, PIC18(L)F2X/4XK22*, Microchip Technology Inc., 2010-2021, URL: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MCU08/ProductDocuments/DataSheets/PIC18%28L%29F2X-4XK22-Data-Sheet-40001412H.pdf>.
- [53] *Ready for PIC*, MikroElektronika, URL: <https://www.mikroe.com/ready-pic>.
- [54] T. Nakai, A Uniform Magnetic Field Generator Combined with a Thin-Film Magneto-Impedance Sensor Capable of Human Body Scans, 22.9 (2022), DOI: 10.3390/s22093120.
- [55] O. Tretiak, P. Blämler, L. Bougas, Variable single-axis magnetic-field generator using permanent magnets, *AIP Advances* 9 (2019), 115312, DOI: 10.1063/1.5130896.
- [56] M. Park et al., Alternating magnetic field generator for three-dimensional position tracking of medical treatment equipment for training, *Journal of Mechanics in Medicine and Biology* 21 (2021), 2140027, DOI: 10.1142/S0219519421400273.

- [57] M. Stojanović, Induktivnost i jačina magnetnog polja višeslojnih cilindričnih kale-mova, Nov. 2021, 115–118.
- [58] M. Stojanović et al., The practical design of a vehicle magnetic signature generator, *Transactions of the Institute of Measurement and Control* 45.8 (2023), 1505–1514, DOI: 10.1177/01423312221142557.
- [59] C. Wei et al., Magnetic field analysis of solenoid driven by alternating current, *Journal of Physics: Conference Series* 1237 (2019), 032073, DOI: 10.1088/1742-6596/1237/3/032073.
- [60] R. Bowtell, P. Robyr, Multilayer Gradient Coil Design, *Journal of Magnetic Reso-nance* 131.2 (1998), 286–294, DOI: <https://doi.org/10.1006/jmre.1998.1369>.
- [61] S. Datta, Electric and Magnetic Fields from a Circular Coil Using Elliptic Integrals, *Physics Education* (Jan. 2007).
- [62] S. Bambang, S. Rany, Calculation of Magnetic Field of the Multi Layer Solenoid, 2007, 427.
- [63] J. Wang et al., Analysis of the Magnetic Field in the Cavity of Multi-Layer Winding Electromagnetic Water Processor, *IEEE Access* 7 (2019), 2512–2519, DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2886992.
- [64] M. Basharat et al., Design and Analysis of Multilayer Solenoid Coil for Faraday Modulator, *MATEC Web of Conferences* 114 (Jan. 2017), 04004, DOI: 10.1051/mateconf/201711404004.
- [65] R. M. Duffy, R. P. Netterfield, Design of Faraday rotators and modulators, *Review of Scientific Instruments* 55.5 (May 1984), 743–746, ISSN: 0034-6748, DOI: 10.1063/1.1137809.
- [66] B. Davison, *Techniques for Robust Touch Sensing Design*, Microchip Technology Inc., 2010-2013, URL: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/00001334B.pdf>.
- [67] J. Kundrata et al., Comparison of Pearson correlation coefficient and distance corre-lation in Correlation Power Analysis on Digital Multiplier, Oct. 2020, DOI: 10.23919/MIPR048935.2020.9245325.
- [68] T. Chai, R. Draxler, Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?-Arguments against avoiding RMSE in the literature, *Geoscientific Model Development* 7 (June 2014), 1247–1250, DOI: 10.5194/gmd-7-1247-2014.

- [69] M. Stojanović, L. Vračar, Magnetic Signature Generator for Reconstruction of Individual Vehicle Movements and Random Traffic Flow, *International Journal of Circuit Theory and Applications* (2025), prijavljen za objavljivanje, DOI: 10.1002/cta.70213.
- [70] H.-J. Chiu et al., A cost-effective PWM dimming method for LED lighting applications, *International Journal of Circuit Theory and Applications* 43 (July 2013), DOI: 10.1002/cta.1940.
- [71] C.-T. Chi, C.-C. Chao, Development of a new IC-controlled interchangeable AC and DC contactor, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing* 63 (May 2010), 245–253, DOI: 10.1007/s10470-009-9407-6.
- [72] P. Mishra et al., Development of a cost-effective circuit hardware architecture for brushless direct current motor driver, *International Journal of Circuit Theory and Applications* 49 (2021), 2183–2198.
- [73] J.-J. Chen et al., A new fast-response buck converter using accelerated pulse-width-modulation techniques, *International Journal of Circuit Theory and Applications* 41 (2013).
- [74] T. Salvatierra, M. Kazimierczuk, DC analysis and design of a PWM buck converter operated as a dynamic power supply: PWM BUCK CONVERTER AS DYNAMIC POWER SUPPLY, *International Journal of Circuit Theory and Applications* 45 (Oct. 2016), DOI: 10.1002/cta.2270.
- [75] V. Radhika et al., Design of digital pulse width modulator architecture with digital PID controller for DC-DC converter using FPGA, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing* 107 (May 2021), 1–9, DOI: 10.1007/s10470-020-01794-8.
- [76] M. Stojanović et al., Simulation of the Earth's Magnetic Field Distortion Induced by a Vehicle, *2021 IEEE 32nd International Conference on Microelectronics (MIEL)*, 2021, 293–296, DOI: 10.1109/MIEL52794.2021.9569087.
- [77] M. Mohamed, A. Elmahalawy, H. Harb, Developing the pulse width modulation tool (PWMT) for two timer mechanism technique in microcontrollers, *2013 Second International Japan-Egypt Conference on Electronics, Communications and Computers (JEC-ECC)*, Dec. 2013, 148–153, DOI: 10.1109/JEC-ECC.2013.6766403.
- [78] S. Hsiung, The use of PIC microcontrollers in multiple DC motors control applications, *Journal of industrial technology* 23 (July 2007), 1–9.

- [79] M. Stojanović, J. Vračar, L. Vračar, Magnetic Field Generator for Testing the Operation of Vehicle Detection Sensors, *2023 IEEE 33rd International Conference on Microelectronics (MIEL)*, 2023, 1–4, DOI: 10.1109/MIEL58498.2023.10315841.
- [80] M. Bernas et al., A Survey and Comparison of Low-Cost Sensing Technologies for Road Traffic Monitoring, *Sensors* 18.10 (2018), DOI: 10.3390/s18103243.
- [81] L.-E. Y. Mimbela, L. A. Klein, *Summary of Vehicle Detection and Surveillance Technologies used in Intelligent Transportation Systems*, Federal Highway Administration's (FHWA) Intelligent Transportation Systems Program Office, 2007.
- [82] V. Markevicius et al., Vehicle Influence on the Earth's Magnetic Field Changes, *Elektronika ir Elektrotechnika* 20.4 (2014), 43–48, DOI: 10.5755/j01.eee.20.4.4552.
- [83] S. Taghvaeeyan, R. Rajamani, Portable Roadside Sensors for Vehicle Counting, Classification, and Speed Measurement, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 15.1 (2014), 73–83, DOI: 10.1109/TITS.2013.2273876.
- [84] Z. He, H. Zhu, F. Yu, A vehicle detection algorithm based on wireless magnetic sensor networks, *2014 4th IEEE International Conference on Information Science and Technology*, 2014, 727–730, DOI: 10.1109/ICIST.2014.6920580.
- [85] Q. Wang et al., Roadside Magnetic Sensor System for Vehicle Detection in Urban Environments, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 19.5 (2018), 1365–1374, DOI: 10.1109/TITS.2017.2723908.
- [86] B. Yang, Y. Lei, Vehicle Detection and Classification for Low-Speed Congested Traffic With Anisotropic Magnetoresistive Sensor, *IEEE Sensors Journal* 15.2 (2015), 1132–1138, DOI: 10.1109/JSEN.2014.2359014.
- [87] V. Markevicius et al., Dynamic Vehicle Detection via the Use of Magnetic Field Sensors, *Sensors* 16.1 (2016), DOI: 10.3390/s16010078.
- [88] Y. Feng et al., MagMonitor: Vehicle Speed Estimation and Vehicle Classification Through A Magnetic Sensor, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 23.2 (2022), 1311–1322, DOI: 10.1109/TITS.2020.3024652.
- [89] Q. Zhang et al., Detection of vehicle tracks by a three-axis magnetometer, *Sensors and Actuators A: Physical* 276 (2018), 83–90, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.03.016>.
- [90] S. Yalçın, E. Erdem, Implementation of the vehicle recognition systems using wireless magnetic sensors, *Sāadhanā* 42 (Apr. 2017), 1–14, DOI: 10.1007/s12046-017-0638-4.

- [91] J. Lan et al., Vehicle detection and classification by measuring and processing magnetic signal, *Measurement* 44.1 (2011), 174–180, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2010.09.044>.
- [92] C. Xu et al., Vehicle Classification Using an Imbalanced Dataset Based on a Single Magnetic Sensor, *Sensors* 18.6 (2018), DOI: 10.3390/s18061690.
- [93] W. Ma et al., A Wireless Accelerometer-Based Automatic Vehicle Classification Prototype System, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 15.1 (2014), 104–111, DOI: 10.1109/TITS.2013.2273488.
- [94] H. Zhu, F. Yu, A Vehicle Parking Detection Method Based on Correlation of Magnetic Signals, *International Journal of Distributed Sensor Networks* 11.7 (2015), 361242, DOI: 10.1155/2015/361242.
- [95] J. A. Vera-Gómez et al., An Intelligent Parking Management System for Urban Areas, *Sensors* 16.6 (2016), DOI: 10.3390/s16060931.
- [96] P. Sarcevic, S. Pletl, A. Odry, Real-Time Vehicle Classification System Using a Single Magnetometer, *Sensors* 22.23 (2022), DOI: 10.3390/s22239299.
- [97] R. Ma et al., Deep Learning Based Vehicle Detection and Classification Methodology Using Strain Sensors under Bridge Deck, *Sensors* 20.18 (2020), DOI: 10.3390/s20185051.
- [98] H. Zhu, F. Yu, A Cross-Correlation Technique for Vehicle Detections in Wireless Magnetic Sensor Network, *IEEE Sensors Journal* 16.11 (2016), 4484–4494, DOI: 10.1109/JSEN.2016.2523601.
- [99] M. Stojanović, L. Vračar, Vehicle Detector Based on the Magnetic Field Sensor and the Fixed-Threshold Algorithm Implemented via Finite State Machine, *Facta Universitatis, Series: Electronics and Electronics* 38.1 (2025), 19–38, DOI: doi.org/10.2298/FUEE2501019S.
- [100] T. Ndjountche, *Digital Electronics 3: Finite-state Machines*, Oct. 2016, 1–315, ISBN: 9781848219861, DOI: 10.1002/9781119371083.
- [101] S. Bilotta, P. Nesi, Estimating CO2 Emissions from IoT Traffic Flow Sensors and Reconstruction, *Sensors* 22.9 (2022), DOI: 10.3390/s22093382.
- [102] M. Khakifirooz, M. Fathi, CO2 Emission through Road Gradient and Real-Time Traffic Monitoring for Vehicle Routing Problems, *12th International Exergy, Energy and Environment Symposium (IEEEES-12)*, Jan. 2021.

- [103] R. Zhou et al., Study on the Traffic Air Pollution inside and outside a Road Tunnel in Shanghai, China, *PLOS ONE* 9.11 (Nov. 2014), 1–9, DOI: 10.1371/journal.pone.0112195.
- [104] C. Qian et al., Monitoring and analysis of the operational environment in an extra-long highway tunnel with longitudinal ventilation, *Tunnelling and Underground Space Technology* (2019).
- [105] M. L. Kiss et al., Lifecycle Analysis of an Air Quality Sensor, *Acta Polytechnica Hungarica* 21 (Jan. 2024), 67–85.
- [106] L. Y, D. J, Processing missing power data in wireless sensor networks, *Tehnicki vjesnik* 24.4 (Jan. 2017), 1033–1039.
- [107] M. Khan et al., IoT and Wireless Sensor Networking-based Effluent Treatment Plant Monitoring System, *Acta Polytechnica Hungarica* 18 (Nov. 2021), 205–224, DOI: 10.12700/APH.18.10.2021.10.11.
- [108] *Honeywell HumidiconTM Digital Humidity/Temperature Sensors HIH6100 Series*, Datasheet, Honeywell, 2015, URL: <https://prod-edam.honeywell.com/content/dam/honeywell-edam/sps/siot/es-mx/products/sensors/humidity-with-temperature-sensors/honeywell-humidicon-hih6100-series/documents/sps-siot-humidicon-hih6100-series-product-sheet-009059-6-en-ciid-142165.pdf>.
- [109] *High Accuracy, Low Power, Waterproof Barometric Pressure and Temperature Sensor IC*, Datasheet, TDK InvenSense, 2019, URL: https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2018/01/DS-000186-ICP-101xx-v1.2.pdf?ref_disty=digikey..
- [110] *3SP CO 1000*, Datasheet, SPEC SENSORS, 2017, URL: http://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2016/04/3SP_CO_1000-C-Package-110-109.pdf.
- [111] *3SP NO2 5F*, Datasheet, SPEC SENSORS, 2017, URL: https://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2016/10/3SP_NO2_5F-P-Package-110-507.pdf.
- [112] *SPEC SensorTM Operation and Performance Considerations*, Application note, SPEC SENSORS, 2016, URL: <https://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2016/06/SPEC-AN-104-Environmental-Effects.pdf>.
- [113] *LMP91000 Sensor AFE System: Configurable AFE Potentiostat for Low-Power Chemical-Sensing Applications*, Datasheet, Texas Instruments, 2014, URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmp91000.pdf?ts=1746671742432>.

- [114] O. Khutsoane, B. Isong, A. M. Abu-Mahfouz, IoT devices and applications based on LoRa/LoRaWAN, *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2017, 6107–6112, DOI: 10.1109/IECON.2017.8217061.
- [115] A. Lavric, P. Valentin, Performance Evaluation of LoRaWAN Communication Scalability in Large-Scale Wireless Sensor Networks, *Wireless Communications and Mobile Computing* 2018 (June 2018), 1–9, DOI: 10.1155/2018/6730719.
- [116] G. Zhu et al., Design and Implementation of Tunnel Environment Monitoring System Based on LoRa, June 2020, DOI: 10.1007/978-3-030-44751-9_53.
- [117] *AN1200.22, LoRa Modulation Basics*, Application Note, SEMTECH, 2015, URL: <https://semtech.my.salesforce.com>.
- [118] T. Bouguera et al., Energy Consumption Model for Sensor Nodes Based on LoRa and LoRaWAN, *Sensors* 18.7 (2018), DOI: 10.3390/s18072104.
- [119] L. Casals et al., Modeling the Energy Performance of LoRaWAN, *Sensors* 17.10 (2017), DOI: 10.3390/s17102364.
- [120] E. Baumker, A. M. Garcia, P. Woias, Minimizing power consumption of LoRa® and LoRaWAN for low-power wireless sensor nodes, *Journal of Physics: Conference Series* 1407.1 (2019), 012092, DOI: 10.1088/1742-6596/1407/1/012092.
- [121] C. Umamaheswari, R. M.E, R. Sangeetha, Energy Optimization in Wireless Sensor Network Using Sleep Mode Transceiver, *IOSR Journal of Computer Engineering* 16 (Jan. 2014), 45–50, DOI: 10.9790/0661-16154550.
- [122] *RN2483, Low-Power Long Range LoRa® Technology Transceiver Module*, Datasheet, Microchip, 2021, URL: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/OTH/ProductDocuments/DataSheets/RN2483-Low-Power-Long-Range-LoRa-Technology-Transceiver-Module-DS50002346F.pdf>.
- [123] M. Stojanović, L. Vračar, I. N. Dimitriu, Sistem za merenje kvaliteta vazduha sa LoRa radio vezom, *Zbornik radova, 7 naučno-stručni skup Put i životna sredina*, 2023, 62–70, ISBN: 978-86-88541-16-9.
- [124] M. Abbas, N. Otaif, A novel methodology for optimum energy consumption in wireless sensor networks, *Frontiers in Engineering and Built Environment* ahead-of-print (Apr. 2021), DOI: 10.1108/FEBE-02-2021-0011.
- [125] G. Sebestyen, J. Kopjak, Estimating Battery Life in TDMA Mesh-based Wireless Sensor Networks, for Merged Data Collection Method, *Acta Polytechnica Hungarica* 21 (Jan. 2024), 225–244, DOI: 10.12700/APH.21.3.2024.3.15.

- [126] A. Abbasi, Time Critical Threshold Sensitive Protocol For HWSN, *International Journal of Scientific and Technology Research* 10 (June 2021), 248–251.
- [127] R. Bria, A. Wahab, M. Alaydrus, Energy Efficiency Analysis of TEEN Routing Protocol with Isolated Nodes, Oct. 2019, 1–5, DOI: 10.1109/ICIC47613.2019.8985668.
- [128] M. Ali, F. Gared, Energy optimization of wireless sensor network using neuro-fuzzy algorithms, *Ethiopian Journal of Science and Technology* 12 (June 2019), 167, DOI: 10.4314/ejst.v12i2.5.
- [129] *DHT11, DHT22 and AM2302 Sensors*, Datasheet, Adafruit Industries, 2024, URL: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/dht.pdf>.
- [130] *LEON-G1 series, quad-band GSM/GPRS data and voice modules*, System Integration Manual, ublox, 2018, URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/LEON-G1_SysIntegrManual_%28UBX-13004888%29.pdf.
- [131] *MQTT Broker*, URL: <https://www.catchpoint.com/network-admin-guide/mqtt-broker>.
- [132] *MQTT Broker: How It Works, Popular Options, and Quickstart*, URL: <https://www.emqx.com/en/blog/the-ultimate-guide-to-mqtt-broker-comparison>.
- [133] *MQTT V3.1 Protocol Specification*, International Business Machines Corporation (IBM), Eurotech.
- [134] *ThingSpeak for IoT Projects*, URL: <https://thingspeak.mathworks.com>.
- [135] S. Sojan, R. Kulkarni, A Comprehensive Review of Energy Harvesting Techniques and its Potential Applications, *International Journal of Computer Applications* 139 (Apr. 2016), 14–19, DOI: 10.5120/ijca2016909120.
- [136] S. Priya, D. J. Inman, *Energy harvesting technologies*, Springer US, 2009, ISBN: 9780387764634, DOI: 10.1007/978-0-387-76464-1.
- [137] *MCP1640/B/C/D, 0.65V Start-Up Synchronous Boost Regulator with True Output Disconnect or Input/Output Bypass Option*, Microchip Technology Inc., 2010-2015, URL: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20002234D.pdf>.
- [138] M. Stojanović, J. Vračar, L. Vračar, Different Ways to Charging Supercapacitor in WSN Using Solar Cells, Proceedings of papers of the 7th IcETRAN, Niš (Serbia), 2020, 486–489, ISBN: 978-86-7466-852-8.
- [139] Z. Huanan, X. Suping, W. Jiannan, Security and application of wireless sensor network, *Procedia Computer Science* 183 (2021), 486–492, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.02.088>.

- [140] F. Gutiérrez-Portela et al., Security perspective of wireless sensor networks, *Rev. UIS Ing.* 20 (2021), 189–202.
- [141] M. Bhalla, N. Pandey, B. Kumar, Security protocols for wireless sensor networks, Oct. 2015, 1005–1009, DOI: 10.1109/ICGCIoT.2015.7380610.
- [142] J. Sen et al., *Wireless Sensor Networks*, IntechOpen, 2023, ISBN: 978-1-80355-454-9, DOI: 10.5772/intechopen.104033, URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.104033>.
- [143] M. Al-Shabi, A Survey on Symmetric and Asymmetric Cryptography Algorithms in information Security, *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)* 9 (Mar. 2019), 8779, DOI: 10.29322/IJSRP.9.03.2019.p8779.
- [144] M. S. Khan et al., A low-complexity, energy-efficient data securing model for wireless sensor network based on linearly complex voice encryption mechanism of GSM technology, *International Journal of Distributed Sensor Networks* 17.5 (2021), DOI: 10.1177/15501477211018623.
- [145] N. Mahlake et al., A Lightweight Encryption Algorithm to Enhance Wireless Sensor Network Security on the Internet of Things, *Journal of Communications* 18 (Jan. 2023), 47–57, DOI: 10.12720/jcm.18.1.47-57.
- [146] R. Qazi, K. N. Qureshi, Security protocol using elliptic curve cryptography algorithm for wireless sensor networks, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 12 (Jan. 2021), 547–566, DOI: 10.1007/s12652-020-02020-z.
- [147] K. Venkataraman, T. Sadasivam, FPQA implementation of modified Elliptic Curve Digital Signature Algorithm, *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics* 32 (Jan. 2019), 129–145, DOI: 10.2298/FUEE1901129V.
- [148] H. Hayouni, M. Hamdi, T.-H. Kim, A Survey on Encryption Schemes in Wireless Sensor Networks, *2014 7th International Conference on Advanced Software Engineering and Its Applications (ASEA)*, IEEE Computer Society, 2014, 39–43, DOI: 10.1109/ASEA.2014.14.
- [149] M. Dener, Comparison of Encryption Algorithms in Wireless Sensor Networks, *ITM Web Conf.* 22 (2018), 01005, DOI: 10.1051/itmconf/20182201005.
- [150] N. H. Sahar, H. O. Ali, J. Ali, Encryption Symmetric secret Key in Wireless Sensor Network Using AES Algorithm, *Iraqi Journal of Science* 63.11 (Nov. 2022), 5037–5045, DOI: 10.24996/ij.s.2022.63.11.38.

- [151] M. A. Al Sibahee et al., The Best Performance Evaluation of Encryption Algorithms to Reduce Power Consumption in WSN, *2017 International Conference on Computing Intelligence and Information System (CIIS)*, Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, Apr. 2017, 308–312, DOI: 10.1109/CIIS.2017.50.
- [152] I. Dutta, B. Ghosh, M. Bayoumi, Lightweight Cryptography for Internet of Insecure Things: A Survey, *2019 IEEE 9th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, Jan. 2019, 475–481, DOI: 10.1109/CCWC.2019.8666557.
- [153] C.-W. Hung, W.-T. Hsu, Power Consumption and Calculation Requirement Analysis of AES for WSN IoT, *Sensors* 18.6 (2018), DOI: 10.3390/s18061675.
- [154] C. Panait, D. Dragomir, Measuring the performance and energy consumption of AES in wireless sensor networks, *2015 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)* (2015), 1261–1266.
- [155] M.-H. Dao et al., An Energy Efficient AES Encryption Core for Hardware Security Implementation in IoT Systems, *2018 International Conference on Advanced Technologies for Communications*, Oct. 2018, 301–304, DOI: 10.1109/ATC.2018.8587500.
- [156] V. Elamurugu, D. J. Evanjaline, An Efficient and Secure Text Encryption Scheme for Wireless Sensor Network (WSN) Using Dynamic Key Approach, *International Journal of Computer Networks and Applications (IJCNA)* 8.6 (2021), 788–794, DOI: 10.22247/ijcna/2021/210726.
- [157] M. Tropea et al., Security in Wireless Sensor Networks: A Cryptography Performance Analysis at MAC Layer, *Future Internet* 14.5 (2022), DOI: 10.3390/fi14050145.
- [158] Y. Cheng et al., An Asymmetric Encryption-Based Key Distribution Method for Wireless Sensor Networks, *Sensors* 23.14 (2023), DOI: 10.3390/s23146460.
- [159] P. Ramadevi et al., Security for wireless sensor networks using cryptography, *Measurement: Sensors* 29 (2023), 100874, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100874>.
- [160] S. Sinha, S. Aggarwal, Cryptographic Algorithms for Security in Wireless Sensor Networks, *3rd International Conference on Intelligent Engineering and Management (ICIEM)*, 2022, 111–117.
- [161] J. M. Kim et al., Power Adaptive Data Encryption for Energy-Efficient and Secure Communication in Solar-Powered Wireless Sensor Networks, *Journal of Sensors* 2016.1 (2016), 2678269, DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/2678269>.

- [162] S. Urooj et al., Cryptographic Data Security for Reliable Wireless Sensor Network, *Alexandria Engineering Journal* 72 (2023), 37–50, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.03.061>.
- [163] A. B. Karuppiah, D. S. Rajaram, Energy Efficient Encryption Algorithm for Wireless Sensor Network, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY (IJERT)* 01 (2012), 03, DOI: [10.17577/IJERTV1IS3176](https://doi.org/10.17577/IJERTV1IS3176).
- [164] H. Soliman, M. Omari, Application of Synchronous Dynamic Encryption System (SDS) in Wireless Sensor Networks, *International Journal of Network Security* 3 (Jan. 2006), DOI: [10.1145/1089803.1089996](https://doi.org/10.1145/1089803.1089996).
- [165] H. Zhou, H. Bi, Wireless Sensor Network Security Based on Improved Identity Encryption, *Scientific Programming* 2022 (Apr. 2022), 1–10, DOI: [10.1155/2022/2308825](https://doi.org/10.1155/2022/2308825).
- [166] M. S. Jabor et al., New approach to improve power consumption associated with blockchain in WSNs, *PLOS ONE* 18.5 (May 2023), 1–35, DOI: [10.1371/journal.pone.0285924](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285924).
- [167] A. E. Guerrero-Sanchez et al., Blockchain Mechanism and Symmetric Encryption in A Wireless Sensor Network, *Sensors* 20.10 (2020), DOI: [10.3390/s20102798](https://doi.org/10.3390/s20102798).
- [168] P. Santoso et al., Systematic literature review: comparison study of symmetric key and asymmetric key algorithm, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 420 (Oct. 2018), 012111, DOI: [10.1088/1757-899X/420/1/012111](https://doi.org/10.1088/1757-899X/420/1/012111).
- [169] C. Zhang et al., Research on Simple Power Consumption Based on AES Algorithm, *2023 IEEE 2nd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA)* (2023), 1883–1886, DOI: [10.1109/EEBDA56825.2023.10090666](https://doi.org/10.1109/EEBDA56825.2023.10090666).
- [170] E. Selvapriya, L. Suganthi, Design and implementation of low power Advanced Encryption Standard cryptcore utilizing dynamic pipelined asynchronous model, *Integr. VLSI J.* 93.C (Nov. 2023), DOI: [10.1016/j.vlsi.2023.102057](https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2023.102057).
- [171] D. M. et al., *Advanced Encryption Standard (AES)*, Withdrawn NIST Technical Series Publication, Federal Inf. Process. Stds. (NIST FIPS), National Institute of Standards and Technology, 2001.
- [172] J. Daemen, V. Rijmen, The Block Cipher Rijndael, vol. 1820, Jan. 1998, 277–284, DOI: [10.1007/10721064_26](https://doi.org/10.1007/10721064_26).
- [173] *ATECC608A-TNGTLS CryptoAuthenticatio[^]TM*, DataSheet, Microchip Technology Inc., 2019.

- [174] A. Takieldeeen, A. Fanni, Implementation of AES Algorithm in MicroController Using PIC18F452, *International Organization of Scientific Research Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)* (Dec. 2013), 35–38.
- [175] L. Vračar, M. Stojanović, Comparative Performance Analysis of Hardware and Software Encryption Implementation in WSN, *Facta Universitatis, Series: Electronics and Electronics* 38.2 (2025), 221–237, DOI: doi.org/10.2298/FUEE2502221V.
- [176] B. Ivey, *Low-Power Design Guide*, Microchip Technology Inc., 2011.
- [177] C. Antonopoulos et al., Experimental evaluation of a WSN platform power consumption, *2009 IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing*, 2009, 1–8, DOI: [10.1109/IPDPS.2009.5161185](https://doi.org/10.1109/IPDPS.2009.5161185).
- [178] A. Di Nisio et al., High Dynamic Range Power Consumption Measurement in Microcontroller Based Applications, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 65.9 (2016), 1968–1976, DOI: [10.1109/TIM.2016.2549818](https://doi.org/10.1109/TIM.2016.2549818).
- [179] Žilvinas Nakutis, Embedded Systems Power Consumption Measurement Methods Overview, 2009, URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14473613>.

Biografija autora

Milan Stojanović je rođen 07.04.1994. godine u Paraćinu, gde je završio osnovnu i srednju školu. Osnovne akademske studije na Elektronskom fakultetu u Nišu upisao je školske 2013/14. godine. Diplomirao je 06.10.2017. godine na modulu Elektronske komponente i mikrosistemi, sa prosečnom ocenom 9,91 u toku studija i ocenom 10 na diplomskom radu po nazivom „Projektovanje i realizacija M2M uređaja za merenje temperature i vlažnosti vazduha“. Master akademske studije na studijskom programu Elektronika i Mikrosistemi, takođe na Elektronskom fakultetu, završio je 27.09.2018. godine, sa prosečnom ocenom 10 i ocenom 10 na master radu pod nazivom „Uticaj vrste enkripcije podataka na potrošnju kod autonomnih bežičnih senzora“. Doktorske akademske studije na Elektronskom fakultetu, na studijskom programu Nanoelektronika i mikrosistemi, upisao je školske 2018/19. godine.

Nagrađivan je pohvalnicama i poveljama od strane Elektronskog fakulteta za postignute rezultate u toku sstudiranja. Tokom studija bio je stipendista Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbija, Fonda za izuzetno nadarene učenike i studente Republike Srbije, kao i Fonda za mlade talente Republike Srbije - Dositeja. Dobitnik je treće nagrade po ocenama recenzenata na devetoj IEEEESTEC konferenciji studentskih radova, i specijalne nagrade „Rad sa najvećim inovacionim potencijalom“, na desetoj IEEEESTEC konferenciji studentskih radova. Nosilac je povelje „Branko Raković“, dodeljene od strane Elektronskog fakulteta za najbolji master rad na smeru Elektronika i mikrosistemi u školskoj 2017/18, kao i „Pupinove nagrade“ za 2020. godinu, koju dodeljuje Matica Srpska za najbolje izrađene završne, master i naučne radove u prethodnom trogodišnjem periodu.

Nakon završenih master akademskih studija, u periodu od 01.10.2018. do 01.03.2019. godine, radio je u kompaniji „DMV“ u sektoru za razvoj i projektovanje hardvar. U zvanje istraživač-pripravnik, na Elektronskom fakultetu, izabran je 14.03.2019. godine. U zvanje asistent, za užu naučnu oblast Mikroelektronika i mikrosistemi, izabran je 10.02.2022. godine. Do sada je bio angažovan na izvođenju računskih i laboratorijskih vežbi iz predmeta: Elektronske komponente, Fizika, Senzori i pretvarači, Tehnologije 3D štampe, Komponente i kola snage, Komunikacioni protokoli za prenos podataka i Solarne tehnologije i komponente.

Koautor je pomoćnog udžbenika „Laboratorijski praktikum sa primerima za samostalan rad iz predmeta Senzori i pretvarači“.

Nakon izbora u zvanje istraživač pripravnik bio je angažovan na projektu „Razvoj, optimizacija i primena tehnologija samonapajajućih senzora“, finansiranog od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, čiji je rukovodilac bio prof. dr Zoran Prijić. Tokom 2022. godine je učestvovao u realizaciji projekta „*Let STEM visit again IEEEESTEC*“.

Učestvovao je u realizaciji nekoliko Arduino radionica za učenike srednjih škola i studente Elektronskog fakulteta. Bio je jedan od predstavnika studentskog ogranka IEEE Univerziteta u Nišu na događaju *IEEE Region 8 Student and Young Professionals Congress* 2020. godine.

Tokom maja meseca 2025. godine je učestvovao na ERASMUS+ mobilnosti u okviru realizacije BIP-a (*Blended Intensive Programme*) pod nazivom *Project Development*.

Recenzent je naučnih radova za časopise *Transaction on Institute Measurement and Control* i *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics*, kao i radova za konferencije MIEL i IEEEESTEC.

Redovni je član Matice Srpske i student član IEEE *Solid State Circuit Society*. Od 2015. godine je član sekretarijata IEEEESTEC konferencije.

IZJAVA O AUTORSTVU

Izjavljujem da je doktorska disertacija, pod naslovom

Razvoj i primena autonomnih senzora u strukturama pametnih gradova

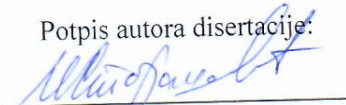
Koja je odbranjena na Elektronskom fakultetu Univerziteta u Nišu:

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da ovu disertaciju, ni u celini, niti u delovima, nisam prijavljivao na drugim fakultetima, niti univerzitetima;
- da nisam povredio autorska prava, niti zloupotrebio intelektualnu svojinu drugih lica.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci, koji su u vezi sa autorstvom i dobijanjem akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada, i to u katalogu Biblioteke, Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Nišu, kao i u publikacijama Univerziteta u Nišu.

U Nišu, _____

Potpis autora disertacije:



Milan D. Stojanović

**IZJAVA O ISTOVETNOSTI ELEKTRONSKOG I ŠTAMPANOG OBLIKA
DOKTORSKE DISERTACIJE**

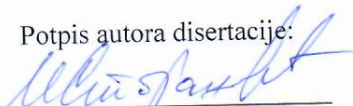
Naslov disertacije:

Razvoj i primena autonomnih senzora u strukturama pametnih gradova

Izjavljujem da je elektronski oblik moje doktorske disertacije, koju sam predao za unošenje u **Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu**, istovetan štampanom obliku.

U Nišu, _____

Potpis autora disertacije:



Milan D. Stojanović

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Nikola Tesla“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu unese moju doktorsku disertaciju, pod naslovom:

Razvoj i primena autonomnih senzora u strukturama pametnih gradova

Disertaciju sa svim prilogima predao sam u elektronskom obliku, pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju, unetu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu, mogu koristiti svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo **(CC BY)**

2. Autorstvo – nekomercijalno **(CC BY-NC)**

3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerađe (CC BY-NC-ND)

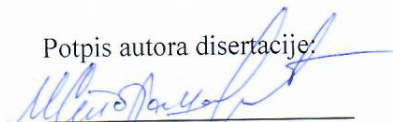
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima **(CC BY-NC-SA)**

5. Autorstvo – bez prerađe **(CC BY-ND)**

6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima **(CC BY-SA)**,

U Nišu, _____

Potpis autora disertacije:



Milan D. Stojanović