



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



ŽIVORAD MIHAJLOVIĆ

**SAMONAPAJAJUĆI ČVOROVİ BEŽIČNIH
SENZORSKIH MREŽA ZA PRAĆENJE
PARAMETARA ŽIVOTNE SREDINE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2018



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска публикација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Аутор, АУ:	Живорад Михајловић, истраживач сарадник
Ментор, МН:	Др Мирјана Дамњановић, редовни професор
Наслов рада, НР:	Самонапајајући чворови бежичних сензорских мрежа за праћење параметара животне средине
Језик публикације, ЈП:	Српски
Језик извода, ЈИ:	Српски/енглески
Земља публикавања, ЗП:	Србија
Уже географско подручје, УП:	Аутономна Покрајина Војводина
Година, ГО:	2018
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	8/112/113/6/75/0/0
Научна област, НО:	Електротехничко и рачунарско инжењерство
Научна дисциплина, НД:	Електроника
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Бежичне сензорске мреже, прикупљање енергије из околине, сеперкондензатор, праћење параметара животне средине
УДК	Монографска документација
Чува се, ЧУ:	Библиотека Факултета техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Важна напомена, ВН:	
Извод, ИЗ:	У дисертацији је описан наменски пројектован бежични сензорски чвор намењен за праћење параметара животне средине. Развијено решење се одликује малом ценом и димензијама, широком применом и минималним утоцајем на животну средину у поређењу са примерима из литературе. Користи се прикупљање енергије сунца из околине и суперкондензатор за напајање, што утиче на повећање животног века и смањивање трошкова одржавања. Извршена тестирања су потврдила функционалност предложеног решења и могућност праћења различитих параметара коришћењем комерцијалних и наменски пројектованих сензора. Унапређено, модуларно, решење решава уочена ограничења и повећава број параметара животне средине који се могу пратити.
Датум прихватања теме, ДП:	29.09.2017.
Датум одбране, ДО:	
Чланови комисије, КО:	
Председник:	др Иван Мезеи, ванредни професор
Члан:	др Дејан Драјић, ванредни професор
Члан:	др Јован Бајић, доцент
Члан:	др Дејан Убавин, ванредни професор
Члан, ментор:	др Мирјана Дамњановић, редовни професор

Потпис ментора



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monograph publication
Type of record, TR :	Textual printed material
Contents code, CC :	PhD thesis
Author, AU :	Živorad Mihajlović, research associate
Mentor, MN :	Dr Mirjana Damnjanović, full professor
Title, TI :	Wireless Sensor Network Node with Energy Harvesting for Monitoring of Environmental Parameters
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian/English
Country of publication, CP :	Serbia
Locality of publication, LP :	Autonomous Province of Vojvodina
Publication year, PY :	2018
Publisher, PB :	Author reprint
Publication place, PP :	Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad
Physical description, PD : <small>(chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)</small>	8/112/113/6/75/0/0
Scientific field, SF :	Electrical and Computer Engineering
Scientific discipline, SD :	Electronics
Subject/Key words, S/KW :	Wireless Sensor Networks, Energy Harvesting, Supercapacitor, Environmental Monitoring
UC	
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Note, N :	
Abstract, AB :	The dissertation describes a specially designed WSN node for application in environmental monitoring. The developed solution is characterized by low price and dimensions, wide application and minimal environmental impact compared to example in literature. Solar energy harvesting and supercapacitor are used as power supply, which increase node lifetime and reduce maintenance costs. The performed tests confirmed the functionality of the proposed solution and the ability to monitor various environmental parameters using commercial and specially designed sensors. The new enhanced solution, with modular design, solves the observed limitations and increases the number of environment parameters that can be monitored.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	29.09.2017.
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	
President:	Ivan Mezei, Ph.D., Associate Professor
Member:	Dejan Drajić, Ph.D., Associate Professor
Member:	Jovan Bajić, Ph.D., Assistant Professor
Member:	Dejan Ubavin, Ph.D., Associate Professor
Member, Mentor:	Mirjana Damnjanović, Ph.D., Full Professor
	Menthor's sign

Zahvalnica

Sadržaj:

1. Uvod.....	1
1.1 Problem istraživanja	2
1.2 Predmet istraživanja	4
1.3 Cilj istraživanja.....	6
1.4 Naučni doprinos.....	6
2. Bežične senzorske mreže i životna sredina	9
2.1 Praćenje životne sredine	9
2.2 Parametri životne sredine	11
2.2.1 Parametri životne sredine u vazduhu	11
2.2.2 Parametri životne sredine u vodi	12
2.2.3 Parametri životne sredinu u zemljištu	13
2.3 Bežične senzorske mreže za praćenje parametara životne sredine.....	14
2.3.1 Izazovi kod bežičnih senzorskih mreža za praćenje životne sredine	16
2.4 Korišćenje bežičnih senzorskih mreža u praćenju parametra životne sredine	18
2.4.1 Praćenje parametara u poljoprivredi.....	18
2.4.2 Praćenje životnog staništa	18
2.4.3 Praćenje kvaliteta vazduha i uticaja na efekat staklene bašte	19
2.4.4 Specijalizovano korišćenje bežičnih senzorskih mreža.....	20
2.5 Životni vek bežičnih senzorskih mreža za praćenje parametara životne sredine	20
3. Samonapajajuće bežične senzorske mreže	22
3.1 Potrošnja i izvori energije kod bežičnog senzorskog čvora	22
3.2 Proces prikupljanja energije iz okoline kod bežičnih senzorskih mreža	25
3.3 Sistem za prikupljanje energije iz okoline.....	28
3.4 Prikupljanje solarne energije za napajanje bežičnih senzorskih mreža.....	29
3.4.1 Zašto solarne energije?.....	29
3.4.2 Održivost rada bežičnog senzorskog čvora	30
3.4.3 Analiza sistema za prikupljanje solarne energije iz okoline	30
3.5 Skladištenje energije kod bežičnog senzorskog čvora	34
3.5.1 Sekundarne (punjive) baterije	34
3.5.2 Superkondenzatori.....	35

3.6	Pregled samonapajajućih bežičnih senzorskih čvorova.....	38
4.	Projektovanje namenskog samonapajajućeg bežičnog senzorskog čvora.....	44
4.1	Definisanje osnovnih zahteva za projektovanje bežičnog senzorskog čvora	44
4.2	Izbor ključnih komponenti.....	46
4.2.1	Definisanje ključnih komponenti podсистема za napajanje	48
4.2.2	Izbor superkondenzatora	51
4.2.3	Modelovanje i performance izabranog superkondenzatora.....	55
4.2.4	Kolo za punjenje superkondenzatora	64
4.3	Projektovanje bežičnog senzorskog čvora.....	66
4.3.1	Definisanje specifikacije čvora	66
4.3.2	Implementacija bežičnog senzorskog čvora.....	68
4.4	Karakteristike projektovanog rešenja	70
4.5	Unapređeni bežični senzorski čvor.....	72
4.5.1	Ograničenja projektovanog bežičnog senzorskog čvora	72
4.5.2	Projektovanje unapređenog bežičnog senzorskog čvora.....	73
5.	Eksperimentalna verifikacija projektovanog rešenja	78
5.1	Održivost superkondenzatora kao elementa za skladištenje energije.....	78
5.1.1	Ispitivanje brzine pražnjenja superkondenzatora	78
5.1.2	Ispitivanje punjenja superkondenzatora	81
5.1.3	Ponašanje superkondenzatora u normalnom radu	82
5.2	Proširivanje funkcionalnosti projektovanog bežičnog senzorskog čvora.....	84
5.2.1	Proširivanje funkcionalnosti bežičnog senzorskog čvora sa komercijalnim sensorima	84
5.2.2	Proširivanje funkcionalnosti bežičnog senzorskog čvora namenski projektovanim sensorom	86
5.2.3	Testiranje implementiranog senzora nivoa tečnosti.....	90
5.3	Karakteristike i mogućnosti unapređenog bežičnog senzorskog čvora.....	92
5.3.1	Karakteristike unapređenog bežičnog senzorskog čvora	92
5.3.2	Ponašanje unapređenog čvora u normalnom radu.....	94
5.3.3	Potencijalne mogućnosti unapređenog čvora u budućem radu i primeni.....	95
6.	Diskusija.....	97
7.	Zaključak.....	102
8.	Literatura	105

Spisak slika

Slika 1.1 Istorijski pregled razvoja praćenja parametara u vodi	2
Slika 1.2 Primeri različitih komercijalnih bežičnih senzorskih čvorova [17]	4
Slika 1.3 Primer korišćenja velikog broja čvorova za blagovremenu detekciju šumskih požara i nedostatak GSM baziranih uređaja na konkretnom primeru.....	5
Slika 2.1 Stepenice znanja gde su prikazana naučna posmatranja i merenja sa ciljem da se bolje razume životna sredina i da se prikaže put ka pametnom donošenju odluka [31]	9
Slika 2.2 Uprošćena arhitektura bežične senzorske mreže.....	14
Slika 2.3 Osnovni podsistemi jednog bežičnog senzorskog čvora: senzorski, komunikacioni, upravljački i podsistem za napajanje.....	15
Slika 3.1 Grafički prikaza potrošnje čvora u aktivnom i uspavanom režimu rada	22
Slika 3.2 Očekivani životni vek baterija pri normalnom režimu rada (radni ciklus 100%) i u režimu štednje energije pri radnom ciklusu od 1% [17]	23
Slika 3.3 Poređenje različitih vrsta izvora napajanja u odnosu na specifičnu energiju i vršnu snagu koju mogu da obezbede [17]	23
Slika 3.4 Mesto procesa prikupljanja energije iz okoline u ukupnom toku energije standardnog bežičnog senzorskog čvora [17]	25
Slika 3.5 Izvori energije okoline i njihovi “prukupljači” [17]	26
Slika 3.6 Blok dijagram sa osnovnim delovima sistema za prikupljanje energije iz okoline ..	28
Slika 3.7 Osnovni blokovi sistema za napajanje koji koristi prikupljanje solarne energije iz okoline	31
Slika 3.8 Uprošćeni model solarne ćelije.	31
Slika 3.9 Snaga i struja fotonaponske ćelije u zavisnosti od napona	32
Slika 3.10 Opis OCV algoritama koji se koristi za podešavanje rada solarnog panela u tački maksimalne snage	33
Slika 3.11 Unutrašnja struktura dvoslojnog superkondenzatora za elektrodama od ugljenika	35
Slika 3.12 Model standardnog elektrolitskog kondenzatora koji se koristi za modelovanje superkondenzatora [64]	36
Slika 3.13 Ekvivalentno kolo superkondenzatora koje koristi idealne komponente i promenljivi kondenzator za opis zavisnosti promene kapacitivnosti od napona [64]	36
Slika 3.14 Ekvivalentno kolo superkondenzatora usled složene interne strukture elektrode ugljenika [64]	37
Slika 3.15 a) Izgled i b) blok šema Helimot bežičnog čvora [25].....	39
Slika 3.16 a) Izgled i b) arhitektura Prometheus bežičnog senzorskog čvora [25]	39
Slika 3.17 Algoritam rada Prometheus bežičnog senzorskog čvora sa primarnim i sekundarnim skladištem energije [25]	39
Slika 3.18 a) Izgled i b) arhitektura Everlast bežičnog senzorskog čvora [68].....	40
Slika 3.19 a) Izgled dela Ambimaks rešenja i b) arhitektura sistema za prikupljanje energije iz okoline [69]	41
Slika 3.20 a) Arhitektura i b) izgled bežičnog senzorskog čvora [71] za merenje parametara životne sredine.....	42
Slika 3.21 Blok dijagram napajanja kola za prikupljanje energije iz okoline iz [72]	42

Slika 3.22 a) Izgled i b) arhitektura realizovanog bežičnog senzorskog čvora iz [72]	43
Slika 4.1 Uopštena struktura upravljačkog podsistema čvora baziranog na mikroracunaru kao što je na primer mikrokontroler.....	47
Slika 4.2 Objašnjenje ograničenja u projektovanju čvora korišćenjem „projektnog trougla“ .	49
Slika 4.3 Blok dijagram sistema za napajanje čvora koji koristi solarni panel i element za skladištenje energije	50
Slika 4.4 Izgled izabranog minijaturnog solarnog panela snage 0,3 W, sa tačkama maksimalne struje i napona od 0,15 A i 2,0 V	50
Slika 4.5 Razlika u gustini energije i gustini snage između punjive baterije i superkondenzatora	51
Slika 4.6 Razlika u visini proizvoda kada se koriste: (a) standardni valjkasti [82] i (b) Murata planarni superkondenzatori [81].....	54
Slika 4.7 Dva superkondenzatora proizvođača Murata sa različitim kapacitivnostima, ali istim otiskom za štampanu ploču [83].....	54
Slika 4.8 Izgled, terminalne oznake i model korišćenog superkondenzatora DMT334R2S474M3DTA0 proizvođača Murata [83].....	55
Slika 4.9 Transformacija DMT334R2S474M3DTA0 koji sadrži dve ćelije superkondenzatora u ekvivalentni model sa prikazanim promenama bitnih parametara.....	56
Slika 4.10 Interna struktura superkondenzatora i raspodela naelektrisanja u stanju punjenja i pražnjenja [81].....	56
Slika 4.11 Uveličani izgled elektrode od ugljenika sa nano porama koje povećavaju efektivnu površinu za nagomilavanje naelektrisanja [66]	57
Slika 4.12 Ekvivalentna šema kondenzatora koja modeluje zavisnost kapaciteta i ekvivalentne serijske otpornosti od dubine pora [83]	57
Slika 4.13 Eksperimentalno određivanje kapacitivnosti superkondenzatora metodom pražnjenja konstantnom strujom	58
Slika 4.14 a) Grafik pražnjenja superkondenzatora sa početnim padom napona usled serijske otpornosti, b) karakteristike pražnjenja za različite struje pražnjenja [83]	58
Slika 4.15 a) Zavisnost kapacitivnosti i b) serijske otpornosti superkondenzatora [83].....	59
Slika 4.16 a) Struja punjenja idealnog superkondenzatora i struja curenja nakon završetka punjenja. b) Realna promena struje punjenja superkondenzatora usled složene unutrašnje strukture elektroda od ugljenika [83]	60
Slika 4.17 Promena struje punjenja i struje curenja tokom velikog intervala vremena [83] ...	61
Slika 4.18 Promene kapacitivnosti i serijske otpornosti superkondenzatora usled efekta: a) isušivanja, b) starenja i c) usled zajedničkog efekta [83].....	62
Slika 4.19 Prednosti planarnog oblika superkondenzatora u odnosu na cilindrični usled manje površine zaptivanja, što utiče na smanjivanje prodiranja vlage i isušivanje elektrolita [83]	62
Slika 4.20 Promena kapacitivnosti i serijske otpornosti za vreme od 12000 sati pri temperaturi od 70°C [83].....	63
Slika 4.21 Kapacitivnost i serijska otpornost posle 100.000 ciklusa punjenja i pražnjenja [83]	63
Slika 4.22 a) Tipično povezivanje eksternih komponenti za bq25504 integrisanje rešenje i b) ciklus punjenja i pražnjenja sa obeleženim nivoima	65

Slika 4.23 Zbog kvadratnog oblika solarnog panela, poželjni oblik projektovanog bežičnog senzorskog čvora je u obliku kocke [85].....	67
Slika 4.24 Blok dijagram bežičnog senzorskog čvora za praćenje parametara životne sredine	68
Slika 4.25 Blok dijagram glavne štampane ploče bežičnog senzorskog čvora sa izabranim ključnim komponentama	68
Slika 4.26. a) Izgled glavne štampane ploče i b) 3D modela čvora u programskom paketu Altium Designer	69
Slika 4.27 Konačan izgled projektovanog bežičnog čvora	69
Slika 4.28 Primer nadogradnje bežičnog senzorskog čvora dodatnom štampanom pločom sa komercijalnim sensorima za merenje koncentracije ozona u vazduhu	70
Slika 4.29 Razlika u ceni, dimenzijama i broju parametara životne sredine između idealnog, unapređenog i projektovanog čvora	73
Slika 4.30 Modularna struktura unapređenog čvora koji se sastoji od četiri štampane ploče, po jedne za svaki podsystem	74
Slika 4.31 Primer tri potencijalna modula za svaki podsystem čvora. Strelica označava module koji su ekvivalentni projektovanom čvoru	75
Slika 4.32 Izgled i moduli unapređenog čvora sa ključnim komponentama [90].....	76
Slika 5.1 Postavka za merenje vremena opadanja napona superkondenzatora u odnosu na učestanost slanja podataka putem bežične komunikacije.....	79
Slika 5.2 Prikaz dostupnih podešavanja kontrolera za punjenje korišćenjem spoljašnjih otpornosti.....	79
Slika 5.3 Primer pražnjenja superkondenzatora DMT334R2S474M3DTA0 za različite frekvencije slanja podataka	80
Slika 5.4 Eksperiment punjenja superkondenzatora pri normalnom osvetljenju Sunca i za slučaj kada je vreme oblačno. Punjenje je sprovedeno u podne pri najvećem intezitetu osvetljaja i posle podne neposredno pred zalazak Sunca, kada je intezitet osvetljaja najmanji u toku dana.	81
Slika 5.5 Vreme punjenja superkondenzatora za slučaj sunčanog i oblačnog vremena. Gornji grafik pokazuje punjenje u podne, a donji neposredno pred zalazak Sunca	81
Slika 5.6 Postavka eksperimenta u kome je testirana odzivost čvora u trajanju od 48 sati	83
Slika 5.7 Promena napona na superkondenzatoru (V_{SCUP}) DMT334R2S474M3DTA0 u toku perioda od dva dana.....	83
Slika 5.8 Blok šema dodatne ploče koja koristi komercijalne senzore za merenje koncentracije ozona	84
Slika 5.9 Prikaz inovativnog kapacitivnog senzora za merenje nivoa tečnosti i njegovo povezivanje na dodatnu ploču i projektovani čvor [30].....	86
Slika 5.10 Unutrašnja struktura modula za merenje kapacitivnosti (CSM), koji je integrisan u mikrokontroleru.....	88
Slika 5.11 Primer povezivanje kapacitivnosti za testiranje i kabela koji predstavlja kapacitivni senzor za merenje nivoa tečnosti.....	90
Slika 5.12 a) Poklapanje izmerenih vrednosti kapacitivnosti u odnosu na idealno linearno ponašanje i b) apsolutna greška nastala usled ljudskog faktora i talasnosti površine vode	91

Slika 5.13 Odziv senzora kada se nivo vode smanji trenutno u celom opsegu merenja	91
Slika 5.14 Blok šema komunikacionog modula sa opisom načina upravljanja napajanjem	94
Slika 5.15 Promena napona na superkondenzatoru (V_{SCUP}) DMT334R2S474M3DTA0 u toku perioda od dva dana, za unapređeni čvor, za različite intervale slanja podataka	95

Spisak tabela

Tabela 3.1 Usporedne karakteristike superkondenzatora i litijum jonske baterije	24
Tabela 3.2 Različiti izvori energije u prirodi, način pretvaranja u električnu energiju i uobičajena gustina snage [17]	26
Tabela 4.1 Izgled razmatranih superkondenzatora sa najvažnijim karakteristikama	52
Tabela 4.2 Specificirani parametri koje projektovani čvor treba da ispuni	67
Tabela 4.3 Cena i potrošnja energije navažnijih komponenti čvora	71
Tabela 5.1 Poređenje potrošnje u uspavanom režimu i cene ključnih komponenti projektovanog i unapređenog čvora	92

Spisak skraćenica

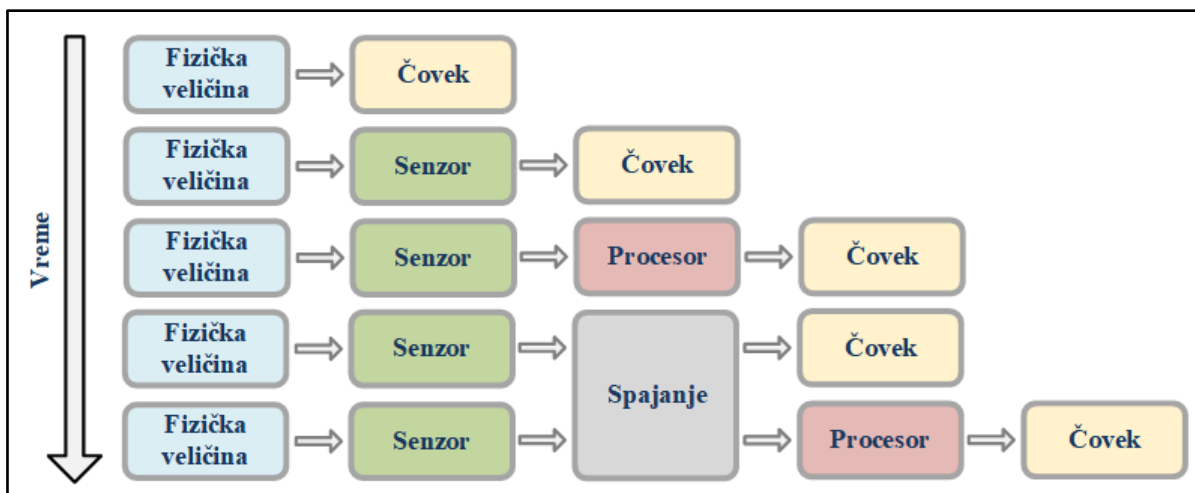
WSN	Bežične senzorske mreže (engl. <i>Wireles Sensor Networks</i>)
IoT	Internet stvari (engl. <i>Internet of Things</i>)
BSM	Bežične senzorske mreže
BSČ	Bežični senzorski čvor (engl. <i>Wireless Sensor Node</i>)
GSM	Globalni sistem za mobilnu komunikaciju (engl. <i>GSM - Global System for Mobile Telecommunications</i>)
pH	Mera aktivnosti vodonikovih jona (engl. <i>pH – Potential of Hydrogen</i>)
IPv6	Protokol sloja mreže, verzija 6 (engl. <i>Internet Protocol version 6</i>)
MEMS	Mikroelektromehanički sistemi (engl. <i>Microelectromechanical systems</i>)
MPP	Tačka maksimalne snage (engl. <i>MPP – Maximum Power Point</i>)
MPPT	Praćenje tačke maksimalne snage (engl. <i>MPPT – Maximum Power Point Tracking</i>)
OCV	Napon u otvorenom kolu (engl. <i>OCV – Open-Circuit Voltage</i>)
ESR	Ekvivalentna serijska otpornost (engl. <i>ESR – Equivalent Series Resistance</i>)
Ni-MH	Nikl-metal hibrid baterije (engl. <i>Ni-MH – Nickel-metal hybride</i>)
ISM	Industrijska, naučna i medicinska primena frekvencijskog spektra (engl. <i>ISM - Industrial, Scientific and Medical</i>)
SPI	Serijski modul za komunikaciju (engl. <i>SPI – Serial Peripheral Interface</i>)
I ² C	Serijski komunikacioni protokol (engl. <i>I²C - Inter-Integrated Circuit</i>)
SMT	Tehnologija montiranja el. komponenti (engl. <i>SMT – Surface-mount Technology</i>)
DC-DC	Tip napajanja koje jedan oblik jednosmerne struje pretvara u drugi (engl. <i>DC – Direct Current</i>)
UV	Donja granica napona normalnog rada uređaja (engl. <i>UV – undervoltage</i>)
OV	Gornja granica napona normalnog rada uređaja (engl. <i>OV – overvoltage</i>)
3D	Prikaz u tri dimenzije
SMA	Standard za RF konektore (engl. <i>SMA - SubMiniature version A</i>)
WiFi	Tehnologija za bežične lokalne mreže
RTC	Sat realnog vremena (engl. <i>RTC – Real Time Clock</i>)
ADC	Analogno-digitalni konvertor (engl. <i>ADC – Analog-to-Digital Converter</i>)
PCB	Štampana ploča (engl. <i>PCB - Printed Circuit Board</i>)
CSM	Modul za merenje kapacitivnosti (engl. <i>CSM - Capacitive Sensing Module</i>)
RF	Radio modul (engl. <i>RF – Radio Frequency</i>)

1. Uvod

Na Zemlji gde je čovek, u ovom trenutku najinteligentnije živo biće sa razvijenim sposobnostima za apstraktno mišljenje, govor, rešavanje problema i samoposmatranje, jedna stvar je oduvek bila sigurna, priroda uvek pobeđuje. Pretpostavlja se da je Zemlja stara oko 4,6 milijardi godina, ali je ljudska inteligencija došla do izražaja tek u poslednjih nekoliko hiljada godina, učinivši ljude dominantnom vrstom na Zemlji posle 200.000 godina postojanja. U toku svog razvoja, čovek neprestano utiče na prirodu koja ga okružuje, tj. na životnu sredinu. Danas se taj uticaj uglavnom smatra nepovoljnim. Čovek, kao inteligentno biće, svestan je ovog uticaja tako da se sve više među ljudima javlja svest o očuvanju životne sredine. Ili će čovek pronaći način da živi u skladu sa prirodom ili će nestati sa lica Zemlje, jer priroda uvek pobeđuje.

Ideja o zaštiti životne sredine od čovekovog uticaja pojavljuje se tokom 19-og veka, ali se tek u proteklih nekoliko decenija sve glasnije govori o ovoj temi. Pod zaštitom životne sredine se podrazumeva organizovano delovanje društva koje ima za cilj da se očuvaju prirodni resursi na trenutnom stanju i da se po mogućstvu smanji njena degradacija. Stanje životne sredine se utvrđuje njenim praćenjem, što predstavlja skup aktivnosti neophodnih da se utvrde određene osobine i kvalitet. U stvarnosti se praćenje aproksimira posmatranjem ograničenog skupa parametara, čija promena ima najznačajniji uticaj na životnu sredinu. Primeri parametara životne sredine su: koncentracija ugljen-dioksida u vazduhu, rastvoreni kiseonik u vodi, salinitet zemljišta i mnogi drugi.

Istorijski pregled praćenja parametara u vodi, koji je prikazan na slici 1.1, predstavlja reprezentativan primer razvoja praćenja parametara životne sredine. Naime, u doba industrijske revolucije ljudi su primetili da su određene bolesti učestalije u blizini fabrika koje ispuštaju otpad u svojoj okolini. Zato su u osamdesetim godinama prošlog veka počeli da se koriste bunari za praćenje kvaliteta vode, koji su ubrzo postali standardna infrastrukturalna mreža. Na velikom broju lokacija su izbušeni bunari iz kojih su naučnici iz oblasti ekologije uzorkovali vodu za analizu. U devedesetim godinama prošlog veka pojavljuju se prvi prenosivi uređaji koji koriste senzore, što je omogućavalo trenutnu dostupnost rezultata, bez laboratorijske analize. U kasnim devedesetim i početkom novog milenijuma pojavljuju se novi senzori koji su modularniji, minijaturniji, napredniji i jeftiniji. Na osnovu njih izrađuju se uređaji sa mogućnošću arhiviranja velikog broja podataka (engl. *Data loggers*). Javlja se potreba da se svi podaci prikupljaju na jednom mestu i internet počinje sve više da se koristi za ovu svrhu. Krajem prve decenije novog milenijuma počeli su da se koriste pametni senzori koji svoje podatke šalju preko modernih sistema za telemetriju, koji omogućavaju daljinsko merenje i prenos informacija. Sve više se u naučnim krugovima koriste termini bežične senzorske mreže (engl. *WSN - Wireless Sensor Networks*) i internet stvari (engl. *IoT - Internet of Things*).



Slika 1.1 Istorijski pregled razvoja praćenja parametara u vodi

Bežične senzorske mreže (BSM) sastoje se od velikog broja raspoređenih bežičnih senzorskih čvorova. U daljem tekstu će se često umesto termina bežični senzorski čvor koristiti samo čvor ili BSČ. U idealnom slučaju čvorovi se samostalno konfiguriraju prema susednim čvorovima u zavisnosti od položaja u okviru mreže. BSM-e sadrže jedan ili više pristupnih čvorova. Čvorovi preko senzora prikupljaju podatke o tekućem stanju fizičke okoline i nakon lokalne obrade šalju podatke koristeći mrežnu infrastrukturu do pristupnih čvorova koji su preko interneta ili na neki drugi način povezani na sistem za arhiviranje.

BSM-e u oblasti zaštite životne sredine prikupljaju podatke o određenim parametrima okoline. Ovo je složen zadatak, jer se često podaci prikupljaju sa terena koji su nepristupačni, opasni (strme planine, dubokih voda, prisustvo divljih životinja) i pod uticajem hazardnih supstanci (štetnih gasova, opasno zagađenje sredine). Prikupljanje podataka je autonomno i u realnom vremenu, tako da je moguće uočiti pojedine probleme u početnoj fazi nastajanja.

1.1 Problem istraživanja

Očuvanje životne sredine je trenutno jedan od najvećih izazova čovečanstva. Kao direktni zavisnici od sredine u kojoj žive, ljudi moraju aktivnije da se angažuju u njenom očuvanju. Međutim, ova oblast je finansijski veoma zahtevna. Svest o tome se polako širi, pre svega u razvijenim zemaljama, gde se već izdvajaju značajna sredstva za ove potrebe. Ipak, čak i u razvijenim zemljama, potencijalni privatni investitori nisu zainteresovani za ulaganje u ovu oblast, jer je ostvareni profit veoma mali, tako da se sredstva najviše izdvajaju iz budžeta država. Ovo znači da ograničena finansijska sredstva treba što racionalnije i kvalitetnije iskoristiti. Prioritet uvek imaju projekti koji rešavaju ili pomažu rešavanje problema sa uticajem na zdravlje i život ljudi. Međutim, to znači da mnogi bitni aspekti očuvanja životne sredine ostaju nepokriveni. Dugoročni projekti koji ne utiču vidljivo na čoveka, kao što su proučavanje uzroka i efekata globalnog zagrevanja, praćenje ugroženih vrsta životinja ili otkrivanje razloga smanjivanja broja pčela, će morati sačekati svoje vreme, što tada može biti prekasno, jer napravljena šteta može biti nepopravljiva.

U situaciji kada ne postoji dovoljno sredstava za praćenje celokupne životne sredine, logično rešenje je da se postojeći resursi što racionalnije iskoriste. Jedan način ostvarivanja ovog cilja je da se uz minimalna ulaganja razviju i implementiraju sistemi za praćenje parametara životne sredine koji se neće odlikovati najboljim performansama, ali će imati zadovoljavajuću funkcionalnost. Za BSM-e je već pokazano da odgovaraju potrebama praćenja parametara životne sredine [1]–[9]. Ipak, nije svaka BSM-a pogodna za ovu svrhu. BSM-e za praćenje parametara životne sredine se smatra kvalitetnijom ukoliko zadovoljava uslove:

1. niska cena (proizvodnja sastavnih elemenata, ugradnja i održavanje),
2. pouzdan rad (u terenskim uslovima),
3. prilagodljivost specifičnim primenama (multifunkcionalnost, širok opseg primena, skalabilnost) i
4. minimalan uticaj na životnu sredinu (zagađenje, remećenje sredine u toku ugradnje).

Niska cena je osnovni prioritet prilikom projektovanja BSM-a i veliki broj tekućih istraživanja su usmerena ka ostvarivanju ovog cilja. Ako se uzme u obzir da su troškovi ugradnje BSM-e neizbežni i da se na njih ne može drastično uticati, mogući načini da se ukupna cena BSM-e smanji su: smanjivanje troškova proizvodnje sastavnih elemenata (tj. BSC) i minimizacija troškova održavanja. Dakle, gore definisani zahtevi se automatski primenjuju na bežični senzorski čvor.

Planirana upotreba čvorova u terenskim uslovima, koji su često nepristupačni i surovi, zahteva određeni stepen robusnosti u konstrukciji čvorova, što obezbeđuje pouzdan rad. Pouzdan rad je bitan zahtev, jer utiče i na smanjivanje ukupnih troškova održavanja. Čvor koji usled vremenskih prilika i uticaja okoline ispada često iz normalnog režima rada, remeti postupak praćenja parametara sredine i zahteva radnu snagu na terenu za održavanje.

Treći uslov da BSM-a može da se koristi za različite primene je u suprotnosti sa prvim uslovom, da se obezbedi što niža cena. Logično je da multifunkcionalnost zahteva veći broj elektronskih komponenti, što povećava jediničnu cenu po čvoru i prema tome ukupnu cenu BSM-e. Dakle, potrebno je pronaći optimalno rešenje koje zadovoljava oba uslova, nisku cenu i multifunkcionalnost. Ovo u praksi znači da se mora žrtvovati multifunkcionalnost, čime se degradira prilagodljivost senzorskog čvora specifičnim primenama. Usled degradacije, za neke druge primene BSM-e, na primer u pametnim gradovima, korišćenje može biti ograničeno ili nemoguće. Ipak, namensko projektovanje BSM-a treba da omogući nisku cenu, što je osnovni prioritet kako bi se one više koristile u praćenju parametara životne sredine. Za sve BSM-e, skalabilnost je podrazumevana, a ogleda se u mogućnosti da na funkcionalnost ne utiče broj korišćenih čvorova i da se postojeća BSM-a lako može nadograditi.

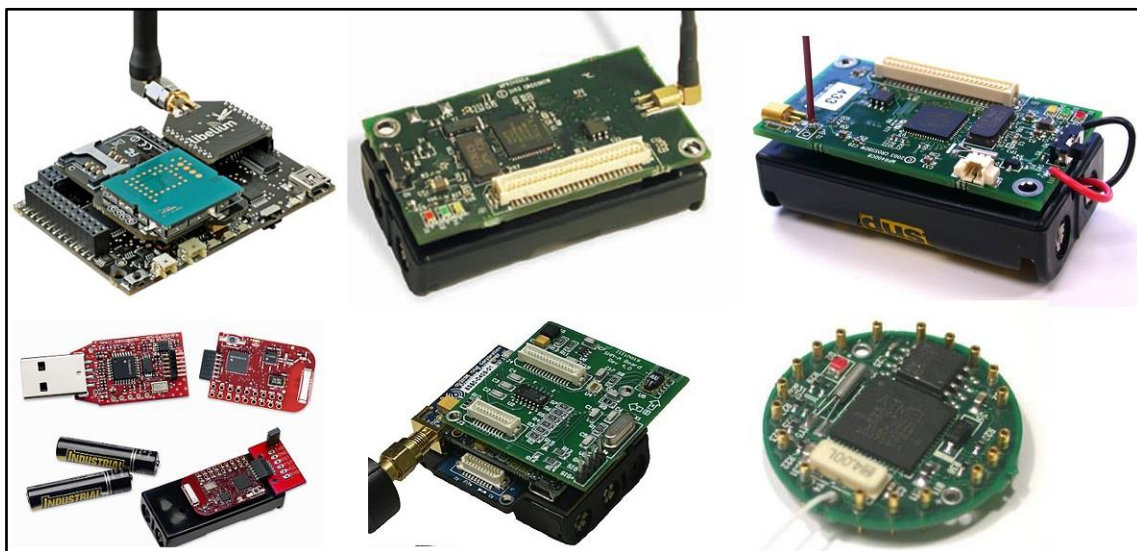
U toku životnog veka BSM-e, sasvim je realno da se u toku rada u promenljivoj prirodnoj sredini pojedini čvorovi nepovratno izgube. Zato je uslov koji zahteva minimalan uticaj na životnu sredinu od izuzetne važnosti. Ukoliko su čvorovi napravljeni od materijala koji su potencijalni zagađivači, postoji velika verovatnoća da njihova funkcija bude negativna po životnu sredinu. Takođe, instaliranje BSM-e treba da što manje ošteti životnu sredinu, a jedan od načina za postizanje ovog cilja su manje fizičke dimenzije čvora.

Prema tome, upotreba BSM-e za praćenje parametara životne sredine podrazumeva rešavanje problema koji nisu svojstveni za druge oblasti primene. Projektovanje prema tačno definisanim uslovima, od kojih su pojedini međusobno suprostavljeni, zahteva temeljnu analizu i napredno projektovanje.

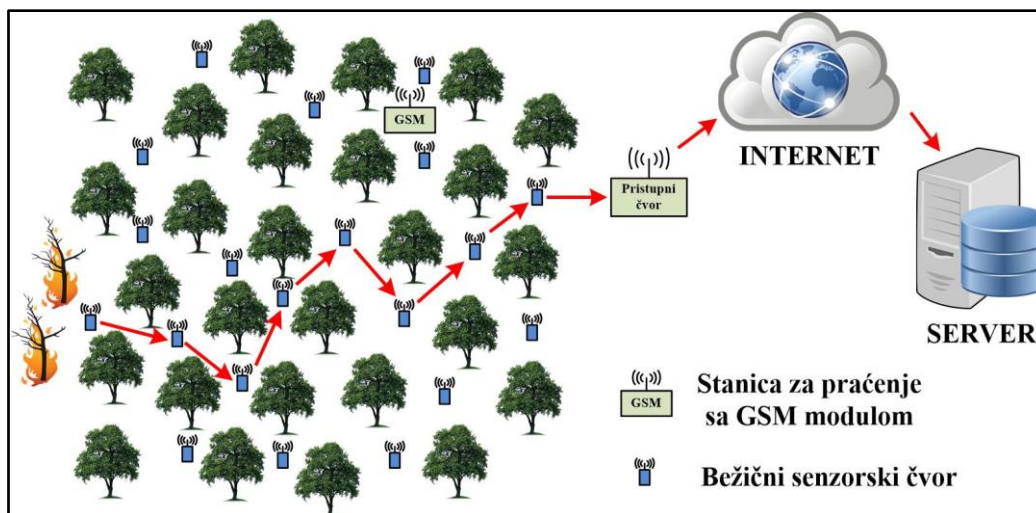
1.2 Predmet istraživanja

Imajući u vidu složenost i specifičnost problema praćenja parametara životne sredine i nameru da se oni reše upotrebom takođe složenih i specifičnih BSM-a, izvršena je analiza koja je pokazala da čvor kao osnovna jedinica BSM-e treba da bude glavni predmet istraživanja. Zato je u ovoj disertaciji tokom istraživanja projektovan namenski čvor za BSM-e, koji se koriste za praćenje parametara životne sredine. Bežični senzorski čvor je elektronski uređaj sa sopstvenim napajanjem, koji ima mogućnost da preko senzorskog podsistema prikuplja podatke o različitim parametrima iz svoje okoline i da ih posle obrade od strane upravljačkog i kontrolnog podsistema, šalje preko komunikacionog podsistema do sledećeg čvora ili pristupnog čvora koji je povezan, najčešće preko interneta, na sistem za arhiviranje [1], [9]–[12]. Različiti primeri komercijalnih senzorskih čvorova su prikazani na slici 1.2.

Na osnovu posmatranja promene parametara životne sredine mogu se dobiti informacije koje se koriste za zaštitu ljudi i životne sredine. Takođe, prate se parametri koji su specifični za određenu primenu kao što su: poljoprivredna proizvodnja, posmatranje vodenih površina, zaštita od šumskih požara, praćenje očuvanosti infrastrukture, upravljanje otpadom i druge primene. Uređaji koji su bazirani na *GSM* tehnologiji i mobilnim komunikacijama za prenos podataka su se odlično pokazali kod praćenja parametara koji se ne menjaju naglo na određenom prostoru (pritisak, temperatura, vlažnost) [13]–[16]. Međutim, veliki broj parametara menja se lokalno, pa ih tako treba i pratiti. Ugradnja više *GSM* uređaja na prostoru koji se posmatra rešava ovaj problem, ali po znatno većoj ceni. Usled složenosti *GSM* uređaja i specifičnih terenskih uslova gde se instaliraju, troškovi održavanja su veliki.



Slika 1.2 Primeri različitih komercijalnih bežičnih senzorskih čvorova [17]



Slika 1.3 Primer korišćenja velikog broja čvorova za blagovremenu detekciju šumskih požara i nedostatak GSM baziranih uređaja na konkretnom primeru

BSM-a sa mnoštvom čvorova bolje pokriva određeni prostor gde se posmatra promena parametara životne sredine. Jednostavna struktura čvora je razlog njihove niske cene. Uglavnom koriste kratkodometni prenos podataka, koji se karakteriše malom potrošnjom energije i koristi slobodni opseg spektra nekomercijalnih frekvencija, posebno visokih frekvencija, gde se postiže velika brzina prenosa podataka između potencijalno velikog broja čvorova. Na slici 1.3 je prikazan tipičan primer primene BSM-e i nedostatak uređaja baziranih na GSM tehnologiji. Zbog njihove visoke cene, obično se na određenom prostoru instalira nekoliko uređaja, a samim tim pokrivenost tog prostora nije optimalana. Čvorovi se karakterišu malom cenom, tako da je opravdano njihovo masovno instaliranje na terenu, jer se postiže bolja pokrivenost terena.

Praćenje parametara životne sredine zahteva ugradnju sistema na nepristupačnim i opasnim terenima [18]–[20]. Nakon ugradnje očekuje se da sistem uz minimalno održavanje ima što duži životni vek. Pri tome, potrošnja energije je u direktnoj vezi sa životnim vekom BSM-e. Primarne (nepunjive) baterije i pored primene modernih algoritama za upravljanje energijom [21]–[23], imaju najveći uticaj na ograničeni životni vek bežičnog senzorskog čvora. Takođe, redovne tehničke intervencije na terenu, pre svega zamena baterija, drastično povećavaju cenu održavanja. Sa ciljem da se životni vek poveća i smanje troškovi održavanja, trenutno aktuelna istraživanja podrazumevaju korišćenje sekundarnih (punjivih) baterija i tzv. prikupljanje energije iz okoline, tj. „žetvu energije“ (engl. *Energy harvesting*) [17], [24]–[27], koji doprinose da BSM-e dobiju prefiks samonapajajuće. Usled karakteristika sekundarnih baterija koje vremenom degradiraju, povećanje životnog veka je nedovoljno za višegodišnje praćenje određenih parametara životne sredine. Zbog toga je za napajanje čvora, umesto punjivih baterija, istražena mogućnost korišćenja kondenzatora velikih kapacitivnosti, koji se u literaturi nazivaju superkondenzatori [17]. Imaju znatno bolje karakteristike od baterija, posebno rok trajanja, broj ciklusa punjenja, izrađuju se od ekoloških materijala itd. Međutim, manja gustina energije u odnosu na baterije doprinosi da se relativno brzo isprazne i zahtevaju često dopunjavanje. Zato je u skladu sa primenom u prirodnom okruženju istražena mogućnost korišćenja fotonaponskih ćelija u kombinaciji sa superkondenzatorom.

1.3 Cilj istraživanja

Osnovna hipoteza disertacije se temelji na ideji da je moguće realizovati bežični senzorski čvor za praćenje parametara životne sredine, koji koristi energiju prikupljenu iz okoline za normalan rad, a odlikuje se malom cenom i dimenzijama, robusnošću i pouzdanošću, lako može prilagoditi različitim primenama, minimalno utiče na životnu sredinu, i ima bolje karakteristike u poređenju na primere iz naučne literature i komercijalna rešenja. Cilj istraživanja ove doktorske disertacije je da se prouči i razvije čvor za specifičnu primenu u oblasti praćenja parametara životne sredine, koji koristi solarnu energiju iz okoline i superkondenzator za skladištenje energije. U okviru disertacije projektovan je i analiziran bežični senzorski čvor za primenu praćenja nekoliko tipičnih parametara životne, a to su koncentracija ozona u vazduhu i merenje nivoa površinskih voda. Ispitana je moguća optimizacija predloženog rešenja, naročito u pogledu fleksibilnosti u upotrebi i upotrebljivosti više izvora energije kod prikupljanja energije iz okoline.

Generalno, ciljevi istraživanja su:

- projektovati namenski, jeftin i štedljiv bežični senzorski čvor sa svim osnovnim karakterističnim podsistemima (upravljački, komunikacioni, senzorski i podsistem za napajanje), ali koji je namenjen isključivo za upotrebu u praćenju parametara životne sredine,
- troškove održavanja svesti na minimum korišćenjem procesa prikupljanja energije iz okoline, pre svega solarne energije koja je najpogodnija za primene praćenja parametara životne sredine,
- analizirati upotrebljivost superkondenzatora kao osnovnog elementa za skladištenje energije kojom se napaja bežični senzorski čvor i ispitati njegove mogućnosti, i
- pokazati fleksibilnost rešenja u realnoj upotrebi praćenja parametara životne sredine.

1.4 Naučni doprinos

Početno istraživanje u disertaciji je obuhvatalo proučavanje naučne i stručne literature i upoznavanje sa trenutnim stanjem iz oblasti BSM-a za praćenje parametara životne sredine. Dakle, proučena je naučna literatura iz oblasti i aktuelna komercijalna rešenja, gde je ustanovljeno da je tehnologija prikupljanja energije iz okoline, u kombinaciji sa modernim superkondenzatorima perspektivno rešenje za primenu u oblasti praćenja parametara životne sredine, ali se ne koristi dovoljno. Posebno su proučena aktuelna naučna rešenja koja su bliska temi disertacije i usmerena ka budućoj komercijalnoj upotrebi u očuvanju životne sredine. Na ovaj način je obezbeđeno da rezultati i doprinosi disertacije budu usklađeni na relevantnom naučnom nivou, a prikazan je važan naučni doprinos u teorijskoj analizi teme istraživanja.

Oslanjajući se na iznesenu teoriju, projektovan je namenski bežični senzorski čvor, koji je namenjen isključivo za praćenje parametara životne sredine. Dokazano je da se samo namenski projektovanim hardverom mogu ostvariti zahtevi za povećanjem primene BSM-a u pomenutoj oblasti, a najvažniji zahtev je svakako mala cena i dimenzije, dok su ostali ostvareni zahtevi

povećana robusnost, prilagodljivost praćenju različitih parametara i na kraju, minimalni uticaj na životnu sredinu. U skladu sa proučenom literaturom, aktuelnim stanjem u oblasti, i primenom novih komercijalnih komponenti, projektovan je moderan i napredan uređaj za pomenutu primenu, koji se odlikuje boljim karakteristikama u odnosu na dosadašnja rešenja. Detaljno je objašnjen tok istraživanja i projektovanja, od definisanja zahteva, izbora ključnih elektronskih komponenti, modelovanja ponašanja, pa sve do budućeg postupka masovne fabrikacije čvorova. Izvršena je analiza koliko je projektovano rešenje ekonomičnije u pogledu cene i potrošnje u odnosu na slična rešenja, bilo da su komercijalna ili proizvod naučnog istraživanja. Stečeno iskustvo se za naučnike, pa i za inženjere može smatrati kao solidna polazna osnova za dalje istraživanje i razvoj u oblasti.

Posebno je analiziran podsistem za napajanje i njegov uticaj na životni vek BSM-e. Proučen je proces prikupljanja sunčeve energije iz okoline i njeno skladištenje u savremenim superkondenzatorima. Izvršena je detaljna analiza superkondenzatora i istražena njihova potencijalna primena kao osnovnog elementa za skladištenje energije, čime bi se zamenile štetne po okolinu punjive baterije, produžio životni vek BSM-e i smanjili troškovi održavanja. Sprovedeni su eksperimenti koji su pokazali da je ovako koncipiran bežični senzorski čvor samoodrživ i funkcionalan, i da je moguće potpuno izbaciti punjive baterije. Na ovaj način se otvara put ka instaliranju BSM-a poznatijeg kao „postavi i zaboravi“ (engl. „*deploy-and-forget*“) [17], gde se posle ugradnje čvora više ne vodi računa o njegovom održavanju. Upravo kao najvažniji doprinos smatra se uticaj na troškove održavanja, koji su smanjeni na minimum, jer nije potrebno trošiti ekonomska sredstva na zamenu baterija i popravku čvorova.

Ispitane su teorijske i praktične mogućnosti razvijenog bežičnog senzorskog čvora o potencijalnim primenama i proširivanju funkcionalnosti. Posebno je analizirana fleksibilnost u primeni za praćenje različitih parametara životne sredine, kroz eksperimente gde su na čvor povezani komercijalno dostupni senzori. Testirana je funkcionalnost čvora sa novim, namensko projektovanim senzorom. Konkretno, čvor je nadograđen jeftinim rešenjem za merenje nivoa površinskih i podzemnih voda [28]–[30]. U oba slučaja projektovani čvor se pokazao kao rešenje na koje se lako može nadograditi željena funkcionalnost, bilo da je u pitanju komercijalni proizvod ili namenski projektovano rešenje. Zaključak je da projektovani senzorski čvor osim opisanog doprinosa ima potencijala za buduća istraživanja u oblasti.

Kao rezultat istraživanja u ovoj oblasti objavljen je radu u časopisu kategorije M23:

- Živorad Mihajlović, Vladimir Milosavljević, Ana Joža, Vladimir Rajs, Mirjana Damjanović, Miloš Živanov, „Surface and Underground Water Level Monitoring Using Wireless Sensor Node with Energy Harvesting Support“, *Elektronika I Ir Elektrotehnika*, 2016, Vol. 22, No 5, pp. 62-68, ISSN 1392-1215,

kao i saopštenja na međunarodnim konferencijama kategorije M33:

- Živorad Mihajlović, Ana Joža, Vladimir Milosavljević, Vladimir Rajs, Miloš Živanov, „Energy Harvesting Wireless Sensor Node for Monitoring of Surface Water“, 21. International Conference on Automation and Computing (ICAC),

Glasgow: University of Strathclyde, Glasgow, UK, 11-12 Septembar, 2015, pp. 102-107, ISBN 978-0-9926801-0-7.

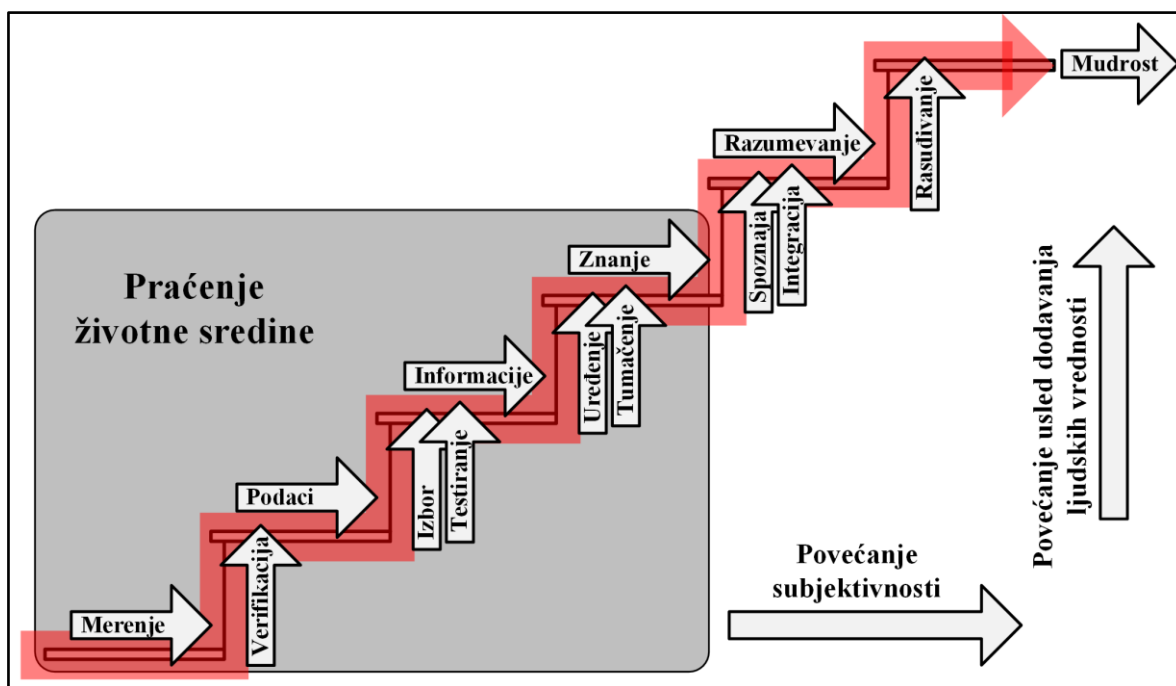
- Živorad Mihajlović, Vladimir Milosavljević, Dragana Vasiljević, Ana Joža, Vladimir Rajs, Miloš Živanov, „Implementation of Wearable Energy Harvesting Wireless Sensor Node using Ink-Jet Printing on Flexible Substrate“, 5. Mediterranean Conference on Embedded Computing - MECO, Bar: University of Montenegro, 12-16 Jun, 2016, pp. 100-103, ISBN 978-9940-9436-6-0.
- Živorad Mihajlović, Vladimir Milosavljević, Ana Joža, Mirjana Damnjanović, „Modular WSN Node for Environmental Monitoring with Energy Harvesting Support“, 2. IEEE Zooming Innovation in Consumer Electronics International Conference - ZINC, Novi Sad: RT-RK Institute for Computer Based Systems, 31-1 Jun, 2017, pp. 47-50, ISBN 978-1-5386-0865-4.
- Juhas Đorđe, Vladimir Rajs, Živorad Mihajlović, „Pametni nosivi uređaj sa prikupljanjem energije iz okoline za praćenje parametara u okruženju korisnika“, Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, 2016, No 15/2016, pp. 3121-3124, ISSN 0350-428X.

2. Bežične senzorske mreže i životna sredina

2.1 Praćenje životne sredine

Praćenje životne sredine podrazumeva posmatranje i proučavanje prirodnog okruženja. Svrha proučavanja životne sredine je prikupljanje podataka na osnovu kojih se dobija bolje razumevanje našeg prirodnog okruženja.

Razlog veće potrebe za praćenjem životne sredine je sve intezivniji uticaj ljudi na svoju okolinu, koji je prevashodno prouzrokovan povećanjem svetske populacije. Osim boljeg razumevanja, cilj praćenja životne sredine je da pokaže trenutni uticaj ljudskog ponašanja i delovanja na svoju okolinu, ali i da se intezivno radi na njenom očuvanju. Tipični primeri praćenja životne sredine su praćenje kvaliteta vodenih zaliha, praćenje zagađenja vazduha, zaštita prirodnih resursa, praćenje uticaja na vremenske prilike, praćenje ugroženih životinja i mnogi drugi. U naučnom smislu u toku procesa praćenja životne sredine, osnovni cilj je da se prikupe podaci o parametrima na osnovu kojih se može doći do korisnog saznanja.



Slika 2.1 Stepenice znanja gde su prikazana naučna posmatranja i merenja sa ciljem da se bolje razume životna sredina i da se prikaže put ka pametnom donošenju odluka [31]

Aktivnosti praćenja životne sredine se mogu objasniti korišćenjem stepenica znanja [31]. Na slici 2.1 se može videti da praćenje životne sredine predstavlja prva tri stepenika na putu ka saznanju.

Rezultat objektivnog posmatranja su kvalitetni podaci o parametrima na osnovu kojih se dolazi do vrednih informacija. Ovakvo znanje obično vodi ka poboljšanom razumevanju problema, što dalje vodi ka pametnom donošenju odluka. Naravno, treba imati u vidu da na donošenje odluka utiču i drugi faktori, uključujući političke i ekonomske, kao i razni socijalni faktori.

Iako je praćenje životne sredine u užem smislu predmet istraživanja fizike, hemije i biologije, sve više se pokazuje da je neophodna multidisciplinarnost u cilju generisanja što kvalitetnijih rezultata. Naučnicima koji se bave životnom sredinom je potrebno osnovno znanje iz oblasti kao što su matematika, statistika, računarske nauke, a poželjno je da naučnici iz ostalih oblasti, koji su na bilo kakav način uključeni u praćenje životne sredine, poseduju bazična znanja iz ove oblasti.

Praćenje životne sredine teži da odredi trenutno stanje promene okoline na osnovu analize reprezentativnog uzorka. Prikupljanje pravih uzoraka životne sredine je osnovni preduslov kvalitetne akvizicije podataka. Tipične tehnike prikupljanja uzoraka podrazumevaju fizičko zahvatanje uzorka, korišćenjem udaljenih stanica za uzorkovanje i udaljeno merenje.

Fizičko uzimanje uzorka iz okoline zahteva prisustvo stručnog osoblja na terenu koje ručno uzima uzorak i šalje ga u odgovarajuću laboratoriju na dalju analizu. Jasno je da u ovom slučaju uzimanje uzorka nije učestao proces. Ovaj postupak se i danas koristi u pojedinim slučajevima kada je neophodno sprovesti složene analize na terenu. Pošto je neophodno angažovati ljudsku radnu snagu, ovaj postupak se smatra skupim. Takođe, analiza uzoraka zahteva određeno vreme.

Stanice za uzorkovanje podrazumevaju uzimanje uzoraka bez prisustva čoveka u tačno definisanim vremenskim intervalima. Uzorci se zatim prikupljaju i šalju na analizu. Posebna vrsta stanica poseduje senzore na terenu, tako da nije neophodno slati uzorke u laboratoriju na analizu. Dakle, na terenu koji se prati postoji skup senzora koji prate određene parametre. Rezultati uzorkovanja se čuvaju lokalno ili se šalju bežično na udaljenu lokaciju. Na ovaj način se značajno smanjuje upotreba skupe radne snage.

Udaljeno merenje predstavlja postupak praćenja okoline sa određenog rastojanja, na primer korišćenjem satelita, dronova ili aviona. Ova vrsta merenja često uključuje analizu slike. Pošto se merenje vrši sa određenog rastojanja, postupak udaljenog merenja omogućava pokrivanje velikog prostora, često nepristupačnog i opasnog, ali s druge strane, rezolucija merenja je često veoma mala.

Praćenje životne sredine vrši se na osnovu prikupljanja vrednosti reprezentativnih parametara na osnovu kojih se mogu dobiti informacije o trenutnom stanju određenog uticaja. Nisu svi parametri relevantni za formiranje kvalitetnih informacija o uticaju na okolinu. Zato je izbor parametara sredine koji se prate veoma važan za oblast zaštite životne sredine.

2.2 Parametri životne sredine

Praćenje životne sredine podrazumeva prikupljanje podataka o velikom broju parametara koji služe kao model prikaza trenutnog stanja okoline. Broj potencijalnih parametara životne sredine koji se mogu pratiti je ogroman. Ipak, parametri koji imaju značajan uticaj na ljudsko zdravlje i blagostanje u praksi imaju veći prioritet. Uobičajeno je da se u domenu životne sredine vrši podela praćenja parametara na osnovu mesta njihovog postojanja. Razlikuju se parametri u vazduhu, vodi, zemljištu i parametri vezani za živi svet, pre svega biljke i životinje. Jasno je da ne postoje tačno utvrđene granice postojanja određenih parametara u okviru jedne sredine, tako da je često predmet proučavanja međusobni uticaj i promena parametara između različitih sredina. Na primer, ukoliko posmatramo određen parametar koji je definisan kao koncentracija neke supstance, od interesa je proučiti izvor i brzinu njenog nastajanja u svim sredinama, brzinu njenog nestajanja iz određene sredine, ili prelazak u drugu sredinu. Dakle, mora se poznavati konačan uticaj supstance, da li se ona nepovratno skladišti u nekoj sredini ili nastavlja da kruži po nekom obrascu.

2.2.1 Parametri životne sredine u vazduhu

Za vazduh, pre svega za troposferski deo atmosfere, vreme prisustva neke supstance relativno je kratko i meri se nedeljama ili manje. Razlika ipak postoji ako je u pitanju stratosfera gde supstance mogu biti prisutne znatno duže. Može se smatrati da u atmosferi vladaju transportni mehanizmi sa brzim i efikasnim mešanjem svojih sastavnih delova, što omogućava dobijanje preciznih reprezentativnih merenja na osnovu malog broja izabраниh tačaka merenja. Prilikom praćenja koncentracija različitih supstanci neophodno je uzeti u razmatranje da li se posmatrana supstanca javlja kao gas, čestica ili je sjedinjena sa nekom česticom. Od interesa je pratiti sadržaj neke supstance u vazduhu, ali je takođe bitno da se ispituju i svi mogući prelazi na sredine kao što su voda i zemljište. Slede primeri važnih parametara za praćenje u vazduhu.

Ugljen-dioksid (CO₂). Stvaranje CO₂ je dominantni deo prirodnih procesa sve do početka intenzivnog korišćenja fosilnih goriva. Povećanje emitovanih količina i koncentracije CO₂ dovodi do efekta staklene bašte, što direktno utiče na klimatske promene [32]. Ipak, praćenje koncentracije CO₂ nije uvek vezan za klimatske promene. Postoje mnoge druge primene kao što su, na primer, praćenje CO₂ u pećinama [33], zatim praćenje CO₂ u vulkanima [7], u poljoprivrednoj proizvodnji [8].

Sumpor dioksid (SO₂) i hidrogen sulfid (H₂S). Praćenje koncentracije ovih gasova je od interesa zbog njihovog uticaja na zdravlje ljudi i biljaka, ali i zbog uticaja na atmosfersku vidljivost i korozivnog dejstva na materijale. Proizvod su procesa sagorevanja fosilnih goriva koja sadrže sumpor, a mogu se pojaviti i u sastavu deponijskog gasa [13].

Ugljen-monoksid (CO). Pošto je ovaj gas veoma otrovan, praćenje koncentracije je od interesa za očuvanje zdravlja ljudi [34]. Obično se javlja kao proizvod ljudskih aktivnosti kao što je nepotpuno sagorevanje fosilnih goriva. Praćenje je više zastupljeno u urbanim sredinama i industriji, a manje u prirodi iako se ovaj gas osim veštačkim putem javlja i kao proizvod raznih prirodnih procesa. U prirodi, veoma često izaziva trovanja sa smrtnim slučajevima na mestima kao što su pećine, bunari i drugim zatvorenim prostorima sa odsustvom prirodne ventilacije.

Azotsuboksid (N_2O), azot oksid (NO), azot dioksid (NO_2) i ostali azotni oksidi. Najčešće se javljaju usled ljudskih aktivnosti i predstavljaju ozbiljne zagađivače vazduha, utiču na efekat staklene bašte i formiraju smog i kisele kiše. Dokazano je da utiču na stvaranje i razgradnju ozona i na efekat staklene bašte. Reaguju sa amonijakom i formiraju azotnu kiselinu koja vazduhom može da proдре u pluća čoveka i izazove ozbiljna oštećenja. Ipak nisu svi uticaji ovih gasova štetni.

Ozon (O_3). Ova alotropska modifikacija kiseonika sastavni je deo ozonskog omotača u stratosferi gde štiti Zemlju od štetnog ultraljubičastog zračenja. Međutim, u donjim slojevima troposfere njegov uticaj je štetan za živi svet. Izaziva plućna oboljenja i oštećuje vegetaciju.

Amonijak (NH_3). Većina amonijaka u atmosferi je proizvod bioloških procesa, mada se povećane koncentracije mogu pronaći u blizini industrijskih gradova. Zagađenje amonijakom dovodi do stvaranja kiselog zemljišta, što direktno utiče na razvoj biljnog sveta.

Aerosoli i čestice. Uticaj ovih supstanci na živi svet pokriva širok opseg od fizičkog do patološkog uticaja, direktnog ili indirektnog. Čestice manje od $0.1 \mu m$ u prečniku učestvuju u formiranju padavina, magli i sumaglica. Veće čestice utiču na vidljivost i zdravlje čoveka.

Insekticidi, herbicidi i drugi biotoksini. Postoji puno analiza uticaja insekticida, herbicida i drugih biotoksina na životnu sredinu. Vazduh kao dinamična sredina pogoduje širenju ovih supstanci tako da je rana detekcija u atmosferi način da se relativno brzo odredi uticaj na okolinu.

2.2.2 Parametri životne sredine u vodi

U poređenju sa vazduhom, voda je sredina koja se inertnije ponaša u pogledu razmene supstanci sa okolinom. Zaključak je da promene u vodi i njenoj okolini ostavljaju posledice koje traju duže, tako da detekcija tih promena može da obezbedi važne informacije o stanju životne sredine. S druge strane, voda je neophodna za život svih bića na planeti, tako da poremećaji u njenom kvalitetu imaju direktan uticaj na okolinu. Postoji više pristupa kod praćenja parametara u vodi, na primer, procesi i očekivani rezultati se razlikuju kod praćenja parametara sveže i okeanske vode. Sledi kratak opis reprezentativnih parametara koji se najčešće prate u vodi.

Temperatura. Posledice promene temperature vode utiču na njena fizička i hemijska svojstva, indirektno utiču na fotosintezu i metabolizam podvodnih biljaka, toksičnost pojedinih jedinjenja, rastvorljivost kiseonika i drugih gasova, provodljivost, salinitet, kiselost i druge parametre.

Provodljivost, salinitet i ukupno rastvorene materije. Iako su ovo u praksi tri različita parametra, zbog jake međusobne korelacije se često proučavaju zajedno. Provodljivost pokazuje koliko voda podržava električni protok, što je u direktnoj vezi sa koncentracijom prisutnih jona. Joni nastaju od rastvorenih soli, alkala, hlorida, sulfida i jedinjenja ugljenika. Ukoliko je provodljivost veća, veće je i prisustvo rastvorenih jona. Ovo ukazuje na važnost merenja provodnosti ukoliko je cilj da se odredi koncentracija pojedinih supstanci na osnovu prisustva jona. Na osnovu promene konduktivnosti može se rano zaključiti o nekoj promeni u

vodenom sistemu, a uzroci takvih promena mogu biti poplave, isparavanje ili ljudski faktor. Salinitet predstavlja ukupnu koncentraciju soli u vodi. Rastvorene soli u vodi povećavaju provodljivost, što utiče na jaku međusobnu korelaciju. Zato se merenje saliniteta često izvodi indirektno preko merenja provodnosti. Osim soli, u vodi se mogu javiti i druga jedinjenja i rastvorene organske materije. U ovom slučaju često se koristi termin ukupno rastvorene materije u vodi. U čistoj i nezagađenoj vodi ukupne rastvorene materije mogu se aproksimirati salinitetom, što nije slučaj kod zagađene vode.

Rastvoreni kiseonik. Rastvoreni kiseonik je izuzetno važan parametar za procenu kvaliteta vode, jer direktno utiče na žive organizme koji u njoj žive. Rastvoreni kiseonik predstavlja slobodnu alotropsku modifikaciju kiseonika (O_2), koji nije deo drugih jedinjenja. U vodi se povećava procesom difuzije iz vazduha ili kao bioproizvod vodenih biljaka. Na količinu rastvorenog kiseonika u vodi utiču temperatura, pritisak i salinitet. Ako rastvoreni kiseonik opadne ispod određene granice, posledice na živi svet mogu biti katastrofalne.

Aktivnost vodonikovih jona (pH). Kiselost ili baznost vode izražava se preko *pH* parametra. Postoje brojni faktori koji utiču na *pH* u vodi, prirodni i veštački. Ljudski uticaj je izražen preko kiselih kiša, otpadnih voda i rudarstva. Štetan uticaj postaje značajan ukoliko kiselost vode opadne ispod 5 ($pH < 5,0$) ili baznost vode poraste iznad 9.6 ($pH > 9,6$), od direktnog uticaja na živi svet do indirektnog, na primer, uticaja na rastvorljivost teških metala.

Zamućenost vode. Zamućenost predstavlja optičku vrednost čistoće vode i na osnovu ovog parametra može se odrediti kvalitet vode. Najveći uticaj na zamućenost imaju ukupno suspendovane čestice koje su veće od dva mikrometara. Ovde spadaju neorganske materije, bakterije i alge. Zamućenost vode je obično prvi pokazatelj zagađenja u vodi.

2.2.3 Parametri životne sredinu u zemljištu

Praćenje parametara u zemljištu je važno, jer predstavlja konačno odredište za većinu supstanci koje direktno dolaze u kontakt sa zemljištem ili indirektno preko okoline. Zemljište predstavlja prirodno telo koje dinamički intereaguje sa atmosferom, utiče na klimu, hidrološki ciklus i služi kao okolina za razvoj mnogih živih organizama. U zemljištu se odvija proces razgradnje živih organizama i njihovih produkata, što predstavlja deo važnog procesa kruženja materije u prirodi, neophodnog za obnavljanje života na Zemlji. Svaki poremećaj ovog procesa, direktno ili indirektno, trenutno ili dugoročno, utiče na životnu sredinu.

U hemijskom smislu, zemljište je raznovrsna mešavina vazduha, vode, neorganskih i organskih čvrstih materija i mikroorganizama (biljnih i životinjskih). U smislu praćenja životne sredine, od izuzetnog značaja je posmatranje promena neorganskih i organskih supstanci koje utiču negativno na živi svet. Zato se sa stanovišta životne sredine posmatraju parametri koji utiču na hemijske reakcije između zemljišta i važnih materija za ishranu biljaka, radioaktivne čestice, metali, metaloidi i organske materije. Znanje stečeno praćenjem ovih hemijskih reakcija treba da predvidi konačno stanje supstanci koje izazivaju zagađenje. Broj parametara koji se mogu pratiti je ogroman [35], a ovde je navedeno samo njih nekoliko koji su često predmet posmatranja.

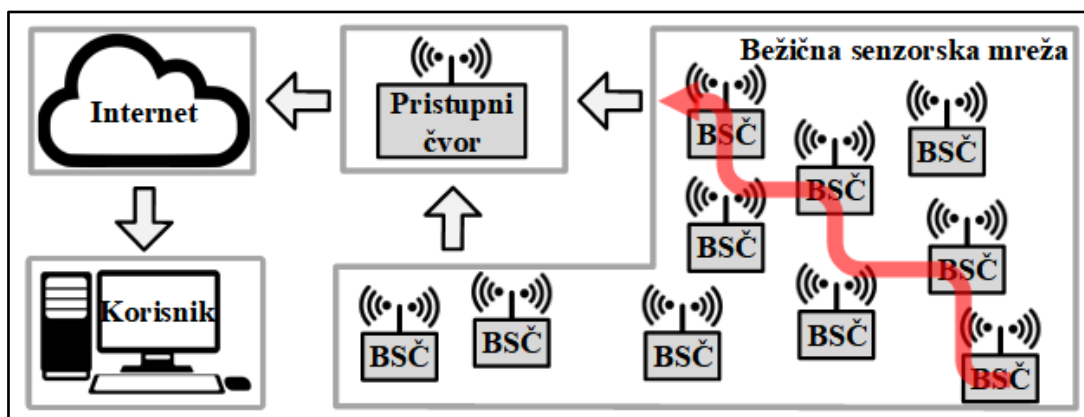
Teški metali. Pesticidi su počeli da se koriste sredinom devetnaestog veka i u prošlosti su u svom sastavu koristili teške metale kao što su olovo, arsen, bakar, soli cinka i dr. Iako je dobrobit korišćenja pesticida bila očevidna, kao uzrok dugogodišnjeg korišćenja došlo je do zagađenja voda i zemljišta teškim metalima koja su znatno prevazilazila normalne granice. Kako bi se odredio procenat zagađenja zemljišta pesticidima, najčešće se u analizi posmatra koncentracija pomenutih teških metala [36].

Kiselost zemljišta. Sa stanovišta životne sredine, pogotovo na prostorima gde je pojava kiselih kiša intezivna, od izuzetne važnosti je pratiti kiselost zemljišta i indirektno uticaj kiselosti na poljoprivrednu proizvodnju. Naime, u svrhu povećanja prihoda od poljoprivredne proizvodnje zemljištu se dodaju đubriva, međutim, ukoliko je zemljište kiselo, deo đubriva se nepovratno gubi u reakciji sa uzročnicima kiselosti.

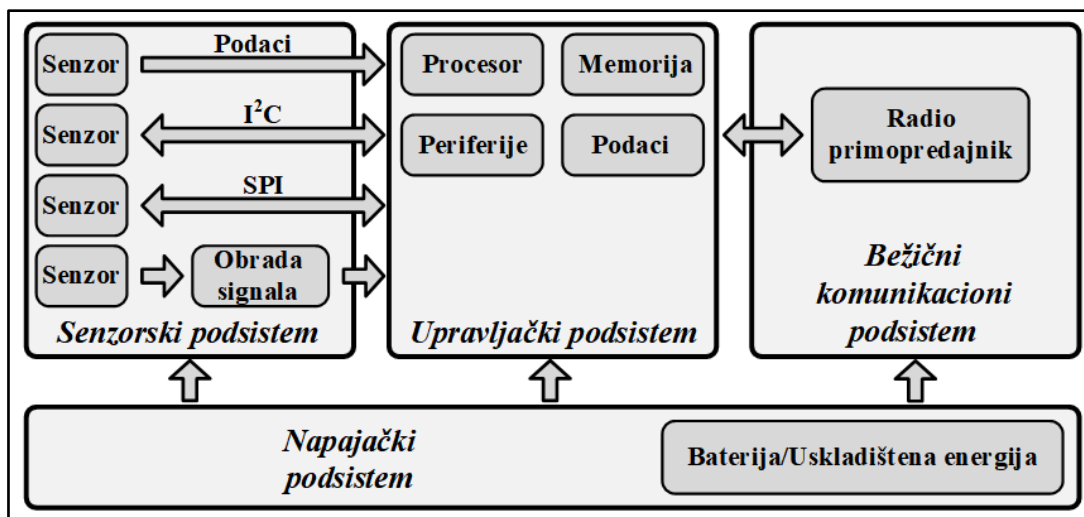
Ukupni organski ugljenik u zemljištu. Ukupna količina organskog ugljenika je jedan od najvažnijih pokazatelja kvaliteta zemljišta i produktivnosti. Ukoliko se organski ugljenik smanji, u zemljištu dolazi do smanjenja hranljivih materija, pogoršavanja strukture tla, smanjenja kapaciteta zadržavanja vode i dr.

2.3 Bežične senzorske mreže za praćenje parametara životne sredine

Pojam BSM-e postao je opšteprihvaćen naziv za skup elektronskih uređaja koji u svom sastavu imaju različite senzore, koji prikupljene podatke šalju bežično do susjednih uređaja, a indirektno do udaljene lokacije na arhiviranje i na dalju obradu i analizu. Slika 2.2 pokazuje arhitekturu jedne BSM-e koja se sastoji od čvorova, pristupnog čvora i krajnjeg korisnika koji preko interneta dobija podatke sa senzora, tj. o stanju okoline. Bežični senzorski čvorovi međusobno komuniciraju, a protok podataka konvergira ka pristupnom čvoru koji je na neki način povezan na sistem za arhiviranje, najčešće preko interneta. Razvoj jeftinih radio komunikacionih modula i raznovrsnih minijaturnih senzora, omogućili su da se pojavi čvor kao osnovna jedinica BSM-e, a koji se karakteriše malom cenom i dimenzijama.



Slika 2.2 Uprošćena arhitektura bežične senzorske mreže



Slika 2.3 Osnovni podsistemi jednog bežičnog senzorskog čvora: senzorski, komunikacioni, upravljački i podsistem za napajanje

Bežični senzorski čvor u širem smislu je elektronski uređaj sa malom potrošnjom energije, u svom sastavu ima jedan ili više senzora, procesor, memoriju, napajanje, radio komunikaciju, a u nekim slučajevima i neku vrstu aktuatora. Slika 2.3 prikazuje glavne podsisteme jednog čvora. Većina čvorova ima sličnu strukturu, bar na virtuelnom nivou ukoliko to nije hardverski realizovano.

U zavisnosti od okoline gde se čvorovi instaliraju, postoji veliki broj potencijalnih primena. Tipične primene su u vojnoj industriji, pametnim gradovima, poljoprivredi, praćenju zdravlja ljudi i mnoge druge [3], [10]–[12], [22], [27], [37].

Osim u zavisnosti od načina primene, BSM-e se mogu podeliti prema mnogim drugim aspektima. Na primer, na osnovu načina upravljanja energijom [38]–[40], zatim prema različitim algoritmima za definisanje putanja protoka informacija u okviru BSM-e tj. prema načinu rutiranja [41]–[43], prema načinu napajanja itd.

U ovoj disertaciji predmet razmatranja su BSM-e koje se koriste isključivo za praćenje parametara životne sredine. U užem smislu, razmatraće se bežični senzorski čvor kao osnovna jedinica BSM-e, čija je uloga da prikupi podatke o parametarima iz okoline. U zavisnosti da li se BSM-a i posmatrani parametar nalazi u zatvorenoj prostoriji ili izvan nje, postoji unutrašnje i spoljašnje praćenje parametara okoline. Prikupljanje podataka o parametrima kao što su temperatura, vlažnost i koncentracija ugljen-monoksida u stambenim ili javnim objektima su tipični primeri unutrašnjeg praćenja okoline. Primeri spoljašnjeg praćenja parametara su rano uočavanje poplava, zemljotresa, hemijskog zagađenja, posmatranje vulkana, životnog staništa, saobraćaja i vremenskih prilika. Posmatranje spoljašnje okoline koje se koristi isključivo za dobrobit poljoprivrede posebno se obrađuje u literaturi kao BSM-e u poljoprivredi [10]. Posmatranje spoljašnjih parametara je zahtevnije, jer je neophodno posedovati znanje o samoj okolini gde se vrši posmatranje. Osim toga, izazovi kao što su odsustvo infrastrukture i terenski uslovi dodatno komplikuju implementaciju BSM-e. U ovom radu su razmatrane upravo takve primene BSM-a, gde se posmatraju spoljašnji parametri u primenama gde postoji odsustvo

infrastrukture, u terenskim uslovim, a osim tehničkog znanja neophodno je posedovati osnovna znanja o posmatranoj okolini.

2.3.1 Izazovi kod bežičnih senzorskih mreža za praćenje životne sredine

Tokom proučavanja BSM-a za praćenje parametara životne sredine, prepoznato je više osnovnih karakteristika na osnovu kojih se mogu definisati zahtevi kao preporučene smernice u projektovanju [12], [44]. Postojanje zahteva treba da olakša i usmeri projektovanje, što je vrlo često izazov zbog izražene međusobne zavisnosti. Većina zahteva je direktno primenljiva na čvor kao osnovnu jedinicu BSM-e. Sledi opis reprezentativnih karakteristika BSM-e za praćenje parametara životne sredine, a na osnovu koji je mogu definisati zahtevi u projektovanju.

Cena. Cena ima važnu ulogu pri izboru određenog proizvoda, pa i potencijalnog rešenja za praćenje parametara životne sredine. Kod ovakvih rešenja dodatni problem predstavlja smanjena zainteresovanost privatnog sektora za ulaganje, jer nema direktnog povraćaja uloženog novca. Zato se oblast zaštite životne sredine uređuje zakonima koji primoravaju društvo da ispuni propisane norme, naročito ako je uticaj u vezi sa zdravljem ljudi. Za praćenje parametara koji nemaju direktne posledice na ljude i na osnovu kojih se treba zaključiti o okolini iz nekog drugog, pre svega naučnog aspekta, neophodno je prikupiti novac za realizaciju projekata koji se uklapaju u pomenuti opis. Vrlo često države finansiraju određene projekte iz budžeta ukoliko su u skladu sa opštim dobrom. Bilo da su u pitanju rešenja koja su obavezujuća zakonom ili rešenja nastala u okviru nekog projekta, ukoliko je cena BSM-e manja, povećava se konkurentnost ili se za ograničena finansijska sredstva može dobiti kvantitativno više rešenja. Na primer, ukoliko je budžetom jednog projekta moguće instalirati 1000 čvorova jedne vrste, a 5000 druge vrste, i ako oni imaju istu funkcionalnost, logičan pristup je izabrati drugo rešenje, jer se većim brojem čvorova pokriva veći teren.

Dimenzije. Smatra se da je čvor kvalitetniji i primenljiviji ukoliko su mu dimenzije manje. Manje dimenzije u konstrukciji znače korišćenje manje materijala, komponenti, manji su transportni troškovi i lakša ugradnja i održavanje na terenu, što indirektno utiče na jediničnu cenu čvora. S druge strane, uticaj na životnu sredinu je manji, tj. potrebno je uništiti manji deo terena i manje je uznemiravanje okoline. Tipičan primer je ugradnja čvorova na životinje. Pošto je životna sredina vrlo dinamična, sasvim je izvesno da se pojedini čvorovi nepovratno izgube. U ovom slučaju manje dimenzije generišu manje otpada i doprinose manjem uticaj na okolinu u obliku zagađenja.

Štednja i upravljanje energijom. Za razliku od BSM-a za praćenje unutrašnjih parametara, gde često postoji mrežno napajanje i gde se lako vrši zamena ili punjenje baterija, kod BSM-a za praćenje spoljašnjih parametara to nije slučaj. Često zbog nepristupačnog, surovog i hazardnog terena nije moguće zameniti baterije. Zato je štednja energije i upravljanje energijom izuzetno važna karakteristika. Čvor mora biti u mogućnosti da što duže obavlja svoju funkciju, a to se može ostvariti korišćenjem izvora energije većeg kapaciteta ili štednjom energije. Većina čvorova se projektuje da minimalno troši energiju korišćenjem različitih režima rada, kao što su režim uspavanosti, pripravnosti i aktivni režim. Većinu vremena čvor provede u uspavanom stanju, kada je potrošnja energije minimalna. Ipak, na ukupnu potrošnju

dominantno utiče aktivni režim, jer se tada vrši merenje i bežično slanje podataka, a to su procesi koji zahtevaju najviše energije.

Pouzdanost i robusnost. Već pomenuti teški terenski uslovi zahtevaju da čvorovi budu pouzdani i robusni. Pouzdanost predstavlja osobinu čvora da u raznim uslovima ostane funkcionalan, a uglavnom se ostvaruje kvalitetnom hardverskom realizacijom i firmverom koji je sposoban da reaguje na sva moguća stanja. Robusnost se odnosi na sposobnost čvora da izdrži promenljive vremenske uslove, ali i razne fizičke poremećaje. Sastavne komponente moraju biti u stanju da podnesu širok opseg promena spoljašnje temperature, a kućište mora da zaštiti unutrašnjost čvora od atmosferskih padavina. Ukoliko se čvor instalira direktno na životinjama, na putevima ili drugim sličnim mestima, neophodno je obezbediti zaštitu od direktnog fizičkog uticaja.

Prilagodljivost. Prilagodljivost BSM-e je sposobnost da se isto rešenje, bez ili uz minimalne promene, može koristiti za veliki broj različitih primena. Zbog postojanja puno različitih parametara životne sredine, prilagodljivost je veoma bitna karakteristika. BSM-a koja može da prati veliki broj parametara u stanju je da se prilagodi većem broju različitih primena. U praksi ovo znači da čvor, kao osnovna jedinica BSM-e, treba da podržava veliki broj komercijalnih ili namenski projektovanih senzora. Broj potencijalno upotrebljivih senzora može da bude popriličan, a međusobno se razlikuju po karakteristikama, interfejsima, napajanjima i metodama merenja i drugim parametrima, što znači da više senzora u okviru jednog čvora povećava broj elektronskih komponenti, a to direktno utiče na cenu i dimenzije čvora. Dakle, sa stanovišta prilagodljivosti neophodno je pronaći optimum u odnosu na cenu i dimenzije. Zato je neophodno prilikom projektovanja čvora ugraditi elektronske komponente koje podržavaju širok skup potencijalnih senzora. Danas se proizvođači elektronskih komponentata i senzora trude da u toku projektovanja koriste određene standarde. Na ovaj način se postiže kompatibilnost između proizvođača elektronskih komponenti i senzora. Međutim, raznolikost komponenti, senzora i standarda je problem koji se neće lako rešiti u bliskoj budućnosti.

Skalabilnost. U zavisnosti od parametara koji se prate, broj potrebnih čvorova može drastično da varira. Po samoj definiciji, BSM-a treba da podrži ogroman broj čvorova koji se kreće nekoliko desetina hiljada, a sasvim je izvesno da će u budućnosti taj broj biti veći. Zato je važno da čvor podržava skalabilnost. Skalabilnost omogućava da se BSM-e ponašaju na isti način, bilo da je u pitanju 100 ili 10.000 čvorova. Takođe, skalabilnost omogućava lako proširenje implementirane BSM-e dodatnim brojem čvorova, najčešće u cilju pokrivanja većeg terena. U praksi ovo znači da čvor treba da podrži različite topologije BSM-a kao što su „zvezda“ (engl. *Star* – zvezda) ili „multihop“ (engl. *Multi-hop*) [11], [12], [45].

Udaljeno upravljanje i konfigurisanje. Kod čvorova sa različitim tipovima senzora koji su instalirani na udaljenim lokacijama u promenljivim terenskim uslovima, potrebno je povremeno ponovo podesiti određene parametre ili funkcionalnost, tj. treba ih ponovo konfigurisati. Postoje razni načini konfigurisanja, od jednostavnog komandnog pristupa, gde čvor menja funkcionalnost na osnovu bežično primljene komande koja je podržana u firmveru,

pa sve do „programiranja u vazduhu“ (engl. *Over the Air Programming – OTA*), gde se ceo firmver čvora ažurira novim preko bežične komunikacije.

Internet podrška. Ukoliko je BSM-a povezana direktno ili indirektno na internet i ukoliko svaki čvor poseduje jedinstvenu adresu, takva mrežna struktura podržava međusobno umrežavanje koje se jednim terminom naziva „internet stvari“. Kod ovakve mrežne strukture se povećava efikasnost, tačnost i ekonomska korist, jer omogućava direktniju integraciju fizičkog sveta i računarskih sistema. U praktičnoj realizaciji ovo znači da čvorovi treba da podržavaju nov internet protokol označen kao „internet protokol verzija 6“ (engl. *IPv6 - Internet Protocol version 6*).

Postoji još mnogo drugih karakteristika i zahteva BSM-a, ali je ocenjeno da u oblasti praćenja parametara životne sredine nemaju toliku važnost kao gore navedeni. Ostvarivanje pojedinih zahteva povećava kompleksnost i cenu čvora, što je u suprotnosti sa definisanim ciljem, da se cena što više smanji.

2.4 Korišćenje bežičnih senzorskih mreža u praćenju parametra životne sredine

U naučnoj literaturi postoji puno primera realizacije BSM-a za praćenje parametara okoline. Ovde je obrađeno nekoliko karakterističnih primera iz različitih oblasti primene kako bi se stekao uvid u problematiku pomenutih BSM-a i bolje razumeli izazovi u praktičnoj realizaciji.

2.4.1 Praćenje parametara u poljoprivredi

Uvezivanje tehnologije i poljoprivrede je veoma aktuelna tema, jer ekonomska ulaganja omogućavaju veću poljoprivrednu proizvodnju i dobit. BSM-e se koriste za automatizaciju navodnjavanja, đubrenja, prskanja insekata, pa čak i za praćenje štetočina [10]. Naročito je interesantna primena BSM-a u navodnjavanju, jer se na ovaj način štedi voda, koja je sve ograničeniji resurs u svetu. Autori su u radu [46] otišli korak dalje i predstavili automatski sistem za navodnjavanje i opisali pogodnosti ovakvog rešenja kao što su prilagodljivost tipu useva, otvorenom ili zatvorenom prostoru za uzgajanje, pa čak i mogućnost da se primene različiti planovi za uzgajanje iste kulture. U radu [37] je predstavljena BSM-a bazirana na komercijalnim senzorskim čvorovima pod nazivom „*TelosB*“ čija je namena praćenje štetočina. Na definisane intervale vremena uzima se slika iz polja, čijom se analizom utvrđuje stepen uticaja štetočina i na osnovu kojih se preduzimaju neophodne mere.

2.4.2 Praćenje životnog staništa

Pod praćenjem životnog staništa se podrazumeva posmatranje prostora gde žive i razvijaju se životinje i biljke u svom prirodnom okruženju. Ovaj tip praćenja nastoji da odredi stepen autonomije određenih vrsta i da se spreči bilo kakav poremećaj kod životinja i biljaka. Sistemi bazirani na BSM-a koji se koriste za praćenje biljaka su u velikoj meri slični sa sistemima koji se koriste u poljoprivredi.

Praćenje staništa se realizuje praćenjem parametara sredine u vodi, vazduhu i zemljištu, jer se bilo kakve promene u ovim sredinama odražavaju na živi svet. Praćenje parametara vode je tipičan primer, zbog tendencije da usled kruženja u prirodi akumulira materije iz zemljišta i vazduha. Vrednosti određenih parametara u vodi mogu da pokažu trenutno stanje životnog staništa. U radu [47] je opisan jedan namenski bežični senzorski sistem za praćenje kvaliteta voda. Sistem je projektovan u skladu sa zahtevima za malom potrošnjom energije, pogotovo u uspavanom stanju, reda veličine nekoliko mikroampera, i malom cenom uz laku implementaciju i proširivanje. Za napajanje je predviđena litijum jonska baterija, što predstavlja manu ovog sistema za primene u terenskim i izolovanim uslovima.

Za razliku od biljaka, praćenje životinja i pridruženih parametara predstavlja veliki izazov, jer se osim na pokretljivost životinja mora voditi računa da se ne remeti njihov svakodnevni život. Autori su u [19] izložili probleme i predstavili rešenje za praćenje divljih životinja pod nazivom „EcoNet“, gde su detaljnije razmatrani realizacija i ugradnja sistema, kao i način korišćenja sistema za dobijanje relevantnih podataka.

2.4.3 Praćenje kvaliteta vazduha i uticaja na efekat staklene bašte

Trenutno aktuelne teme na svetskom nivou o klimatskim promenama i efektu staklene bašte motivisale su mnoge istraživače da daju svoj doprinos u ovoj oblasti. Istraživanja su pre svega usmerena ka određivanju uticaja ljudskih aktivnosti na promenu kvaliteta vazduha. U ovu svrhu često se koriste uređaji poznatiji kao merne stanice.

Tipičan primer realizacije mernih stanica opisani su u radovima [16], [48]–[50]. U radu [16] je predstavljena mobilna merna stanica za praćenje kvaliteta vazduha u urbanim sredinama i analiziran je mogući pristup koji može da dovede do značajnog smanjenja broja potrebnih senzora za merenje koncentracije gasova, bez gubljenja na kvalitetu merenja.

Na efekat staklene bašte najveći uticaj ima CO₂ u atmosferi. Zato su autori u [32] predstavili detaljan primer projektovanja merne stanice za praćenje CO₂, od hardverske realizacije do aplikacije koja koristi rezultate merenja. Slično istraživanje su predstavili autori u [51], ali je naglasak na praćenju CO₂ u urbanim sredinama i pokušaju da se odredi slika uticaja više na lokalnom nego na globalnom nivou. Pored CO₂, mnogi drugi gasovi imaju uticaj na efekat staklene bašte, a metan (CH₄) se smatra jednim od uticajnijih gasova. Osim prirodnim putem, nastaje i usled ljudskih aktivnosti, na primer na deponijama smeća, gde se ovaj gas prikuplja i koristi kao gorivo, ili bar sagoreva u atmosferi [13], [15].

Osim praćenja CO₂, razvojem dostupnih komercijalnih senzora sve više se koriste BSM-e koje su u mogućnosti da prate koncentracije više različitih gasova odjednom. Primer napredne BSM-e za praćenje kvaliteta vazduha u unutrašnjim i spoljašnjim uslovima dat je u [52]. Predstavljeno rešenje se odlikuje naprednim procesiranjem podataka i jednostavnim korisničkim interfejsom. Međutim, zbog relativno skupih senzora i kompleksnosti elektronskih kola, cena ovakvih uređaja je velika, a potrošnja energije značajna.

2.4.4 Specijalizovano korišćenje bežičnih senzorskih mreža

Brojni su primeri uspešne primene BSM-e za praćenje vrlo specifičnih parametara životne sredine. Jedan primer je praćenje aktivnosti vulkana [18]. U ovom radu je opisano rešenje namenjeno isključivo za praćenje seizmičke aktivnosti za potrebe pravovremenog upozorenja populacije od moguće erupcije. Čitava BSM-a je osmišljena kao privremeno ili trajno rešenje za praćenje aktivnosti vulkana, bazirana je na otvorenom softveru i delimično na standardnim protokolima. Ipak, evidentno je da cena implementacije sistema nije mala, računajući i redovno održavanje usled zamene olovnih baterija. Treba napomenuti da su prostori sa vulkanima često nepristupačni i potencijalno opasni usled čestog prisustva otrovnih gasova, tako da ugradnja i održavanje ovakvog sistema predstavljaju pravi ekonomski i logistički izazov.

Praćenje parametara unutar pećina je još jedan primer uspešnog specijalizovanog korišćenja BSM-a [20]. U ovom radu je opisan sistem koji se sastoji iz stacionarnih i mobilnih čvorova, koji međusobno preko kratkodometne radio komunikacije prenose glasovne poruke. Tokom istraživanja pećine instaliraju se stacionarni čvorovi, dok istraživači sa sobom nose mobilne čvorove, koji im omogućavaju da komuniciraju sa nadzornim timom izvan pećine. Rešenje je baterijski napajano i vreme autonomije je oko sedam dana.

Na osnovu proučenih primera, može se zaključiti da se BSM-e sve više koriste za praćenje parametara životne sredine, ali da su postojeća rešenja uglavnom usko orijentisana ka određenoj primeni. Ne postoje rešenja koja nude univerzalnost u primeni, ili bar tako nisu planirana i predstavljena.

2.5 Životni vek bežičnih senzorskih mreža za praćenje parametara životne sredine

Svrha BSM-e koja je instalirana na nekom prostoru je da prikupi podatke o svojoj okolini i da ih pouzdano prenese do korisnika. Idealna BSM-a je sistem koji je u stanju da sa pouzdanošću od 100% prenese podatke sa čvorova, čak i u slučaju ispada pojedinih čvorova, a da pri ovom procesu nema potrošnje energije. Jasno je da u praksi pouzdanost nikada nije 100%, da je za rad čvorova neophodna izvesna količina energije, a usled utroška energije, neočekivanih kvarova i drugih razloga životni vek mreže je uvek ograničen. Od svih izazova u radu, potrošnja energije predstavlja dominantno ograničenje i direktno utiče na životni vek BSM-e. Iako je svaki čvor projektovan da u svom sastavu ima elektronske komponente i senzore sa malom potrošnjom, da u toku rada štedi energiju, korišćenje bežične radio komunikacije, kao dominantnog potrošača, drastično utiče na ukupnu potrošnju.

Sa ciljem da se produži životni vek BSM-e, za projektovanje čvorova se koriste raznovrsne metode za redukciju potrošnje, kako na hardverskom tako i na softverskom nivou. Ulaže se napor u istraživanju, razvoju i standardizaciji bežičnih primopredajnika veoma male potrošnje [38]. Osim težnje da se potrošnja energije minimizuje na nivou jediničnog čvora, moguće je primeniti i mnoge tehnike na nivou cele BSM-e. Jedan od načina je da se primene odgovarajući štedljivi protokoli rutiranja. Protokol za rutiranje opisuje način na koji čvorovi međusobno komuniciraju. Jasno je da je protokol za rutiranje bolji ukoliko se za prenos

podataka troši manje energije. Primeri pojedinih protokola rutiranja mogu se naći u radovima [39]–[41], [53]. Pored raznih protokola za rutiranje, postoji puno dostupnih istraživanja koja obrađuju različite tehnike upravljanja energijom, koje nisu direktno u vezi sa protokolima za rutiranje. Pregled različitih tehnika upravljanja energijom dat je u radovima [21], [54].

Čvorovi koriste baterije sa ograničenim kapacitetom kao izvor energije, pa je razumljivo interesovanje naučne zajednice za istraživanje štedljivih protokola rutiranja i pametnim upravljanjem potrošnjom energije u okviru BSM-e. Potencijalno veliki broj čvorova čini baterije pogodnim izvorom energije, jer su malih dimenzija, a ipak poseduju veliku specifičnu energiju (gustinu energije), reda od 20 do 150 Wh/kg [17].

Baterije se dele na primarne i sekundarne. Primarne, ili nepunjive baterije, nemaju sposobnost dopunjavanja, tj. imaju kapacitet koji je ograničen unutrašnjim hemijskim reakcijama. Ukoliko postoji potreba da se primarnim baterijama produži životni vek BSM-e, neophodno je koristiti baterije većeg kapaciteta. Međutim, veći kapacitet znači da su baterije veće po dimenzijama i ceni, što direktno utiče na dimenzije, cenu čvora i prema tome BSM-e.

Korišćenjem sekundarnih baterija koje imaju sposobnost punjenja, može se drastično uticati na životni vek BSM-e. Jednostavnim dopunjavanjem baterija u toku redovnog održavanja produžuje se životni vek. Međutim, za potrebe praćenja parametara okoline u nepristupačnim, opasnim i hazardnim terenima, zamena i dopunjavanje baterija predstavljaju ozbiljan ekonomski i logistički problem. Zato se sve više koriste čvorovi koji podržavaju prikupljanje energije iz okoline. Kod ovih čvorova se baterije dopunjavaju preko konvertora različitih tipova energije iz okoline u električnu energiju. Primer konvertora energije iz okoline je fotonaponska ćelija.

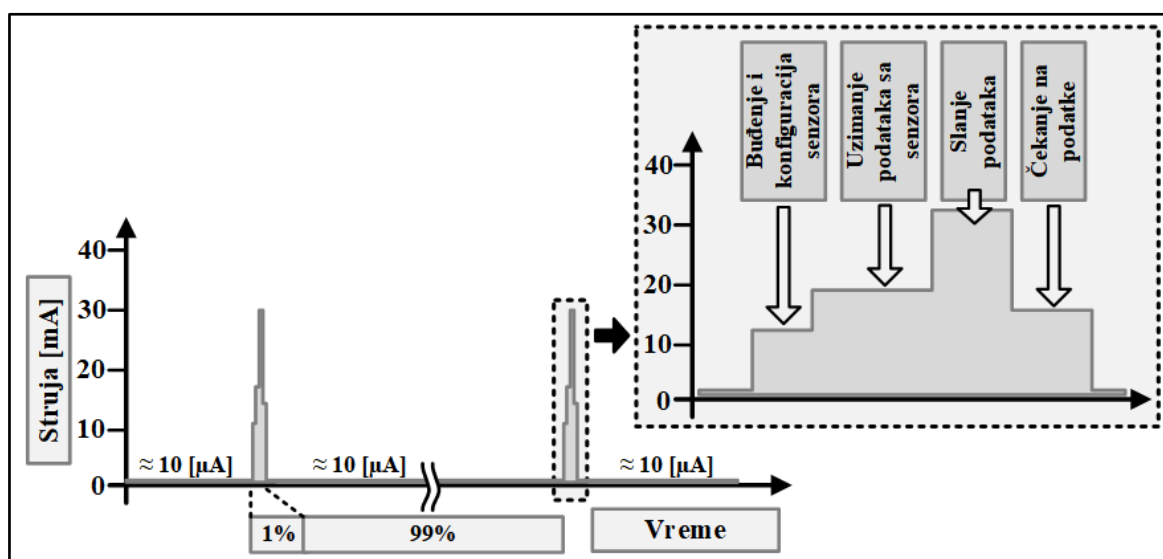
Generalni zaključak je da na životni vek BSM-e drastično utiče životni vek čvora kao osnovne gradivne jedinice. Životni vek čvora zavisi od količine dostupne energije i potrošnje, pre svega u aktivnom stanju tokom slanja podataka radio komunikacijom. Raznim protokolima rutiranja i tehnikama upravljanja energijom može se povećati životni vek BSM-e. Ipak, može se smatrati da čvor i njegova dostupna energija, dominantno utiču na životni vek BSM-e. Zato koncept prikupljanja energije iz okoline dobija sve veći prostor u naučnim krugovima, jer se na ovaj način rešavaju osnovni problemi moguće primene BSM-a sa velikim brojem čvorova, a to su problemi ograničenog kapaciteta energije i složenog održavanja u terenskim uslovima.

3. Samonapajajuće bežične senzorske mreže

3.1 Potrošnja i izvori energije kod bežičnog senzorskog čvora

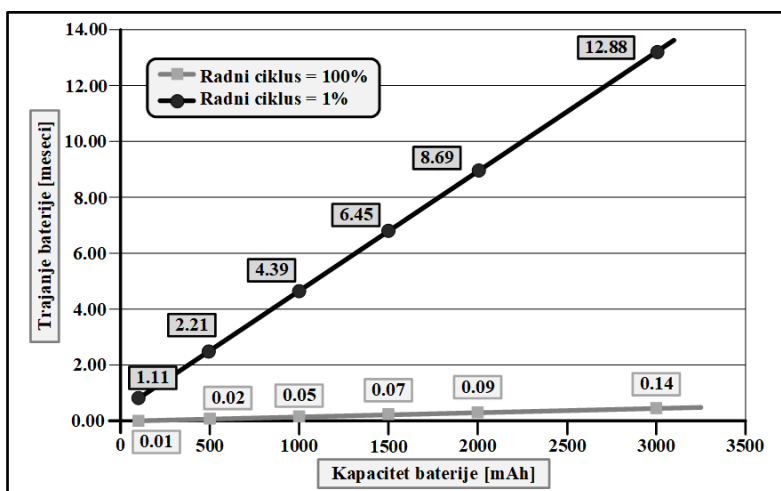
Svaki čvor se karakteriše svojom potrošnjom i izvorom energije. Izborom kvalitetnih elektronskih komponenti i primenom već standardnog načina rada čvorova, koji podrazumeva da većinu vremena provede u stanju spavanja uz povremeno buđenje radi očitavanja senzora i slanja podataka bežičnim putem, može se do određene granice uticati na ukupnu potrošnju. Aktuelni komercijalni čvorovi u uspavanom stanju troše energiju reda μW , dok u aktivnom stanju troše reda mW [21]. U zavisnosti od primene i od vrste korišćenih senzora potrošnja čvora se menja, ali je red veličine potrošnje uglavnom isti. Na primeru komercijalnog *MICA2* čvora [55], u uspavanom režimu, što znači većinom vremena, struja čvora je od 2 do 8 μA , a u aktivnom režimu u kratkim intervalima vremena struja je od 5 do 17 mA , kada se vrši merenje, procesiranje, primanje i slanje podataka [17]. Inače, ovakav način rada se zove „radni ciklus“ režim (engl. *Duty Cycle*). Na slici 3.1 prikazan je primer kako izgleda potrošnja čvora koji radi u aktivnom režimu samo 1% od ukupnog vremena. Zaključak je da se izborom komponenti i senzora može uticati na potrošnju, ali samo do određene granice.

U situaciji kada se izborom elektronskih komponenti i senzora ne može dalje uticati na smanjivanje potrošnje, jedini način da se produži životni vek čvora je povećanje kapaciteta izvora energije.

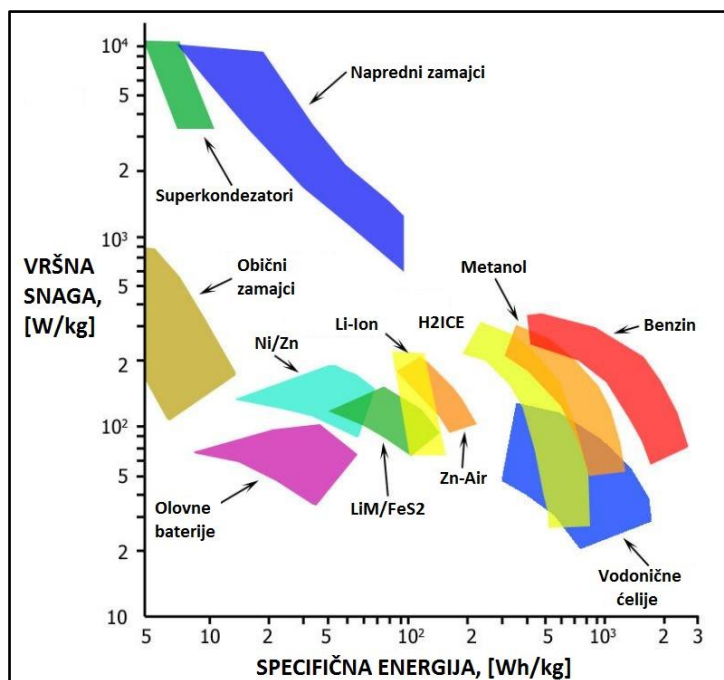


Slika 3.1 Grafički prikaza potrošnje čvora u aktivnom i uspavanom režimu rada

Na slici 3.2 je prikazan očekivani životni vek primarnih baterija različitog kapaciteta za komercijalni MICA2 čvor. Ukoliko čvor treba da ima male dimenzije, neophodno je koristiti što manje baterije. Međutim, manje baterije imaju kraći životni vek, na primer ako se koristi minijaturna baterija kapaciteta 250 mAh, energija se utroši posle nešto više od mesec dana. Kada se baterije potroše, može se smatrati da je čvor neupotrebljiv, bar dok se ne zamene punim. Životni vek baterije od godinu dana (ili manje) nije dovoljan da se može smatrati da je upotreba BSM-a, koje imaju na desetine hiljade čvorova, opravdana investicija u svakom smislu. Zamena baterija će produžiti životni vek, ali je to u praksi veliki ekonomski i logistički problem.



Slika 3.2 Očekivani životni vek baterija pri normalnom režimu rada (radni ciklus 100%) i u režimu štednje energije pri radnom ciklusu od 1% [17]



Slika 3.3 Poređenje različitih vrsta izvora napajanja u odnosu na specifičnu energiju i vršnu snagu koju mogu da obezbede [17]

Pored ograničenog kapaciteta i njihove zamene, postoji još jedan problem uzrokovan baterijama. Naime, sa slike 3.1 može se primetiti da su vršne vrednosti struje u trenutku bežičnog slanja podataka oko 0,35 A. Za tipičan napon napajanja od 3,0 V, baterija mora biti u stanju da obezbedi snagu od oko 1 W. Ovaj parametar baterije se često označava kao vršna snaga ili gustine snage, a korišćena jedinica je W/kg. Nisu sve baterije sposobne da obezbede potrebnu vršnu snagu, a osobine se degradiraju smanjivanjem dimenzija.

Dakle, napajanje čvora je „usko grlo“ za produženje životnog veka BSM-a. Sve više dostupnih tehnologija za skladištenje energije nastoji da doprinese u ovoj oblasti. Na slici 3.3 su prikazani različiti tipovi napajanja i izvora energije. Primarne i sekundarne baterije i superkondenzatori predstavljaju kompaktna rešenja i popularan izbor za napajanje čvorova.

Primarne baterije se odbacuju kada se sva energija usled hemijskih reakcija utroši. Iako se velika većina ovih baterija reciklira, deo baterija učestvuje na zagađenje prirode na direktan ili indirektan način (na primer u toku proizvodnje). Hemijske reakcije sekundarnih (punjivih) baterija su po prirodi reverzibilne. Jednostavnim dopunjavanjem sekundarnih baterija produžuje se životni vek čvora, a samim tim i BSM-e.

Superkondenzatori takođe predstavljaju reverzibilan elektrohemijski sistem koji se sve više koristi za napajanje čvorova. Iz više razloga superkondenzatori su povoljni za napajanje, a jedan od njih je izuzetna skalabilnost koja omogućava da se sa povećanjem dimenzija i težine povećavaju kapacitet i performanse. Karakteristike superkondenzatora, kao što su velika gustina energije, brzo punjenje, podrška za veliki broj ciklusa punjenja, temperaturna stabilnost, mala ekvivalentna serijska otpornost i mala struja curenja, pogoduju načinu rada većine bežičnih senzorskih čvorova. Slika 3.3 pokazuje odnos vršne snage izvora u odnosu na njegovu specifičnu energiju i može se videti da superkondenzatori imaju sposobnost stvaranja mnogo veće vršne snage u odnosu na druge izvore kao što su baterije ili gorivne ćelije. Ovo znači da je superkondenzator sposoban da isporuči mnogo veću snagu u kratkom vremenskom intervalu u odnosu na baterije.

Tabela 3.1 Uporedne karakteristike superkondenzatora i litijum jonske baterije

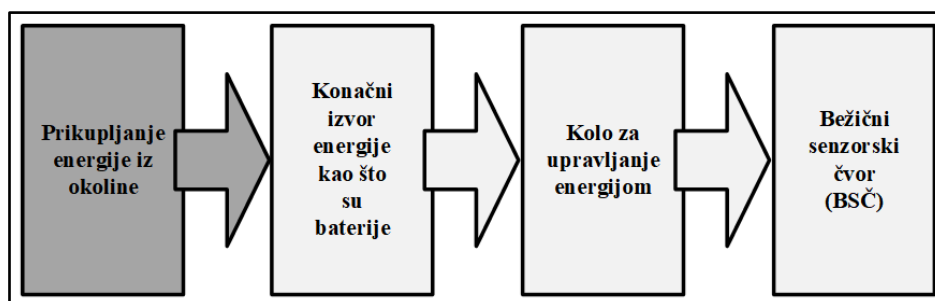
<i>Karakteristika</i>	<i>Litijum jonske baterije</i>	<i>Superkondenzator</i>
Broj ciklusa punjenja tokom životnog veka	< 10 ³ ciklusa	> 10 ⁶ ciklusa
Samopražnjenje	Dugo	Srednje
Radni napon osnovne ćelije	3,7 [V] - 4,2 [V]	2,3 [V] - 2,7 [V]
Gustina energije (specifična energija) [Wh/kg]	Visoka (20-150)	Niska (0.8-10)
Gustina snage (specifična snaga) [W/kg]	Niska (50-300)	Visoka (> 1000)
Cena po kWh	10000 \$	250-1000 \$
Vreme punjenja	10-60 minuta	1-10 sekundi
Najbrže vreme pražnjenja	0,3-3 sati	manje od nekoliko minuta
Životni vek	nekoliko godina	10-15 godina
Opseg temperature punjenja	0 do 45°C	-40 do 65°C
Opseg temperature pražnjenja	-20 do 65°C	-40 do 65°C
Kob za punjenje	Složeno	Prosto

Sposobnost da se u kratkom vremenskom intervalu saopšti velika snaga savršeno se uklapa u način napajanja čvorova, gde je neophodno u što kraćem intervalu poslati prikupljene podatke radio komunikacijom koja zahteva najviše energije. Ostale uporedne karakteristike date su u tabeli 3.1. Mana superkondenzatora je relativno veća cena u ovom trenutku, ali očekuje se da će ona opasti razvojem tehnologije izrade.

3.2 Proces prikupljanja energije iz okoline kod bežičnih senzorskih mreža

Primenom modernih elektronskih komponenti i namenskog projektovanja hardvera i firmvera, kao i primenom optimizacionih algoritama na nivou BSM-e, potrošnja čvora svedena je na minimum. Postavlja se pitanje kako dalje povećati životni vek BSM-e. Ustanovljeno je da najveće ograničenje nastaje usled konačnog veka trajanja izvora energije kao što su primarne i sekundarne baterije. Primena BSM-a za praćenje parametara životne sredine u nepristupačnim i opasnim terenima i sredinama gde postoje hazardne supstance, otežava proces zamene baterija na čvorovima i generalno njihovo održavanje. Sa stanovišta primene BSM-a, metoda ugradnje čvorova poznatija kao „postavi i zaboravi“ predstavlja jedan od naprednijih pristupa, jer se ugradnja obavlja samo jednom, tako da je nemoguće ili neisplativo vršiti bilo kakve naknadne radnje. Zato su preduslovi za minimalnom cenom, potrošnjom i što dužim trajanjem izvora energije od izuzetne važnosti u ovoj oblasti.

Sa ciljem da se omogući primena BSM-a sa osobinom „postavi i zaboravi“, koristi se proces prikupljanja energije iz okoline. Engleski termin *Energy Harvesting* u bukvalnom prevodu znači „žetva energije“ i koristi se da opiše svojstva elektronskih uređaja, u ovom slučaju bežičnih senzorskih čvorova, da iz svoje okoline prikupljaju energiju neophodnu za normalno funkcionisanje. U disertaciji će se umesto „žetva energije“ koristiti termin „prikupljanje energije iz okoline“. Proces prikupljanja energije iz okoline praktično pomera granice mogućnosti BSM-a u smislu da postaju samoodržive i autonomne. U tehničkom smislu, prikupljanje energije iz okoline je omogućeno dodavanjem posebnog hardverskog podsklopa kao što je prikazano na slici 3.4. Proces prikupljanja energije iz okoline podrazumeva da čvor koristi različite izvore energije u svojoj okolini, kao što su solarna, toplotna, vibraciona, energija vetra, i pretvara prikupljenu energiju u električnu energiju za direktno napajanje ili indirektno preko dopunjavanja sekundarnih baterija ili superkondenzatora.



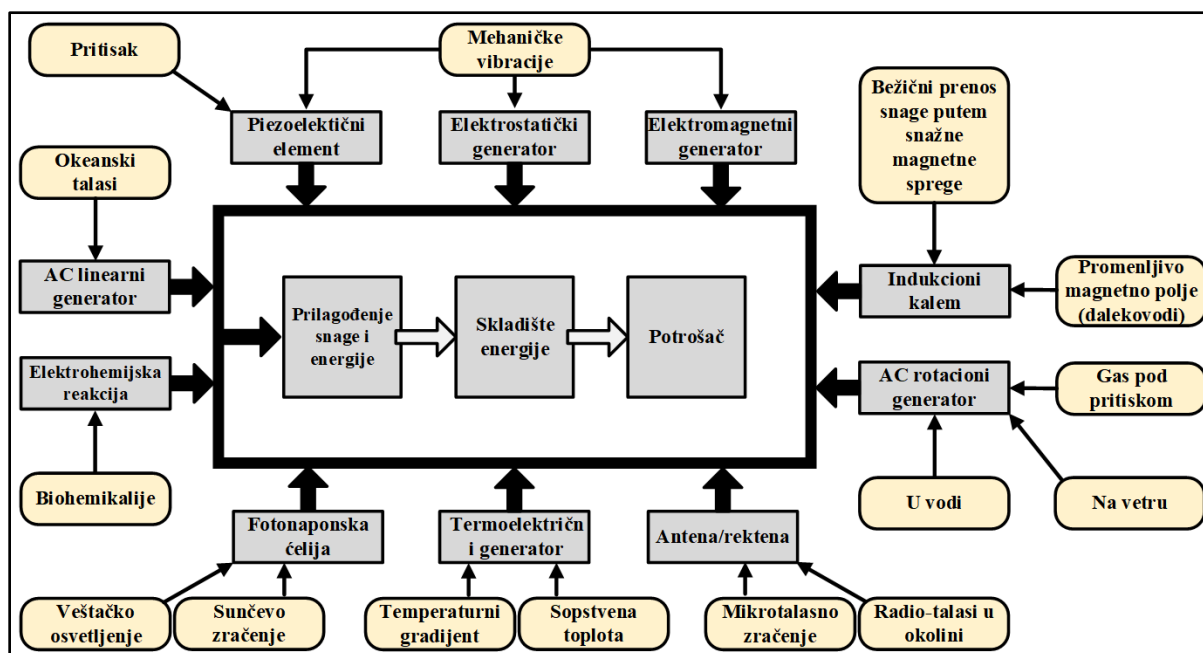
Slika 3.4 Mesto procesa prikupljanja energije iz okoline u ukupnom toku energije standardnog bežičnog senzorskog čvora [17]

Tabela 3.2 Različiti izvori energije u prirodi, način pretvaranja u električnu energiju i uobičajena gustina snage [17]

Princip prikupljanja energije	Element za prikupljanje energije (prikupljač)	Gustina snage
Prikupljanje sunčeve i ambijentalne svetlosti	Fotonaponski solarni panel	1500 [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$] (direktna sunčeva svestlost 1000 [W/m^2])
Prikupljanje mehaničke energije	Vetrogenerator	3,5 [mW/cm^2]
	Piezoelektrična vibraciona pločica	500 [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]
	Elektromagnetni generator	4,0 [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]
	Elektrostatički generator	3,8 [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]
Prikupljanje toplote	Termoelektrični generator	40 [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$] 100 [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$] (za temperaturnu razliku od 5°C)
Prikupljanje elektromagnetnih talasa	Ploča sa antenom	20 [mW] (915 MHz za ulaznu snagu od 100 mW)

U opštem slučaju, količina prikupljene energije je veoma mala, reda veličine milidžula. Različiti izvori energije su prikazani na slici 3.5. Osim izvora, prikazano je na koji način se energija pretvara u električnu preko takozvanih „prikupljača“ enegije (engl. *Harvester*). Ovi obnovljivi izvori energije su lako dostupni u okolini i uglavnom ih ima u dovoljnoj količini tako da nije potrebno uložiti napor za stvaranje energije. Postoji veliki broj istraživanja i eksperimenata koji pokazuju koliko energije je moguće prikupiti u zavisnosti od izvora. Neki od rezultata su dati u [17], [56], [57], a ovde su prikazani u tabeli 3.2.

Problem sa prikupljanjem energije iz okoline je da sam proces karakteriše velika promenljivost u efikasnosti i periodično promenljiva efikasnost. Zbog toga ne postoji jedinstveno rešenje za sve sredine i primene. Iz tabele 3.2 može se videti da solarna energija ima najveću gustinu snage.



Slika 3.5 Izvori energije okoline i njihovi „prikupljači“ [17]

Za fotonaponske ćelije na otvorenom prostoru smatra se da je kapacitet $15000 \mu\text{W}/\text{cm}^3$, ali se drastično smanjuje u zatvorenim prostorima čak do $20 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ [56]. Ostali izvori energije iz okoline mogu ne mogu da obezbede veliku gustinu snage, osim u posebnim uslovima. Na primer, na obali mora i okeana je prisutno dosta energije vetra, na mostovima i saobraćajnicama je prisutna velika količina vibracione energije, itd.

Za povećanje životnog veka BSM-e neophodno je obezbediti energetska samoodrživost čvora koja se može ostvariti prikupljanjem energije iz okoline. Međutim, ne postoji univerzalni izvor energije iz okoline koji se može izabrati u zavisnosti od postojećih uslova u okolini i koji odgovaraju energetskim potrebama svakog čvora.

Prikupljanje energije iz okoline obezbeđuje brojne pogodnosti krajnjem korisniku, a neke od najvećih su [17]:

1. smanjenje zavisnosti od baterijskog napajanja. Pojavom mikroelektromehaničkih sistema (engl. *Microelectromechanical systems – MEMS*), sve više se koriste elektronske komponente i senzori sa veoma malom sopstvenom potrošnjom čime se smanjuje potrošnja čvora, tako da prikupljanje energije iz okoline može u potpunosti da zameni baterije.
2. Smanjenje troškova ugradnje. Samonapajajući čvorovi ne zahtevaju povezivanje kablovima i provodnicima pa se samim tim lako instaliraju.
3. Smanjenje troškova održavanja. Nakon raspoređivanja, samonapajajući čvor ne zahtevaju promenu baterija.
4. Obezbeđuju prikupljanje podataka sa senzora i aktuatorске mogućnosti na konstantnom nivou u nepristupačnom i hazardnom okruženju.
5. Dugotrajnost. Pouzdan samonapajajući čvor ostaje u funkcionalnom stanju sve dok je energija okoline dostupna. Samonapajajući čvorovi su idealni za dugoročne primene koje zahtevaju decenije praćenja.
6. Smanjuju uticaj na životnu sredinu. Prikupljanje energije iz okoline eliminiše potrebu za korišćenjem primarnih baterija i utiče na smanjenje zagađenja životne sredine.

Ipak, proces prikupljanja energije iz okoline ima i svojih izazova koji mogu da utiču na karakteristike čvora i poseban tretman u odnosu na baterijski napajane čvorove. Dati su neki od izazova.

1. Izvori energije iz okoline se karakterišu malom gustinom snage, tako da je kontinualan rad čvora upitan.
2. Dostupnost pojedinih izvora iz okoline je nekontrolisan (na primer sunčeva svetlost), što može predstavljati problem za određene primene.
3. Rad pojedinih čvorova pokazuje osetljivost na fluktuacije izvora energije.
4. Trenutno su postojeća rešenja skupa i nisu atraktivna u poređenju sa rešenjima koja koriste, na primer, fosilna goriva.

I pored navedenih izazova, može se zaključiti da proces prikupljanja energije iz okoline može predstavljati održivo rešenje za napajanje čvorova. Ukoliko se u sastavu čvora ugradi

element za skladištenje prikupljene energije, drastično se povećava njegova operativnost i životni vek.

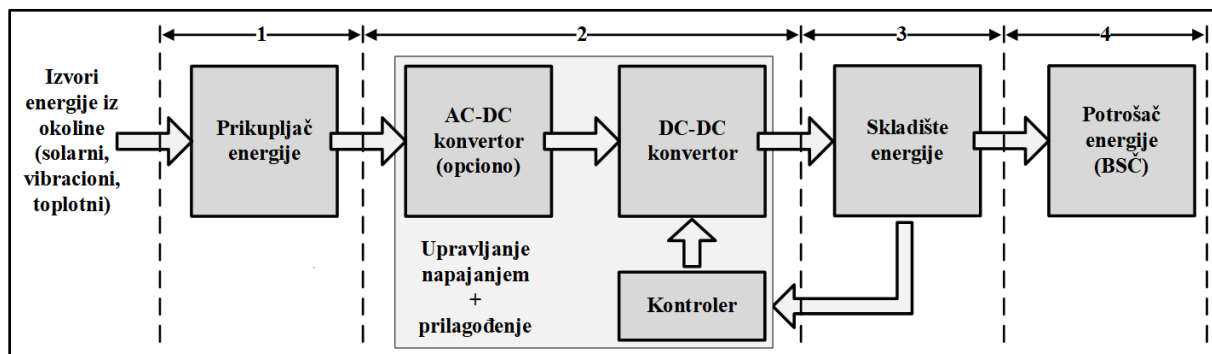
3.3 Sistem za prikupljanje energije iz okoline

Sistem za prikupljanje energije iz okoline se u sastoji od četiri dela (slika 3.6):

1. Deo za prikupljanje i konverziju energije (prikupljač energije).
2. Deo za upravljanje energijom i prilagodno kolo.
3. Element za skladištenje energije.
4. Potrošač, u ovom slučaju bežični senzorski čvor.

Kao mera učinka prikupljača energije koristi se izlazna snaga po jedinici mase ili zapremine, tj. gustina snage ili energije. Prikupljena snaga se pretvara u električnu energiju koja se zatim dodatno prilagođava različitim načinima korišćenja, kao što je punjenje baterija, superkondenzatora ili za direktno napajanje potrošača stabilisanim naponom. Od izuzetnog značaja je da se izlazna impedansa izvora energije, tj. prikupljača prilagodi potrošaču, jer sa na ovaj način ostvaruje maksimalno korišćenje snage izvora, tj. najveća efikasnost izvlačenja energije iz okoline. Primeri prikupljača su keramički piezogenerator koji pretvara mehaničku energiju u električnu, zatim fotonaponska ćelija koja konvertuje sunčevu energiju, zatim termoelektrični generator koji konvertuje energiju toplote, vetrogenerator koji pretvara kinetičku energiju protoka vazduha u električnu energiju.

Nakon pretvaranja prikupljene energije iz okoline u električnu energiju, a pre napajanja potrošača, vrlo često je neophodno izvršiti upravljanje energijom korišćenjem različitih prilagodnih električnih kola. Glavni zadatak prilagodnih kola je da kontrolišu protok energije prema potrošaču, ali da se to radi na efikasan način, sa što manjim gubicima i pri maksimalnom iskorišćenju snage iz prikupljača energije. Drugi zadatak ovih kola je da omoguće pretvaranje i regulaciju napona na nivoe koji se koriste od strane čvorova. Uobičajeno se koristi napon u opsegu od 2,7 V do 3,3 V, kako bi statički gubici bili što manji. Takođe, većina elektronskih komponenti i senzora su operativni u ovom opsegu napona. Energija koja se prikuplja iz okoline je često veoma mala, a u pojedinim vremenskim intervalima može biti i nedostupna.



Slika 3.6 Blok dijagram sa osnovnim delovima sistema za prikupljanje energije iz okoline

Čvor zahteva konstantno napajanje za normalan rad u svakom trenutku, tako da je neophodno koristiti neku vrstu elementa za skladištenje energije. Trenutno najkorišćeniji elementi za skladištenje energije su različiti tipovi punjivih baterija, ali se sve više koriste superkondenzatori. Prema modelu prikazanom na slici 3.6, čvor uvek koristi energiju iz elementa za skladištenje. Zato je važno da izvor obezbeđuje više energije nego što čvor zahteva.

Bežični senzorski čvor najviše troši energiju kada se vrši merenje i prilikom bežičnog slanja podataka, ali to se dešava u vrlo kratkim vremenskim intervalima. U toku preostalog vremena, čvor je u režimu spavanja i troši veoma malo energije. U toku spavanja element za skladištenje energije se dopunjava energijom iz okoline. Od izuzetne važnosti je da sistem za prikupljanje energije iz okoline obezbedi dovoljno energije za opisani način rada, jer u suprotnom posle izvesnog vremena, element za skladištenje ostaje bez energije, a čvor prestaje sa radom.

3.4 Prikupljanje solarne energije za napajanje bežičnih senzorskih mreža

3.4.1 Zašto solarna energija?

Kvalitetne informacije o životnoj sredini se mogu steći samo na osnovu dugogodišnjeg, pa čak i višedecenijskog posmatranja određenih parametara. Zato je za potrebe praćenja parametara životne sredine od izuzetne važnosti je da BSM-a ima što duži životni vek. Životni vek direktno zavisi od raspoložive energije i zato baterije nisu pogodne za napajanje čvorova, jer imaju ograničen vek trajanja. S druge strane, praćenje životne sredine često podrazumeva primenu na nepristupačnim terenima, gde nije lako promeniti baterije tako da se pojavljuju problemi kod održavanja mreže. U slučaju kada se koriste punjive baterije i ako problem nepristupačnosti terena nije izražen, mora se računati na angažovanje ljudske radne snage što povećava cenu održavanja sistema.

Prikupljanje energije iz okoline uz korišćenje elementa za skladištenje energije iz ugla čvora predstavlja neprekidni izvor energije, ali samo pod određenim uslovima i ograničenjima. Prilikom izbora potencijalnog izvora energije iz okoline neophodno je analizirati gustinu raspoložive energije i stopu konverzije. Takođe, u izbor ulaze samo izvori energije koji su dostupni u životnoj sredini. Iz tabele 3.2 se može videti da se energija Sunca i vetra karakterišu relativno velikom gustinom energije. Ipak, solarna energija ima određenih prednosti u odnosu na energiju vetra. Konverzija solarne energije poseduje izraženu skalabilnost, što znači da se povećanjem dimenzija prikupljača povećava i količina prikupljene energije. Na primer, fotonaponska ćelija koja je izložena direktnom sunčevom zračenju može generisati snagu oko 15 mW/cm^2 . Dakle, solarni panel dimenzija 1 cm^2 generiše snagu oko 15 mW snage. Ukoliko napon napajanja čvora iznosi $3,0 \text{ V}$, maksimalna struja čvora je oko 5 mA , što znači da je dovoljno nekoliko cm^2 solarnog panela za neprekidan rad većine komercijalnih čvorova. Ovaj proračun važi pri maksimalnom intezitetu sunčeve svetlosti, a u praksi je raspoloživa snaga manja, pa su i strujne mogućnosti panela manje.

Solarni paneli se jednostavno ugrađuju i ne poseduju pokretne mehaničke delove koje efektivno smanjuju životni vek izvora energije. Mogu se proizvoditi u različitim dimenzijama i

oblicima, a postoje čak i fleksibilni solarni paneli. Takođe, solarni paneli ne zahtevaju redovno održavanje. Problemi vezani za solarnu energiju su uticaj vremenskih prilika na gustinu dostupne energije i naravno periodična dostupnost usled ciklusa dana i noći.

3.4.2 Održivost rada bežičnog senzorskog čvora

Izvori energije kod tehnike prikupljanja energije iz okoline mogu biti, nekontrolisani ali predvidljivi, nekontrolisani i nepredvidljivi, potpuno kontrolisani ili delimično kontrolisani. Sunčeva energija spada u nekontrolisane, ali predvidljive izvore energije, što znači da je moguće napraviti model ponašanja koji uključuje dnevno ponašanje, zavisnost od promene godišnjih doba, pa čak i uticaj lokalne vremenske prognoze, gde je sistem instaliran.

Za normalan rad čvora koji ne poseduje element za skladištenje energije, neophodno je da u svakom trenutku potrošnja bude manja ili jednaka snazi izvora [58]. Ukoliko se snaga čvora u trenutku t označi sa $P_{\check{c}}$, a snaga izvora u istom trenutku sa P_I onda je ova zavisnost prikazana relacijom:

$$P_I(t) \geq P_{\check{c}}(t). \quad (3.1)$$

Pošto element za skladištenje energije ne postoji, ukoliko je snaga izvora manja od potrošnje čvora, gubi se njegova funkcionalost. S druge strane nepovratno se gubi višak energije koji se ne koristi.

Kao nekontrolisani, ali predvidljivi izvor, sunčeva energija zahteva postojanje neke vrste skladišta za energiju iz kojeg čvor može da se napaja neprekidno. Ako se energija u elementu za skladištenje u trenutku t označi sa P_S , onda se relacija (3.1) menja u relaciju:

$$P_I(t) + P_S(t) \geq P_{\check{c}}(t). \quad (3.2)$$

Prema [58], za postizanje samoodrživosti napajanja čvora koji koristi idealni bafer energije, mora biti zadovoljena relacija:

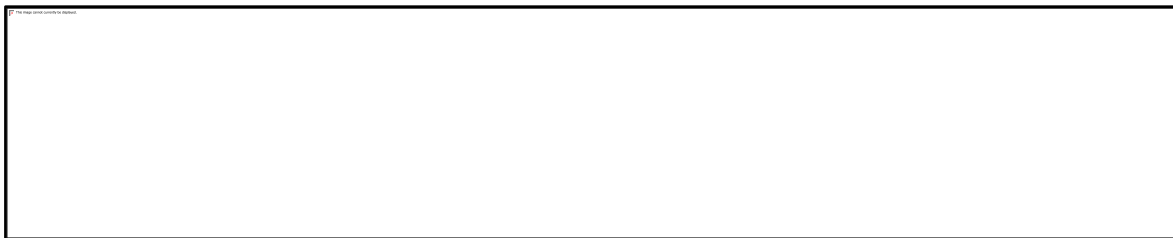
$$B_0 + \int_0^T P_I(t) - \int_0^T P_G(t) \geq \int_0^T P_{\check{c}}(t), \quad (3.3)$$

gde su B_0 početna energija skladišta energije, a P_G gubici u elementu za skladištenje. Ova formula ne uključuje ograničenja usled kapaciteta elementa za skladištenje, što je u praksi bitna karakteristika, jer kada je element za skladištenje napunjen, višak energije se gubi.

3.4.3 Analiza sistema za prikupljanje solarne energije iz okoline

Merenje parametara životne sredine zahteva da se koristi energija koja je dostupna u okolini gde se merenje vrši. Sunčeva energija je u najvećem broju primena opšteprisutna. Osim toga, prikupljanje energije Sunca se smatra razvijenom tehnologijom, gde je stepen komercijalizacije na nivou da se postiže prihvatljiva cena po jedinici snage.

Na slici 3.6 je prikazan opšti sistem za prikupljanje energije iz okoline. Sistem koji koristi solarni izvor se može prikazati istim modelom, ali se preciznije opisuje kao na slici 3.7. Dakle, sistem se sastoji od ulaznog regulatornog kola, zatim kola za skladištenje energije i kontrolu punjenja i izlaznog regulatornog kola prema čvoru.

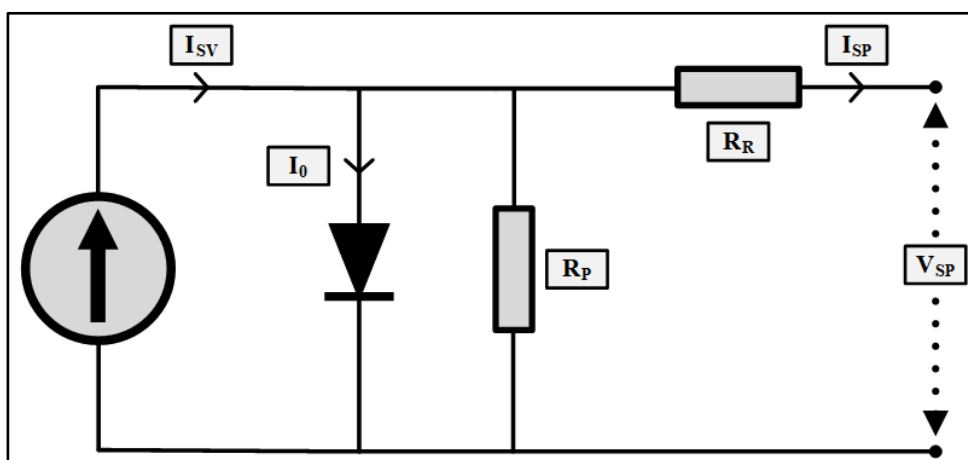


Slika 3.7 Osnovni blokovi sistema za napajanje koji koristi prikupljanje solarne energije iz okoline

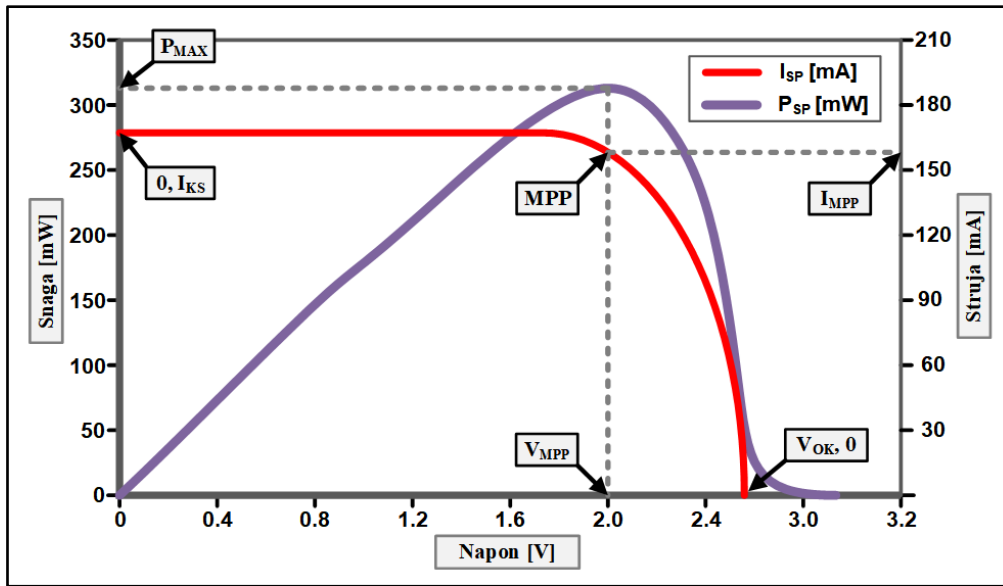
Osnovna svrha ulaznog regulatornog kola je da prilagodi izlaz solarnog panela prema zahtevima elementa za skladištenje energije. Na primer, ukoliko se kao element za skladištenje koristi litijum jonska baterija, neophodno je obezbediti nominalan napon punjenja od 4,2 V. Takođe, ulazna regulacija vodi računa da je smer energije takav da štiti solarni panel i da se obezbeđuje maksimalno iskorišćenje snage u svakom trenutku.

Element za skladištenje energije obezbeđuje da čvor normalno radi u trenucima kada su nivoi energije iz okoline ispod određene granice. Najkorišćeniji elementi za skladištenje energije su punjive baterije i superkondenzatori. U opštem slučaju ovi elementi zahtevaju dodatnu kontrolu punjenja, jer u suprotnom može doći do oštećenja, smanjenja životnog veka i performansi.

Izlazna regulacija podešava napon prema čvoru. Blok izlazne regulacije prikazan na slici 3.7 je često sastavni deo čvora, što je poželjno, jer se na ovaj način efikasnije raspolaze energijom i manji su gubici usled suvišnih elektronskih komponenti. U slučaju nadogradnje komercijalnog čvora sistemom sa slike 3.7, može se desiti da su pojedini delovi redundantni, što utiče na cenu, karakteristike i gubitke energije sistema. Na primer, u radu [57] je opisan sistem za prikupljanje energije iz okoline koji se dodaje na komercijalni čvor. Komercijalni čvor ima interni regulacioni podsistem za napajanje sa baterije koji je u ovom slučaju suvišan, jer opisano rešenje sadrži izlazni regulacioni sistem u okviru podsistema za prikupljanje energije iz okoline. Namenskim projektovanjem se izbegavaju suvišni delovi, postiže se manja cena, potrošnja i dimenzije.



Slika 3.8 Uprošćeni model solarne ćelije.



Slika 3.9 Snaga i struja fotonaponske ćelije u zavisnosti od napona

U literaturi [59], [60] je prikazano nekoliko matematičkih modela koji opisuju rad fotonaponskih ćelija. U ovom radu je za svrhu analize je korišćen model prikazan na slici 3.8 koji koristi jednu diodu. Struja solarnog panela I_{SP} je data izrazom:

$$I_{SP} = I_{SV} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{SP} + I_{SP} R_R}{n_S V_T} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{SP} - I_{SP} R_R}{R_P}, \quad (3.4)$$

gde je I_{SV} struja proporcionalna intezitetu svetlosti, I_0 je struja zasićenja pri negativnoj polarizaciji, R_R je redna otpornost, R_P je paralelna orpornost, n_S je broj rednih fotonaponskih ćelija i V_T je termički napon spoja.

Snaga solarnog panela P_{SP} se izražava u funkciji napona solarnog panela i može se generisati na osnovu poznatih tehničkih karakteristika svakog komercijalnog solarnog panela za datu osvetljenost i temperaturu. Jedan primer je prikazan na slici 3.9, gde se vidi da postoji napon i struja solarnog panela gde je snaga solarnog panela maksimalna. Ova tačka predstavlja tačku maksimalnu snage panela i u literaturi se označava kao *MPP* (engl. *MPP – Maximum Power Point*). Snaga u ovoj tački se označava sa P_{MPP} , a struja i napon I_{MPP} i V_{MPP} respektivno. Za potrebe pronalazaženja tačke maksimalne snage, često je od interesa poznavati napon u otvorenom kolu i struju kratkog spoja panela (V_{OK} i I_{KS}).

Kod većine solarnih panela napon na serijskom otporniku R_S je mnogo manji od napona solarnog panela V_{SP} , tako da se ovaj član u izrazu (3.4) može zanemariti. Iz (3.4) može se dobiti napon solarnog panela u otvorenom kolu prema izrazu:

$$V_{OK} = n \cdot V_T \cdot \ln \left[\frac{I_{SP}}{I_0} + 1 \right], \quad (3.5)$$

i struja kratkog spoja prema izrazu:

$$I_{KS} = I_{SV} - I_0 \left[e^{\left(\frac{I_{KS} R_R}{n_S V_T} \right)} - 1 \right] - \frac{I_{KS} R_R}{R_P}. \quad (3.6)$$

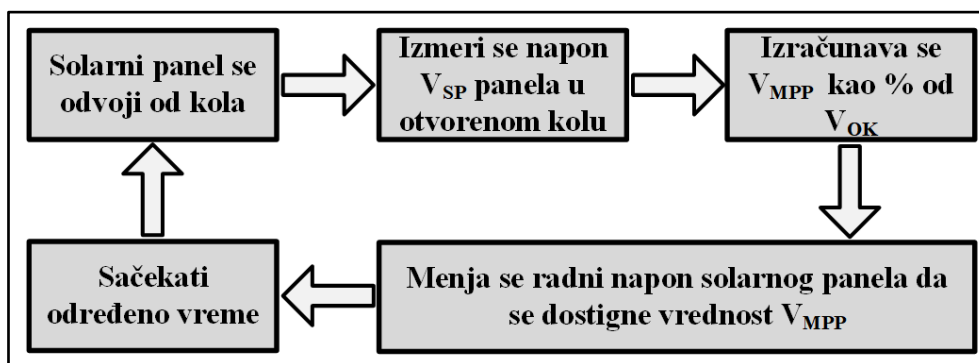
U praksi, član koji zavisi od paralelne otpornosti R_P se može zanemariti, kao i član koji zavisi od struje zasićenja I_0 , tako da se dobija da je struja kratkog spoja I_{KS} približno jednaka struji solarnog panela I_{SV} .

Jedna od funkcija ulaznog regulatornog kola je prilagođenje solarnog panela prema elementu za skladištenje energije, koje obezbeđuje da se u svakom trenutku koristi maksimalna snaga. Postoje posebni algoritmi koji se koriste za ovu svrhu i nazivaju se algoritmi za praćenje maksimalne snage ili *MPPT* algoritmi (engl. *Maximum Power Point Tracking*). *MPPT* algoritmi se međusobno razlikuju prema stepenu kompleksnosti, efikasnosti i brzini pronalazjenja tačke maksimalne snage. Pregled najpoznatijih i najviše korišćenih *MPPT* algoritama dat je u [61]. Koji algoritam će se koristiti uglavnom zavisi od primene. Za potrebe napajanja čvora od izuzetnog značaja je da primenjeni algoritmi ne remete karakteristike kao što su sopstvena potrošnja, dimenzije i, naravno, cena. Kompleksni algoritmi mogu povećati efikasnost, ali i cenu, pa je često neophodno pronaći optimalno rešenje. Zahvaljujući *MPPT* algoritmima i maksimalnom korišćenju snage, moguće je dobiti veću snagu iz solaranog panela. Ako se koriste dva solarna panela istih dimenzija, onaj koji koristi *MPPT* algoritam generiše veću snagu. Ovo pogoduje zahtevima da se fizičke dimenzije čvora u što većoj meri smanje.

Optimalan *MPPT* algoritam za primenu kod čvorova je *OCV* algoritam (engl. *OCV – Open-Circuit Voltage*). Algoritam se ne odlikuje velikom efikasnošću, ali je relativno jednostavan i lako se hardverski implementira u okviru integrisanih kola. Kod ovog algoritma maksimalno iskorišćenje snage postiže se na određenom procentu napona solarnog panela u otvorenom kolu V_{OK} [62]. Ovaj odnos se označava kao koeficijent K koji je dat realcijom:

$$\frac{V_{MPP}}{V_{OK}} \cong K < 1. \quad (3.7)$$

U praksi se vrednost K kreće u opsegu od 70 do 80%. Algoritam koji opisuje kako se izračunava koeficijent K i kako se ostvaruje praćenje maksimalne snage prikazan je na slici 3.10. U pojedinim intervalima se vrši odvajanje solarnog panela od kola za kontrolu punjenja i u tom trenutku se meri napon otvorenog kola solarnog panela V_{OK} . Na osnovu ovog napona se izračunava napon V_{MPP} pri kome se ostvaruje maksimalno iskorišćenje snage.



Slika 3.10 Opis *OCV* algoritama koji se koristi za podešavanje rada solarnog panela u tački maksimalne snage

U praksi se pokazalo da je izračunata vrednost dovoljno blizu tački maksimalne snage solarnog panela. Kolo za punjenje podešava struju punjenja tako da se na izlazu dobije izračunati napon V_{MPP} . Nakon određenog intervala postupak se ponavlja, jer se uslovi osvetljenosti vrlo često menjaju.

Prikupljanje energije Sunca je razvijena tehnologija koja pogoduje primeni za praćenje parametara životne sredine. Komercijalno dostupni solarni paneli i elektronska kola ne povećavaju znatno cenu čvora u odnosu na fleksibilnost koju nude u primeni. Razvijeni algoritmi za iskorišćenje maksimalne snage iz solarnog panela omogućavaju smanjenje dimenzija i cene čvora.

3.5 Skladištenje energije kod bežičnog senzorskog čvora

Solarna energija je po prirodi predvidljiva, ali nekontrolisana. U datom trenutku vremena možemo znati da li je dan ili noć, ali u toku dana nije poznato koliko je energije dostupno za prikupljanje. Za normalan rad, čvor zahteva konstantno napajanje u svakom trenutku. Zbog prekidne prirode sunčeve energije neophodno je koristiti elemente za skladištenje. Ukoliko ne postoji skladište za energiju, čvor je funkcionalan samo ako postoji dovoljno sunčeve svetlosti, kao što je prikazano relacijom (3.2). Dakle, ukoliko je potrebno pratiti parametre sredine u toku noći, čvor bez uskladištene energije nije u stanju da to uradi. Sa ciljem da čvor bude funkcionalan u svakom trenutku, danju i noću, neophodno je uskladištiti sunčevu energiju i koristiti je kada je ona neophodna. Kod BSM-a, najkorišćeniji elementi za skladištenje energije su punjive baterije i superkondenzatori. Poređenje litijum jonskih baterija i superkondenzatora dato je u tabeli 3.1.

3.5.1 Sekundarne (punjive) baterije

Postoji više vrsta punjivih baterija, a najpoznatije su one na bazi litijuma, nikla i olova. Punjive baterije obezbeđuju energiju iz hemijskih procesa koji su po prirodi reverzibilni. Karakteristične su po velikoj gustini energije (od 20 do 150 Wh/Kg) u odnosu na superkondenzatore. Za istu jedinicu mase baterije imaju veći kapacitet u odnosu na superkondenzatore (tabela 3.1). Ograničen broj ciklusa punjenja usled neidealnog hemijskog reverzibilnog procesa smanjuje ukupni životni vek. Broj ciklusa punjenja litijum jonske baterije je oko 1000 uz napredno i elektronski složeno kontrolisanje procesa punjenja. Jedan primer kako produžiti životni vek litijum jonske baterije je punjenje manjim naponom napajanja (4,1 V umesto 4,2 V) i manjim vrednostima struje. Ipak, ako se uzme u obzir da je za praćenje parametara životne sredine neophodno svakodnevno punjenje i pražnjenje baterije, jasno je da maksimalni životni vek baterije nekoliko godina. Na životni vek utiču temperaturne varijacije okoline. Dakle, ukoliko je planirani životni vek BSM-e nekoliko godina, ili, ukoliko je isplativa zamena, punjive baterije predstavljaju prihvatljivo rešenje.

Predviđa se da će broj čvorova, a samim tim i korišćenih baterija, u budućnosti rasti eksponencijalno [63]. Ovo podrazumeva eksponencijalno povećanje potrošenih punjivih baterija. Proces reciklaže može umanjiti negativan uticaj na životnu sredinu. Ipak, mali deo tog otpada nenamerno završi u prirodi, usled nepredvidivih uticaja okoline (aktivnost životinja, erozija tla,

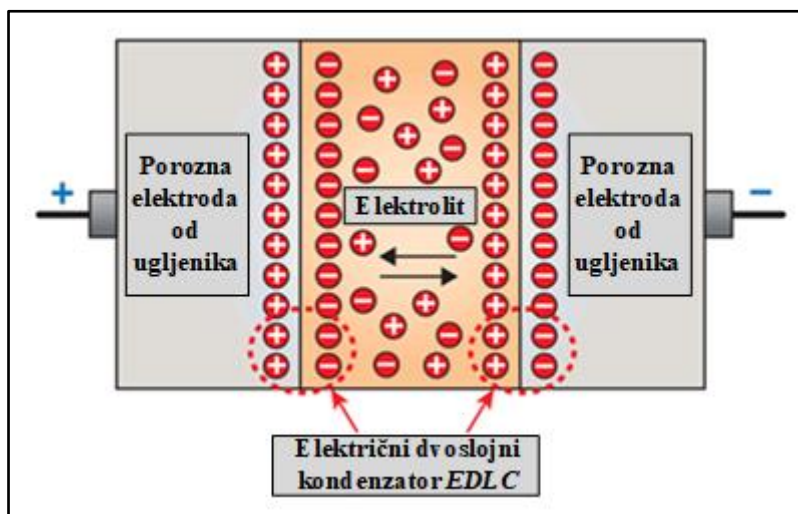
vremenske nepogode). Uzimajući u obzir da su litijum, nikl, olovo i ostali gradivni materijali punjivih baterija značajne zagađujuće materije i da je njihov uticaj na okolinu označen kao veoma štetan, potrebno je na sve načine sprečiti neželjeno dejstvo. Zato je tendencija da se punjive baterije koriste samo u slučaju izuzetne neophodnosti i uz velike mere zaštite da se smanji verovatnoća nepovratnog gubitka čvora, tj. baterije.

3.5.2 Superkondenzatori

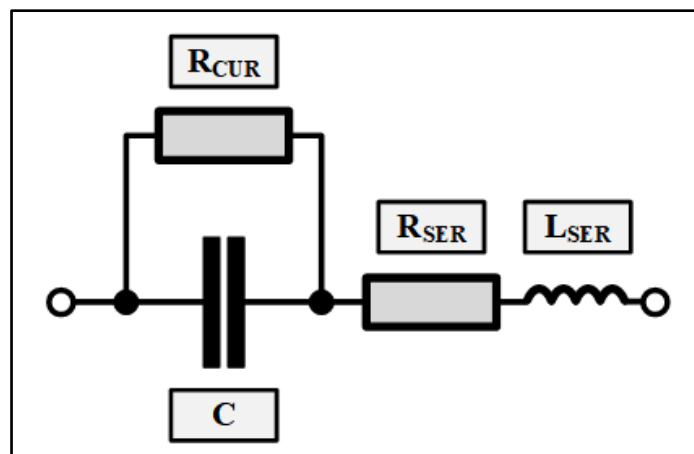
Superkondenzatori ili električno dvoslojni kondenzatori (engl. *EDLC – Electric Double-Layer Capacitor*) su kondenzatori velikih kapacitivnosti. Imaju mali radni napon u poređenju sa standardnim kondenzatorima (2,3 V do 2,7 V). U energetskom smislu se nalaze između običnih elektrolitskih kondenzatora i punjivih baterija. U poređenju sa punjivim baterijama imaju mnogo manju gustinu energije po jedinici mase (10 Wh/kg), ali zato imaju veću vršnu snagu po jedinici mase, reda veličine 1000 W/kg [17]. Za punjive baterije ova vrednost se kreće od 50 do 300 W/kg.

Superkondenzatori se sastoje od dve metalne ploče (otuda naziv dvoslojni) između kojih se nalazi elektrolit. Deo kompleksne interne strukture prikazan je na slici 3.11. Metalne ploče su presvučene poroznim materijalom od aktivnog ugljenika, tako da je efektivna površina koja zadržava naelektrisanje mnogo veća. Elektrolit se sastoji od pozitivnih i negativnih jona koji su rastvoreni. Kada se dovede napon na krajevima javljaju se dva sloja naelektrisanja na veoma malom rastojanju, reda veličine nanometra.

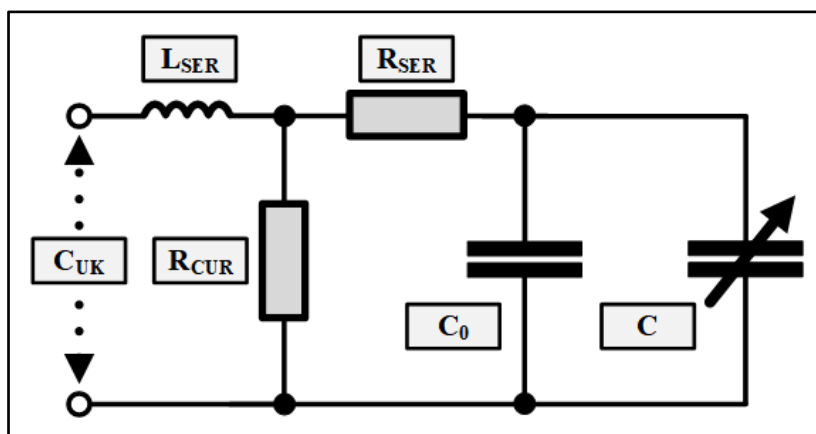
Za razliku od punjivih baterija, superkondenzatori imaju mnogo veći broj ciklusa punjenja, reda veličine pola miliona uz veoma minimalnu promenu performansi. Osim toga životni vek im je mnogo duži, nominalno od 10 do 15 godina uz promenu kapaciteta od 100% do 80%. Zahvaljujući maloj serijskoj otpornosti (engl. *ESR – Equivalent Series Resistance*) u stanju su da saopšte veliku vršnu snagu. Najviše se koriste u elektronskim rešenjima gde je potrebno u kratkim trenucima vremena saopštiti veliku vrednost vršne snage. Temperaturni opseg je širi u odnosu na punjive baterije, a postoje rešenja za primenu u industrijskom opsegu do -40°C . Mana im je mali kapacitet i mali radni napon.



Slika 3.11 Unutrašnja struktura dvoslojnog superkondenzatora za elektrodama od ugljenika



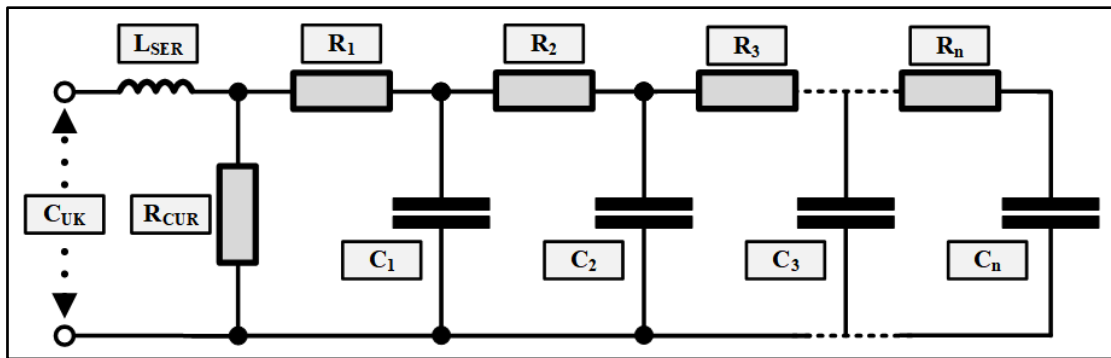
Slika 3.12 Model standardnog elektrolitskog kondenzatora koji se koristi za modelovanje superkondenzatora [64]



Slika 3.13 Ekvivalentno kolo superkondenzatora koje koristi idealne komponente i promenljivi kondenzator za opis zavisnosti promene kapacitivnosti od napona [64]

Ukoliko je neophodan veći radni napon, moguće je redno povezati jedinične ćelije superkondenzatora, ali se karakteristike degradiraju, jer se kapacitivnost umanjuje i raste serijska otpornost. Takođe, punjenje redno vezanih superkondenzatora zbog velikih kapacitivnosti nije jednostavno i mora se posebno realizovati kolo za ravnomerno punjenje, jer u suprotnom može doći do pojave neravnomernog punjenja i proboja pojedinih ćelija. Jedna od bitnijih karakteristika superkondenzatora je izražena skalabilnost, jer se kapacitivnost povećava linearno sa masom i dimenzijama.

Prilikom modelovanja superkondenzatora često se koristiti klasičan model standardnog kondenzatora koji je prikazan na slici 3.12. Osnovni elementi su idealni kondenzator čija je kapacitivnost C , serijska otpornost R_{SER} , serijska induktivnost L_{SER} i paralelna otpornost R_{CUR} . Ekvivalentna serijska otpornost ili ESR utiče na gubitke u kondenzatoru i poželjno je da bude što manja. Paralelna otpornost utiče na struju curenja tj. samopražnjenje superkondenzatora i poželjno je da bude što veća. U praksi je paralelna otpornost mnogo veća od serijske i kao kod običnih kondenzatora se zanemaruje. Radi analize specifičnosti superkondenzatora koristi se ekvivalentno kolo sa slike 3.13. Ovaj model se koristi da opiše terminalno ponašanje superkondenzatora.



Slika 3.14 Ekvivalentno kolo superkondenzatora usled složene interne strukture elektrode ugljenika [64]

Ukupna kapacitivnost osnovne ćelije C_{UK} zavisi od napona na kondenzatoru i može se predstaviti kao zbir kondenzatora konstantne kapacitivnosti C_0 i promenljivog kondenzatora čija kapacitivnost zavisi linearno od napona kondenzatora V_C , kao što je prikazano izrazom:

$$C_{UK} = C_0 + kV_C. \quad (3.8)$$

Vrednost R_{SER} predstavlja rednu otpornost koja utiče na disipaciju tokom punjenja i pražnjenja superkondenzatora, R_{CUR} je paralelna otpornost, obično dosta velika i simulira gubitke samopražnjenja, a induktivnost L_{SER} zavisi od konstrukcije i obično je vrlo mala.

Usled složene unutrašnje strukture elektrode od ugljenika, koja na svojoj površini ima veliki broj pora gde se nagomilavaju naelektrisanja, ponašanje superkondenzatora se može opisati modelom koji je prikazan na slici 3.14 [64]–[66]. Elementi sa većim indeksom odgovaraju dubljim zonama pora. O ovome će više reči biti kasnije.

Ekvivalentna kapacitivnost je data je izrazom [64]:

$$C_{UK} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}}. \quad (3.9)$$

Ekvivalentna serijska otpornost jednaka je zbiru otpornosti jediničnih ćelija:

$$R_{SER} = n \cdot R, \quad (3.10)$$

tako da ukupne performanse zavise od strukture pora, odnosno od njihove dubine.

Za svrhu praćenja parametara životne sredine, performanse superkondenzatora se kvalitetno mogu iskoristiti. U [65] prikazan je jedan način modelovanja superkondenzatora za primenu kod bežičnog senzorskog čvora. Iako je za većinu aplikacija dovoljno modelovati superkondenzator kao običan kondenzator, u radu je pokazano da unutrašnji procesi mogu da utiču na performanse, pre svega pad napona, što se u velikom broju primena modeluje kao uticaj struje samopražnjenja. Veliki broj ciklusa punjenja i dugo vreme korišćenja

omogućavaju da čvor funkcioniše preko 10 i više godina. Velika gustina snage omogućava da se u sklopu čvora koriste senzori sa većom potrošnjom u malim vremenskim intervalima, što se teško ostvaruje punjivim baterijama istih dimenzija. Superkondenzatori se odlikuju brzim punjenjem, što je za primene gde se koristi prikupljanje sunčeve energija iz okoline od izuzetnog značaja. Industrijski temperaturni radni opseg pogoduje terenskom načinu rada, kakav se zahteva kod praćenja parametara životne sredine. Zbog malog radnog napona senzorskog čvora, nije potrebno redno vezivati puno superkondenzatora. Ako se usvoji da je radni napon jedne ćelije reda 2,5 V, jasno je da je dovoljno koristiti najviše dve ćelije za normalan rad čvora. Na ovaj način se rednim vezivanjem karakteristike superkondenzatora ne degradiraju značajnije.

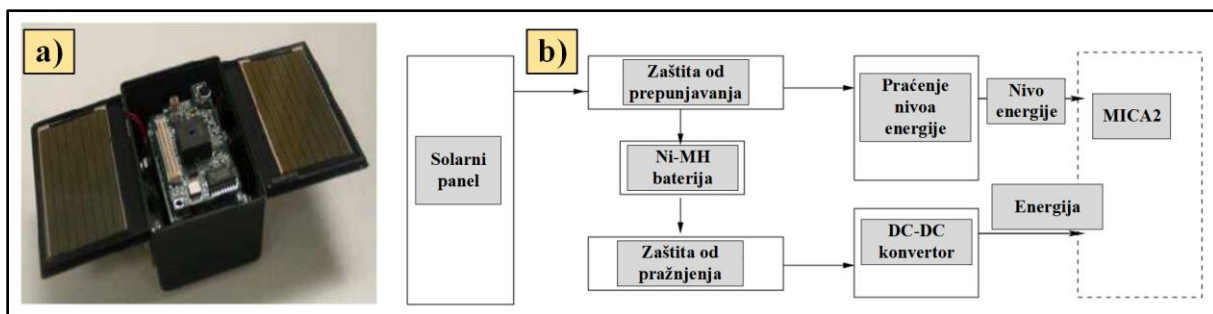
Za sintezu superkondenzatora se koriste novi materijali bazirani na ugljeniku, metalnim oksidima i provodnim polimerima. Prednosti materijala na bazi ugljenika, posebno grafena, je da se povećava gustina energije koja se sve više približava vrednostima za punjive baterije. Grafen je 200 puta čvršći od čelika i odličan provodnik struje, što ga čini mnogo boljim materijalom od bakra, litijuma i drugih aktuelnih materijala. Mogućnost da formira veliku efektivnu površinu čini ga odličnim materijalom za sintezu slojeva superkondenzatora. Trenutno su u fazi istraživanja komercijalna rešenja na bazi grafena koja će omogućiti ne samo veću efikasnost nego i manji negativni uticaj na životnu sredinu [63], [66]. Takođe se očekuje i manja cena.

3.6 Pregled samonapajajućih bežičnih senzorskih čvorova

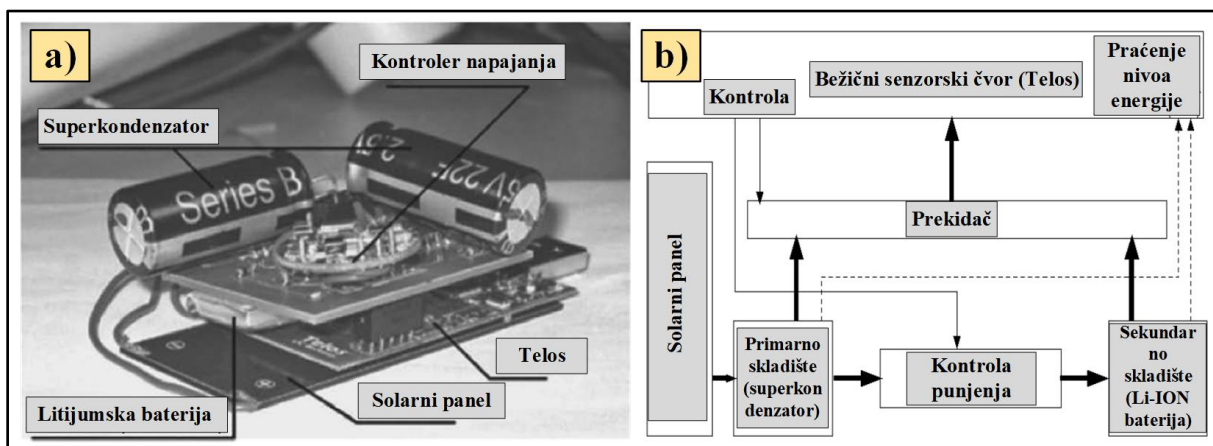
Solarna energija je lako dostupna čista energija i pogodna je za napajanje čvorova za praćenje parametara životne sredine. Usled ograničenja uzrokovano ciklusom dana i noći, glavni zadatak je obezbediti visoku efikasnost u upravljanju energijom. U opštem slučaju, sistem za prikupljanje energije Sunca se sastoji od ulaznog regulatornog kola, elementa za skladištenje energije i izlaznog regulatornog kola, kao što je prikazano na slici 3.7.

Sledi pregled rešenja za čvorove koji koriste sunčevu svetlost kao izvor energije iz okoline. Za sva navedena rešenja, karakteristično je da koriste proces prikupljanja sunčeve energije iz okoline, a međusobno se razlikuju prema veličini korišćenog solarnog panela, tipu i kapacitetu elemenata za skladištenje energije i kompleksnošću kola za punjenje. U literaturi se često kao reprezentativna rešenja pominju: *Heliomot* (engl. *Heliomote*), *Promoteus* (engl. *Prometheus*), *Everlast* (engl. *Everlast*) i *Ambimaks* (engl. *Ambimax*) [25], [67].

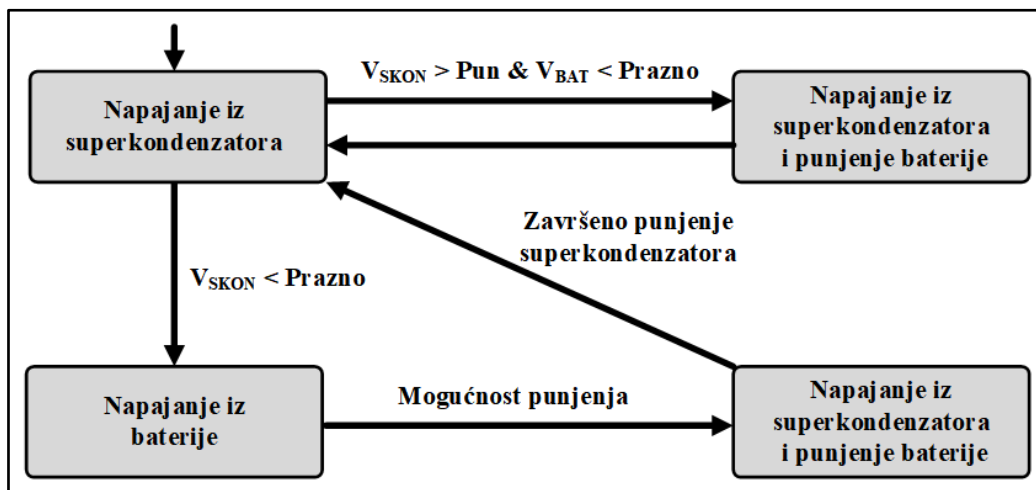
Heliomot čvor koristi solarni panel maksimalne snage 190 mW i posebno kolo za upravljanje energijom kao nadogradnju za komercijalni čvor pod nazivom *MICA2* [55]. Prikupljena energija iz okoline se skladišti u dve nikel-metal hibrid (*Ni-MH*) punjive baterije kapaciteta 1800 mAh. Ove baterije su osetljive na prepunjavanje i prekomerno pražnjenje, tako da postoji ugrađena zaštita koja sprečava ove neželjene efekte. Rešenje ne poseduje *MPPT* algoritam koji je zadužen za korišćenje maksimalne snage iz solarnog panela. Izgled i blok šema realizacije dati su na slici 3.15. Upravljanje energijom je realizovano posebnom hardverskom komponentom.



Slika 3.15 a) Izgled i b) blok šema HelioMot bežičnog čvora [25]



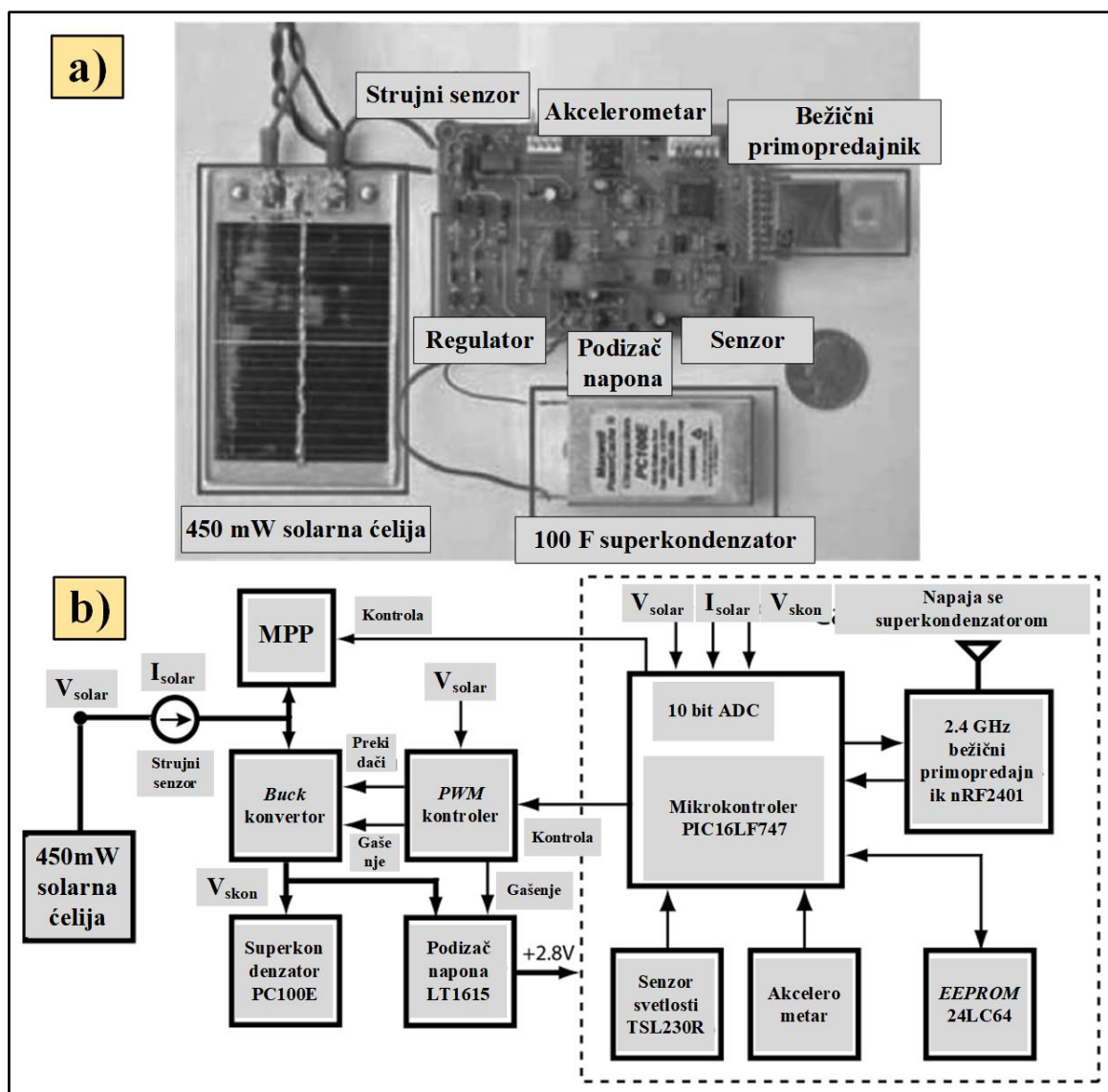
Slika 3.16 a) Izgled i b) arhitektura Prometheus bežičnog senzorskog čvora [25]



Slika 3.17 Algoritam rada Prometheus bežičnog senzorskog čvora sa primarnim i sekundarnim skladištem energije [25]

Prometheus rešenje predstavlja čvor koji je takođe baziran na komercijalnom čvoru pod nazivom TelosB [55]. Arhitektura Prometheus sistema je prikazana na slici 3.16. Kao izvor energije iz okoline koristi se solarni panel maksimalne snage 130 mW. Sadrži primarno i sekundarno skladište energije. Primarno napajanje koristi superkondenzator kapaciteta 22 F kao skladište i dopunjuje se sunčevom energijom. Sekundarno napajanje se sastoji od litijum

jonske baterije kapaciteta 200 mAh, koja se takođe može dopunjavati korišćenjem energije Sunca. U normalnom režimu rada uvek se koristi superkondenzator, a kada njegova energija opadne ispod definisanog nivoa, napajanje se prebacuje na litijum jonsku bateriju. Algoritam rada čvora i način korišćenja primarnog i sekundarnog napajanja dat je na slici 3.17. Napon superkondenzator je označen sa V_{SKON} , a napon litijum jonske baterije sa V_{BAT} . Za razliku od *Helimota*, *Prometeus* koristi softversko upravljanje energijom. Prisustvo dvostrukog skladišta za energiju komplikuje i poskupljuje projektovanje, ali ima određene prednosti u odnosu na *Helimot* sistem, gde se za skladištenje energije koriste samo punjive baterije. Naime, ranije je pomenuto da litijum jonske baterije imaju ograničen broj ciklusa punjenja, što utiče na životni vek čvora. S druge strane, superkondenzatori se odlikuju velikim brojem ciklusa punjenja, tako da u ovom slučaju njegovo korišćenje znatno produžava životni vek čvora. Litijum jonska baterija se koristi samo u slučaju kada se superkondenzator isprazni, što može da se dogodi, na primer, u toku noći.

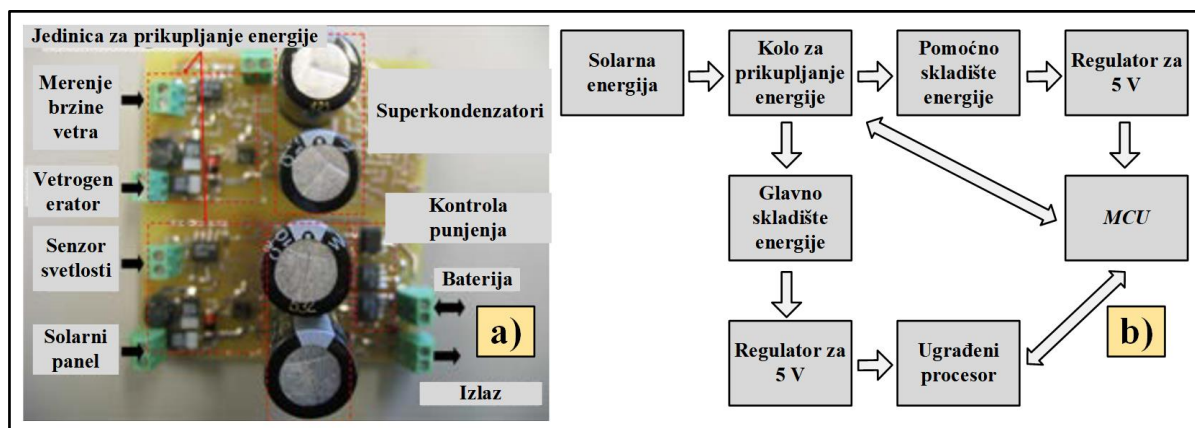


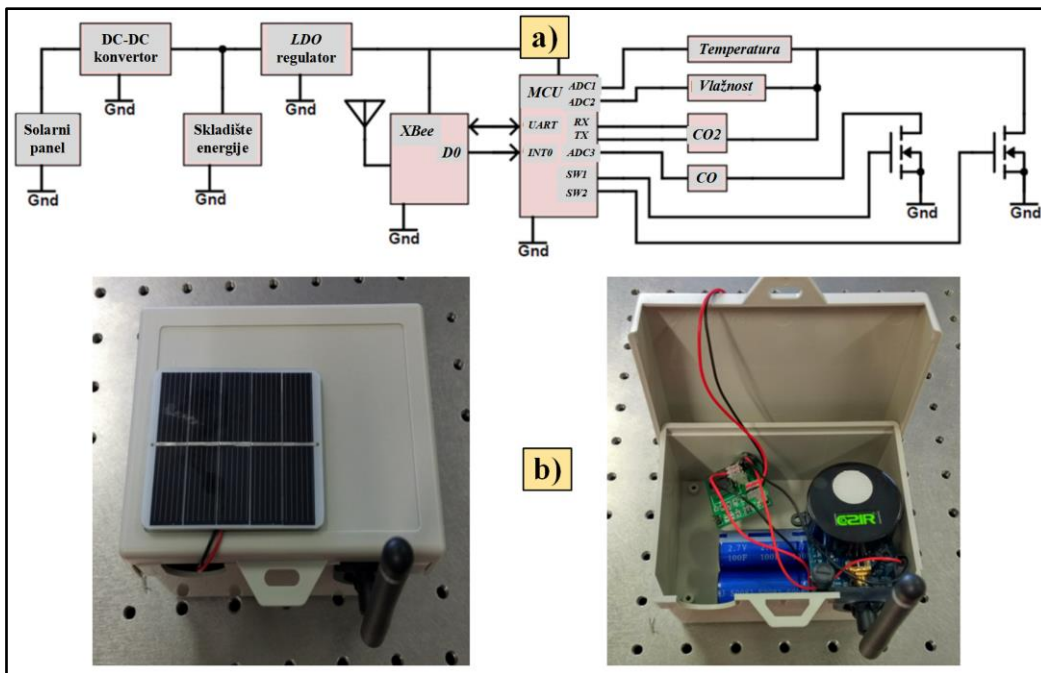
Slika 3.18 a) Izgled i b) arhitektura Everlast bežičnog senzorskog čvora [68]

Everlast [68] senzorski čvor je rešenje koje za skladištenje energije koristi samo suprkondenzator kapacitivnosti 100 F. Ovo je u potpunosti namensko rešenje sa integrisanim sensorima, radio komunikacijom i mikrokontrolerom, za razliku od *Helimota* i *Prometeusa*. Kao izvor energije koristi se solarni panel maksimalne snage 450 mW, a u okviru kola za upravljanje energijom postoji implementiran *MPPT* algoritam. Na slici 3.18 je prikazan blok dijagram rešenja. *Everlast* koristi poseban kontroler za punjenje superkondenzatora i prenos energije do potrošača. Kada se skladište energije napuni kontroler zaustavlja punjenje.

Ambimaks [69], slično kao *Prometeus* zadrži dva elementa za skladištenje energije, litijum-polimer bateriju kapaciteta 70 mAh i niz superkondenzatora ukupne kapacitivnosti od 10 F. Arhitektura rešenja prikazana je na slici 3.19, a u osnovi sastoji se od bežičnog senzorskog čvora pod nazivom Eko (engl. *Eco*) [70], na koji je nadograđen hibridni sistem za prikupljanje energije iz okoline. Hibridni sistem za prikupljanje energije iz okoline koristi energiju Sunca i vetra. Modularno projektovanje omogućava da se rešenje nadogradi izvorima energije koji koriste protok vode i vibracije. Superkondenzator predstavlja primarno skladište energije dok je litijum-polimer baterija sekundarno skladište. Punjenje se kontroliše softverski, a postoji i hardverski realizovan *MPPT* algoritam. Kao izvor energije iz okoline koristi se solarni panel maksimalne snage od 400 mW. Međutim, dimenzije sistema su velike, postoji puno elektronskih komponenti kao podrška za različite izvore energije iz okoline, a sve to utiče na cenu koja nije mala.

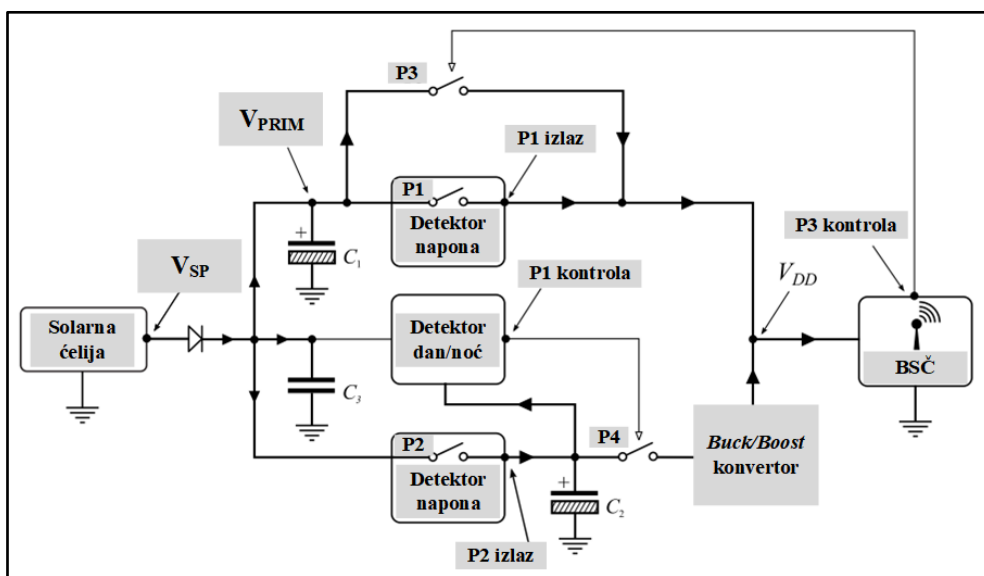
Slično *Prometeusu* i *Ambimaksu* u radu [71] je opisano rešenje koje koristi primarno i sekundarno skladište energije, a kao izvor energije iz okoline koristi se solarni panel maksimalne snage od 450 mW. Primarno skladište energije čine dve ćelije od 100 F vezene redno, što je ukupno 50 F. Kao sekundarno napajanje se koristi litijum jonska baterija kapaciteta 2600 mAh. Blok šema i izgled čvora je dati su na slici 3.20. Sa blok šeme se vidi da čvor sadrži četiri senzora, za temperaturu, vlažnost, ugljen-dioksid i ugljen-monoksid. Mikrokontroler kontroliše napajanje prema sensorima preko MOSFET tranzistora. Rešenje je upakovano u vodootporno kućište za potrebe instalacije u terenskim uslovima. Integrisani hardverski *MPPT* algoritam vodi računa da se iz solarnog panela koristi maksimalna snaga u svakom trenutku. Potrošnja čvora u uspavanom režimu iznosi oko 200 μ A.



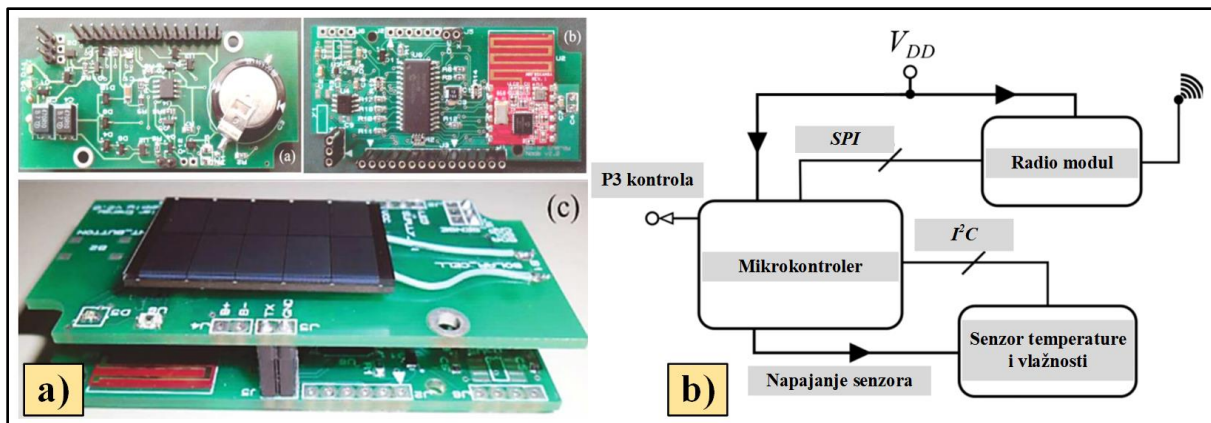


Slika 3.20 a) Arhitektura i b) izgled bežičnog senzorskog čvora [71] za merenje parametara životne sredine

U radu [72] je opisan čvor koji je specijalizovan sa primene u uslovima sniženog inteziteta osvetljenosti. Kao izvor snage koristi se solarni panel maksimalne snage 111 mW, a kao element za skladištenje superkondenzator kapacitivnosti 1,5 F. U radu je prikazan detaljan proračun vrednosti kapacitivnosti superkondenzatora, tako da autonomija čvora bude najmanje 12 sati. Proračunata je vrednost od 220 mF, ali je u konačnom rešenju usvojena vrednost of 1,5 F, kako bi se obezbedila znatna rezerva energije. Potrošnja čvora je oko 8 μ A u uspavanom režimu rada. Čvor ima ugrađeni senzor za merenje temperature i vlažnosti. Blok šeme čvora i izgled dati su na slici 3.21 i 3.22.



Slika 3.21 Blok dijagram napajanja kola za prikupljanje energije iz okoline iz [72]



Slika 3.22 a) Izgled i b) arhitektura realizovanog bežičnog senzorskog čvora iz [72]

Analizom prikazanih rešenja može se zaključiti da kombinacija prikupljanja solarne energije iz okoline i superkondenzatora kao elementa za skladištenje energije, može da se iskoristi za napajanje čvora. Ipak, za potrebe praćenja parametara životne sredine može se zaključiti da su pojedina rešenja ili skupa, ili glomaznog oblika ili neprilagođena za terenske uslove. Korišćeni superkondenzatori uglavnom imaju velike vrednosti što utiče na krajnju cenu i dimenzije čvora. Kombinacija primarnog i sekundarnog skladišta energije se često koristi kao osiguranje da čvor ne ostane bez napajanja u toku normalnog rada. Kombinacija više izvora energije iz okoline može da poveća stepen sigurnosti u napajanju čvora, ali se cena i dimenzije povećavaju. Ukoliko se sopstvena potrošnja čvora u uspavanom režimu smanji ispod $10 \mu\text{A}$, moguće je koristiti samo superkondenzator kao element za skladištenje.

4. Projektovanje namenskog samonapajajućeg bežičnog senzorskog čvora

Broj potencijalnih primena BSM-a je ogroman i stalno se povećava. Aktuelna istraživanja u domenu BSM-a, čak i teorijska razmatranja, imaju za cilj eventualnu praktičnu upotrebu. U ovoj disertaciji, istraživanje je usmereno ka primeni u oblasti praćenja parametara životne sredine. Jasno je da BSM-e u pomenutoj oblasti mogu da daju značajan doprinos, ali specifičnost primene i neatraktivnost utiču na smanjeno interesovanje. Sledi detaljan opis projektovanja namenskog čvora za praćenje isključivo parametara životne sredine.

4.1 Definisanje osnovnih zahteva za projektovanje bežičnog senzorskog čvora

Kao što je već rečeno, čvor je elektronski uređaj namenjen za prikupljanje podataka sa jednog ili više senzora i koji se šalju bežičnim putem do sličnog uređaja ili uređaja koji je povezan na sistem za arhiviranje. Komercijalni čvorovi su namenjeni za široku upotrebu u oblasti BSM-a, ali su upravo iz tog razloga za pojedine specifične primene komplikovaniji i skuplji. Osnovne karakteristike nekoliko najpopularnijih komercijalnih čvorova date su u [55]. Može se primetiti da je srednja cena svih rešenja preko 100 evra i to uglavnom za osnovnu ploču bez dodatnih senzora. Za primene u oblasti praćenja parametara životne sredine potrebno je nadograditi i prilagoditi komercijalna rešenja, što dodatno povećava ukupnu cenu. Izvršena je analiza komercijalnih rešenja [55] i razmotrena je njihova upotrebljivost u oblasti istraživanja. Pre analize, usvojeni su osnovni zahtevi koje čvor u svojoj krajnjoj implementaciji treba da ispuni, kako bi se smatrao kvalitetnim rešenjem:

1. niska cena (proizvodnje sastavnih elemenata, ugradnje i održavanja),
2. pouzdan rad (pre svega u nepristupačnim i surovim terenskim uslovima),
3. prilagodljivost specifičnim primenama (širok opseg primena, skalabilnost), i
4. minimalan uticaj na životnu sredinu.

Zahtevi su nastali kao rezultat iskustva i prakse u oblasti praćenja parametara životne sredine, ali i analizom potencijalnih primena u oblasti.

Niska cena je svakako najvažniji zahtev, jer su sredstva namenjena za praćenje životne sredine mala i ograničena, tako da je osnovni cilj maksimalno iskoristiti raspoloživi potencijal. Prema dosadašnjoj praksi, prioritet uvek imaju projekti koji direktno utiču na zdravlje i život

ljudi. Međutim, na ovaj način mnogi bitni aspekti očuvanja životne sredine ostaju nepokriveni. Dugoročni projekti koji ne utiču vidljivo na čoveka imaju manji prioritet. Države sa svojim institucijama izdvajaju deo budžeta za potrebe zaštite životne sredine i zakonski regulišu da se uticaj čoveka na prirodu dovede do određene prihvatljive granice. Sredstva iz budžeta, naročito kod nerazvijenih zemalja su ograničena. Zato je za BSM-e koje se koriste u okviru zaštite životne sredine, niska cena jedan od najvažnijih zahteva. Većina tekućih istraživanja u ovoj oblasti su usmerena ka ostvarivanju ovog cilja.

Ukupni troškovi ugradnje BSM-e se mogu podeliti na:

- troškove opreme (hardver i softver),
- troškove instaliranja na terenu i
- troškove održavanja nakon instaliranja.

Ako se usvoji da su troškovi ugradnje mreže na terenu neizbežni i da se ne mogu izbeći, drugi načini da se ukupna cena smanji je minimizacija troškova proizvodnje sastavnih elemenata BSM-e, tj. čvorova, i minimizacija troškova održavanja. Posebno je potrebno razmotriti uticaj troškova održavanja, koji se često definišu se kao procenat od ukupne cene BSM-e na godišnjem nivou, a u praksi su veoma nepredvidivi. Za BSM-e u oblasti životne sredine neodređenost troškova je veća zbog planirane dugoročne (i preko 10 godina) eksploatacije, tako da su vrlo često uporedivi sa cenom implementacije. Najveći deo troškova održavanja se koristi na skupu i stručnu radnu snagu, a zadaci koje ona obavlja su zamena baterija i oštećenih čvorova, popravka i reinstalacija opreme na terenu, nadgledanje i zaštita opreme i sl. Kada se BSM-e instaliraju na nepristupačnim, opasnim i hazardnim terenima, stanje se dodatno usložnjava, a troškovi održavanja rastu. Imajući u vidu navedene činjenice, zahtev za niskom cenom je u ovoj disertaciji razmatran ne samo u smeru smanjivanja cene jediničnog čvora, već i smanjivanje troškova održavanja.

Planirana upotreba čvorova u terenskim uslovima, koji su često nepristupačni i surovi, zahteva određeni stepen robusnosti u konstrukciji i pouzdanost u radu. Robusnost i pouzdanost su bitni zahtevi, jer utiču na smanjivanje ukupnih troškova održavanja. Čvorovi koji usled vremenskih prilika i uticaja okoline ispadaju često iz režima normalnog rada, remete postupak praćenja parametara okoline. Za ostvarivanje ovih zahteva potrebno je predvideti moguće uticaje sredine, kao što su velike varijacije spoljašnje temperature, vlažnost sredine, atmosferske padavine i dr. Izabrane elektronske komponente i senzori moraju da podrže industrijski opseg temperatura od -40°C do $+85^{\circ}\text{C}$. Zatim, neophodno je čitav hardver upakovati u posebno kućište koje je otporno na padavine, sunčevo zračenje i uticaj promenljivih vremenskih uslova. Teško je u laboratorijskim uslovima proveriti sve moguće uticaje, tako da je neophodno pažljivo planiranje i proučavanje literature usmerene ka sličnoj primeni.

Treći uslov da čvor može da se koristi za različite primene je u suprotnosti sa prvim uslovom, da se obezbedi što niža cena. Logično je da multifunkcionalnost zahteva dodatne komponente koje mu to omogućuju, a one povećavaju jediničnu cenu po čvoru. Dakle, zadatak je pronaći optimalno rešenje koje zadovoljava oba uslova, nisku cenu i zadovoljavajuću multifunkcionalnost. Ovo u praksi znači da se mora žrtvovati multifunkcionalnost čime se

degradira prilagodljivost senzorskog čvora specifičnim primenama. Ipak, ukoliko je primena relativno usmerena, kao što je praćenje parametara životne sredine, moguće je ostvariti visok stepen multifunkcionalnosti. Međutim, takav čvor za neke druge primene, na primer u pametnim gradovima ili mrežama u industriji, pokazuje izvesna ograničenja ili čak neupotrebljivost. Prilagodljivosti komercijalnih čvorova je zadovoljavajuća, ali po znatno većoj ceni. Namensko projektovanje čvora treba pre svega da omogući nisku cenu, što je osnovni prioritet. Ukoliko se projektovani čvor može prilagoditi velikom broju potencijalnih primena u oblasti praćenja parametara životne sredine, može se smatrati kvalitetnim rešenjem. U tehničkom smislu, čvor je prilagodljiv ukoliko je u stanju da podrži veliki broj komercijalnih senzora.

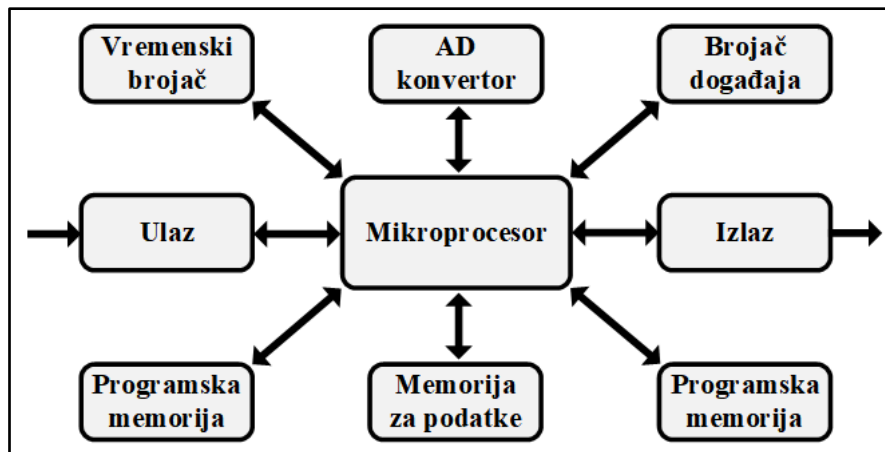
U toku životnog veka BSM-e, sasvim je očekivano da se u toku rada, u promenljivoj prirodnoj sredini, pojedini čvorovi nepovratno izgube. Zato je uslov koji zahteva minimalan uticaj na životnu sredinu od izuzetne važnosti. Ukoliko su čvorovi napravljeni od materijala koji su zagađujuće materije postoji velika verovatnoća da njihova namena bude suprotna u odnosu na planiranu, što je posebno opasno u osetljivim i zaštićenim područjima.

Razmatranjem postavljenih uslova moguće je definisati opis jednog bežičnog senzorskog čvora. To je namenski projektovan elektronski uređaj sa mnogo manjom cenom u odnosu na komercijalna rešenja, a manja cena je rezultat specifične primene i korišćenja manjeg broja elektronskih komponenti koje doprinose da su i dimenzije manje. Manji čvor zahteva manje materijala za kućište, što smanjuje cenu, ugradnja na terenu je lakša, a proizvodi se i manje otpada u slučaju gubitka čvora. Samo namenski projektovanim hardverom moguće je ostvariti najbolji odnos između cene i performansi uređaja. Čvor koji je namenski projektovan za određenu primenu, uvek ima jednostavniju strukturu i manju cenu.

U funkcionalnom smislu, čvor je uređaj koji većinu vremena provodi u uspavanom stanju kada zahteva struju od nekoliko desetina mikroampera. U programski definisanim intervalima uređaj se budi, uzima podatke sa senzora i šalje ih bežičnim putem. Potrošnja čvora u ovom slučaju zavisi od vrste i broje senzora i tipa bežične komunikacije. Moderni integrisani senzori za merenje parametara sredine zahtevaju veoma malo energije, tako da njihov broj ne predstavlja veliko opterećenje. Postoji određen broj posebnih senzora koji zahtevaju više energije i zato je usvojena je gornja granica od 200 mA kao maksimalna moguća potrošnja čvora u jednom trenutku. Naravno, ukoliko postoji veći broj senzora sa većom potrošnjom, uvek je moguće očitavati ih sekvencijalno. Ovo utiče na ukupnu potrošnju, ali zato ne remeti funkcionalnost čvora.

4.2 Izbor ključnih komponenti

Bežični senzorski čvor podrazumeva jasno definisanu strukturu koja je prikazana na slici 2.3 i sastoji se iz četiri podsistema, za upravljanje, bežičnu komunikaciju, obradu i prilagođenje senzora i podsistema za napajanje. Izostanak bilo kojeg podsistema remeti definisanu funkcionalnost čvora. Moguće je ipak da pojedini podsistemi budu fizički realizovani, na primer, na jednom čipu, ali su pomenuti podsistemi prisutni u virtuelnom pogledu.



Slika 4.1 Uopštena struktura upravljačkog podsistema čvora baziranog na mikrorračunaru kao što je na primer mikrokontroler

Podela na pomenute podsisteme olakšava projektovanje, a korisniku je lakše da razume performanse čvora. Ako čvor karakteriše modularan dizajn, što je čest slučaj, podela ima još više smisla.

Podsistem za upravljanje i kontrolu se obično sastoji od mikrokontrolera ili procesora, koji praktično predstavljaju mikrorračunar. Sastavni delovi su memorija za program i podatke, aritmetičko logička jedinica, ulazno-izlaznog podsistem i drugi elementi prikazani na slici 4.1.

Mikrokontroler je zadužen za upravljanje i očitavanje podataka sa senzora, zatim upravlja modulom za bežičnu komunikaciju, a vrlo često u pojedinim rešenjima ima mogućnost kontrole ili u najblažem slučaju omogućava prikupljanje podataka o trenutnom stanju podsistema za napajanje. Mikrokontroler upravlja režimima rada i zato je neophodno da u svakom trenutku postoji njegovo napajanje, jer se u suprotnom gubi informacija o trenutnom stanju. Napredniji mikrokontroleri poseduju unapređenu obradu podataka sa senzora, izvršavaju kompleksne algoritme, a poseduju i dovoljno memorije za čuvanje određene količine podataka sa senzora. Ipak, za čvor se najčešće koriste mikrokontroleri sa veoma malom potrošnjom u uspavanom režimu rada i čija cena nije velika. Prilikom izbora mikrokontrolera razmotrane su sledeće osobine:

- cena mikrokontrolera (na 1000 komada tipično),
- broj i raznovrsnost različitih perifernih jedinica,
- potrošnja u uspavanom i aktivnom režimu rada,
- raspoloživost razvojnih sistema i alata, kao i podrška u otvorenom kodu od strane proizvođača i stručne zajednice, i
- pozitivni primeri i rezultati od strane naučne zajednice.

Razmatrano je nekoliko komercijalnih mikrokontrolera i na kraju je izabran *MPS430G2553* [73] proizvođača *Texas Instruments*. Cena se kreće ispod jednog evra na 1000 komada, podržava mnoštvo različitih komunikacionih interfejsa i periferija, veoma brzo se budi iz uspavanog režima, poseduje pet režima rada za štednju energije, a u stanju pripravnosti troši samo 500 nA. Osim toga, ovaj mikrokontroler je veoma popularan tako da postoji puno

dostupne dokumentacije što omogućava brzu izradu prototipova i firmvera. Generalno, mikrokontroleri proizvođača *Texas Instruments* koji pripadaju seriji *MSP430* su čest izbor prilikom izrade bežičnih senzorskih čvorova, a razlozi su veoma mala potrošnja, dobra podrška i prihvatljiva cena. Brojni naučni rezultati dokazuju ovu tvrdnju, a neki su prikazani u radovima [6], [24], [55], [56].

Razvoj BSM-a prati razvoj integrisanih rešenja za bežičnu radio komunikaciju. Danas skoro svaki proizvođač elektronskih komponenti u svom proizvodnom programu sadrži neku integrisanu komponentu za kratkodometnu bežičnu komunikaciju. Čvorovi koriste uglavnom kratkodometni bežični prenos podataka iz više razloga. Jedan od najbitnijih je mala potrošnja, tako da se za napajanje mogu koristiti baterije. Komercijalni radio primopredajnici kratkog dometa koriste slobodni tzv. *ISM* (engl. *Industrial, Scientific and Medical*) opseg frekvencija, jer za rad u ovom opsegu nije potrebna dozvola od strane nadležnog tela za upravljanje frekvencijskim resursima. Od posebnog interesa su radio primopredajnici koji rade na višim frekvencijama, jer postižu veliku brzinu prenosa i manja je međusobna interferencija. Rad na višim frekvencijama pruža mogućnost korišćenja antena malih dimenzija, što utiče na smanjivanje ukupnih dimenzija čvora.

Razmotreno je više komercijalnih integrisanih rešenja, a zahtevi su relativno slični kao kod izbora mikrokontrolera. Nakon analize, izabrano je integrisano rešenje *nRF24L01* [74] proizvođača *Nordic Semiconductor*. Ovo rešenje se odlikuje niskom cenom od 1,5 evra na 1000 komada, koristi samo nekoliko spoljašnjih komponenti, tako da fizički zauzima mali prostor na štampanoj ploči, koristi *ISM* spektar na 2,4 GHz, podržava prenos podataka do 2 Mbps, troši do 15mA u stanju prijema i slanja podataka i svega 900 nA u neaktivnom stanju. U odnosu na poznata konkurentna rešenja kao što su *Xbee* [75] od proizvođača *Digi International* i *CC25xx* [76] serije proizvođača *Texas Instruments*, potrošnja je skoro dvostruko manja. Upravljanje komunikacijom se vrši preko standardnog *SPI* interfejsa (engl. *SPI – Serial Peripheral Interface*), koji je podržan od strane izabranog mikrokontrolera. Brojna naučna literatura ima pozitivne rezultate u radu sa ovim integrisanim rešenjem [68], [70], [77].

Nakon izbora ključnih komponenti za dva od ukupno četiri podsistema čvora, izvršena je analiza za preostale podsisteme. Pošto je čvor namenjen za praćenje parametara životne sredine od interesa je dodati pojedine senzore koji u većini primena mogu biti korisni. Osim toga, u toku testiranja prototipa mogu pružiti potrebne podatke za verifikaciju implementiranog rešenja. Iz ovih razloga kao deo senzorskog podsistema dodati su senzori za temperaturu, pritisak i vlažnost vazduha. Kao minijaturne komponente, oni ne zauzimaju mnogo prostora na štampanoj ploči, a mogu se u toku fabrikacije izostaviti tako da ne utiču na ukupnu cenu čvora. Izabrani su senzor za pritisak *MPL3115* [78], proizvođača *Freescale* i senzor za temperaturu i vlažnost *Si7020* [79], proizvođača *Silicon Labs*. Ovi senzori su kao što je već navedeno minijturni, imaju malu potrošnju i njihovi podaci su dostupni mikrokontroleru preko standardnog *I²C* interfejsa.

4.2.1 Definisane ključnih komponenti podsistema za napajanje

Podsistem za napajanje zahteva opsežniju analizu. Jedan od važnih zahteva je da se održavanje čvora svede na minimum. Održavanje senzorskih čvorova koji su postavljeni na

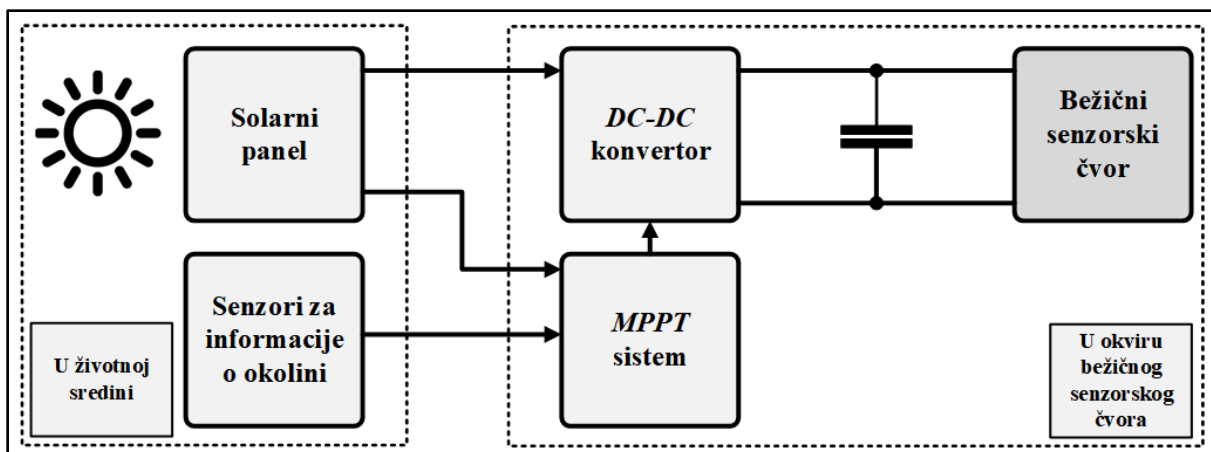
nepristupačnim terenima kao što su močvare, vulkani, vodene površine, guste šume i prostori naseljeni divljim životinjama je često veoma teško, skupo, pa čak i neizvodljivo u pojedinim primenama. Pošto najveći procentualni udeo u održavanju senzorskog čvora čini zamena potrošenih baterija, razmatran je proces prikupljanja energije iz okoline i usvojen kao logični pravac u daljem istraživanju. Zbog potencijalne primene u terenskim uslovima izabrane su fotonaponske ćelije kao izvor energije. Usled ciklusa dana i noći, planiranje napajanja baziranog na solarnoj energiji predstavlja veoma bitan deo u disertaciji.

Za objašnjenje ograničavajućih faktora koristi se tzv. „projekttni trougao“ koji je prikazan na slici 4.2. Ograničavajući faktori u ovom slučaju su sredina, prikupljač energije (engl. *Harvester*), i naravno aplikacija. Cilj trougla je da slikovito pojasni međusobnu zavisnost ova tri faktora. U praksi, jedno ograničenje je poznato, dok se preostala podešavaju na zadovoljavajućoj udaljenosti od optimalne tačke u centru trougla. Na primer, u našem slučaju želimo da uređaja bude što manji, ali ipak treba odabrati solarni panel dovoljnih dimenzija za generisanje potrebne energije. Slično razmatranje u vezi sa solarnim panelom važi i za dimenzije superkondenzatora, o čemu će biti reči kasnije. U zavisnosti od nivoa potrebne snage neophodne za normalan rad čvora treba izabrati solarni panel i superkondenzator. Takođe, potrebno je razmotriti sve granične slučajeve, pozitivne i negativne. Na primer, čvor može biti funkcionalan pri dovoljnom intezitetu sunčeve svetlosti kada je vreme vedro, ali ne kada je povećana oblačnost. U svakom slučaju, rezultati analize doprineše da čvor bude funkcionalan pri najgorim mogućim uslovima, a izabrane komponente to moraju da podrže. S druge strane, radi veće sigurnosti, moguće je predimenzionisati određene komponente, na primer veći solarni panel ili superkondenzator, ali je to u suprotnosti sa osnovnim zahtevima da čvor ima nisku cenu i male dimenzije.

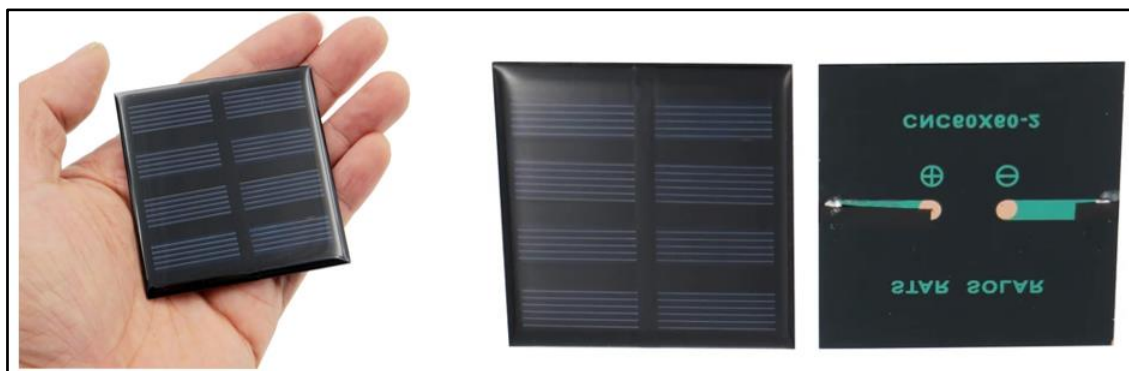
Na slici 4.3 je prikazan model podsistema za napajanje čvora. Solarni panel preko *DC-DC* konvertora energije dopunjuje skladište energije. Konvertorsko kolo sadrži implementiran *MPPT* algoritam, koji obezbeđuje korišćenje maksimalne snage iz solarnog panela. Solarni panel, kao i većina senzora za merenje parametara sredine, fizički se nalaze izvan zaštitnog kućišta čvora.



Slika 4.2 Objašnjenje ograničenja u projektovanju čvora korišćenjem „projektnog trougla“



Slika 4.3 Blok dijagram sistema za napajanje čvora koji koristi solarni panel i element za skladištenje energije



Slika 4.4 Izgled izabranog minijaturnog solarnog panela snage 0,3 W, sa tačkama maksimalne struje i napona od 0,15 A i 2,0 V

Komercijalni solarni paneli danas se mogu naći u različitim dimenzijama i veličinama. Izlazne struje i naponi variraju u širokom opsegu. U zavisnosti od konstrukcije, primenjenih materijala i tehnologije izrade, efikasnost se iz godine u godinu povećava i trenutno se mogu naći komercijalni solarni paneli sa čak 20% efikasnosti.

Potrošnja većine komercijalnih bežičnih senzorskih čvorova u uspavanom stanju je reda nekoliko desetina mikroampera, a u aktivnom stanju nekoliko desetina miliampera [55]. Imajući u vidu ove podatke i proučavanjem dostupnih povoljnih komercijalnih solarnih panela, izabran je proizvod maksimalne snage 0,3 W, što je za čitav red veličine više nego što je potrebno tipičnom čvoru. Tačnije, izabran je solarni panel sa nominalnim naponom od 2 V i struje 150 mA i prikazan je na slici 4.4.

Ovaj izbor je logičan ako se uzme u obzir da sunčeva svetlost nije uvek dostupan izvor energije, a u toku dostupnosti zbog promenljivih vremenskih uticaja nije uvek moguće računati na maksimalnu snagu. Osim male snage, fotonaponska ćelija se odlikuje i malim dimenzijama, širine i dužine 6 cm, tako da za razliku od ostalih izvora energije iz okoline neće drastično uticati na povećanje dimenzija senzorskog čvora. Cena izabranog solarnog panela se kreće ispod jednog dolara po komadu, za male serije, dok se na veće serije cena drastično smanjuje.

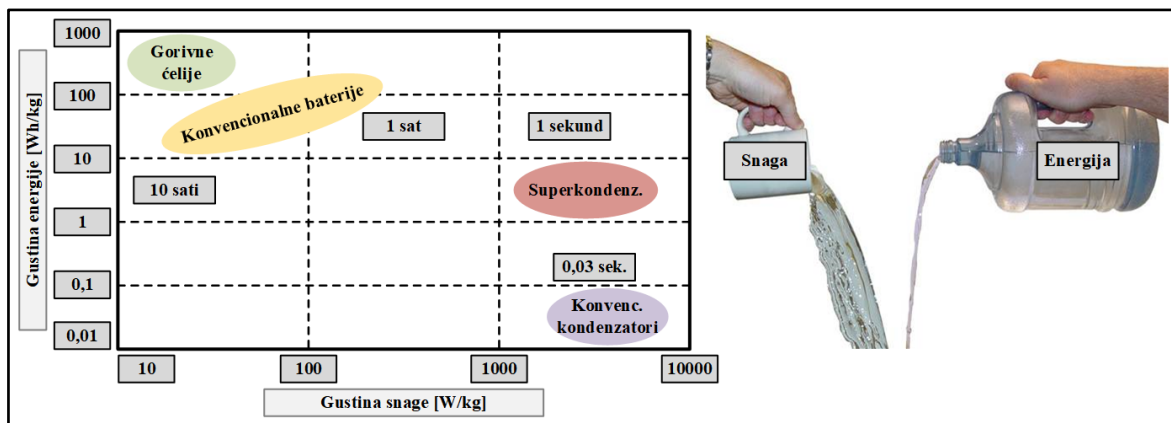
Iako je prisustvo solarnog izvora energije dovoljno za funkcionisanje senzorskog čvora, u cilju ostvarivanja neprekidnog rada, neophodno je obezbediti konstantan izvor energije. Pošto je solarna energija nedostupna u toku noći, potrebno je energiju u toku dana prikupiti i uskladištiti. Kao što je već napomenuto, punjive baterije, naročito litijum jonske, pokazale su se u mnogim primenama kao idealno skladište za prikupljenu energiju iz okoline. Međutim, čak i sekundarne baterije imaju svoj vek trajanja, koji je ipak mnogo duži u poređenju sa nepunjivim baterijama. Posle propisanog radnog veka, neophodno je zameniti baterije, što utiče na povećanje troškova održavanja. S druge strane, nelogično je u oblasti očuvanja životne sredine koristiti materijale koji najviše utiču na njeno zagađenje. Sekundarne baterije se prave od metala koji se smatraju velikim izvorom zagađenja. Ove baterije je neophodno stručno reciklirati i paziti da ne dođu u kontakt sa prirodom [80]. U toku eksploatacije BSM-e sasvim je moguće da će pojedini senzorski čvorovi biti izgubljeni usled neplaniranih prirodnih i društvenih uticaja. Kao sve popularnija alternativa punjivim baterijama koriste se superkondenzatori.

4.2.2 Izbor superkondenzatora

Gustina energije tj. kapacitet superkondenzatora je za red veličine manji od punjivih baterija. Slika 4.5 pokazuje ovu zavisnost, ali pokazuje i dobru osobinu superkondenzatora, a to je mogućnost da za iste dimenzije može da isporuči veću vršnu snagu.




Ovo je poželjna karakteristika izvora energije, a naročito ako je potrošač čvor koji radi u diskontinualnom režimu, gde se tokom najvećeg dela vremena nalazi u uspavanom i vrlo kratko u aktivnom stanju. Od interesa je da se čvor nalazi što kraće u aktivnom stanju kako bi se uštedela raspoloživa energija. Ukoliko je na senzorski čvor priključeno više senzora, energija se može dodatno uštedeti ako su svi senzori aktivni u istom trenutku, ali je za ovaj način rada potrebna veća vršna snaga, što je upravo prednost superkondenzatora.

Superkondenzator je elektrohemijski energetska sistem koji se sve više koristi za napajanje čvorova. Superkondenzator je skalabilan, tj. njegove performanse su proporcionalne veličini i težini. Druge povoljne osobine su vremenski brzo punjenje, veliki broj ciklusa punjenja, temperaturna stabilnost, mala ekvivalentna serijska otpornost i veoma mala struja curenja.



Slika 4.5 Razlika u gustini energije i gustini snage između punjive baterije i superkondenzatora

Tabela 4.1 Izgled razmatranih superkondenzatora sa najvažnijim karakteristikama

Redni broj	Izgled	Oznaka i proizvođač	Kapacitivnost [F]	Radni napon [V]	Struja curenja	Dimenzije i oblik	Cena @1k EUR
1		<i>BZ015A104ZSB</i> AVX	0,10	5,5	10 [μA] (max)	28,0 x 17,0 x 7,2 [mm] SMT, planaran	5,86
2		<i>EMHSR-0001C5-005R0</i> Nesscap	1,50	5,0	20 [μA] (max)	17,5 x 9,5 x 23,0 [mm] Nije SMT, cilindar	2,99
3		<i>EECF5R5U105</i> Panasonic	1,00	5,5	?	21,5 x 7,5 [mm] Nije SMT, cilindar	2,06
4		<i>DMF4B5R5G105M3DTA0</i> Murata	1,00	5,5	10 [μA] @96h	30,0 x 14,0 x 3,7 [mm] SMT, planaran	6,59
5		<i>DMT334R2S474M3DTA0</i> Murata	0,47	4,2	5 [μA] @96h	21,0 x 14,0 x 3,5 [mm] SMT, planaran	3,17
6		<i>FC0V224ZFTBR24</i> Kemet	0,22	3,5	?	10,8 x 10,8 x 5,5 [mm] SMT, nizak, cilindar	1

Za razliku od baterija, superkondenzatori imaju mnogo manji kapacitet skladištenja energije, tako da oslanjanje samo na superkondenzator kao izvor energije nije podesno za većinu aplikacija. Superkondenzator se najviše koristi u okviru kola za napajanje, gde je neophodno saopštiti ili primiti velike vrednosti snage u veoma kratkom periodu vremena. Dakle, primena u oblasti BSM-a nije bila osnovna namena, ali se poslednjih godina radi u ovom smeru.

Više vrsta komercijalnih superkondenzatora su uzeti u razmatranje, a zahtevi koji su oni morali da ispune su sledeći:

- niska cena, što je u skladu sa osnovim zahtevom projektovanja da ukupna cena bude što niža,
- minijaturan dizajn, što je u skladu sa zahtevom da projektovani čvor ima što manji uticaj na životnu sredinu, da koristi manje kućište i da se lako instalira, i
- da su mu elektronske karakteristike što kvalitetnije za primenu, kao što su radni napon, struja curenja, što veća kapacitivnost i sl.

U tabeli 4.1 dat je pregled šest različitih komercijalnih superkondenzatora.

Upoređeno je pet osnovnih karakteristika: kapacitivnost, maksimalan radni napon, struja curenja, oblik (dimenzije) i naravno cena. Kao što je već napomenuto, cena je važan faktor prilikom izbora komponente, ali ne i jedini u ovom slučaju. Razmatrana je cena na 1000 komada, što je uobičajena praksa prilikom planiranja troškova za masovnu proizvodnju. Prilikom analize usvojeno je da projektovani čvor mora biti konstantno pod napajanjem, čak i u toku noći. Pretpostavka je da noć traje oko 12 sati i da se u tom periodu superkondenzator ne dopunjava. Takođe, usvojeno je da potrošnja struje čvora u uspavanom režimu iznosi 10 μA. Napon na superkondenzatoru $V(t)$ se menja eksponencijalno:

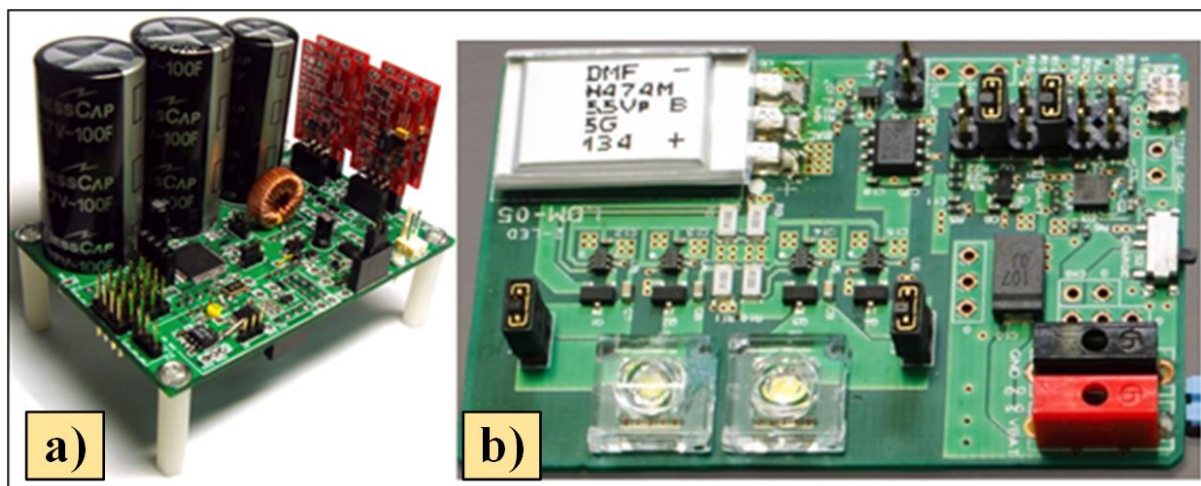
$$V(t) = V_0 e^{-\frac{t}{RC}}, \quad (4.1)$$

gde je V_0 početni napon napunjenog superkondenzatora, t je proteklo vreme, R je ukupna vrednost otpornosti potrošača i C je kapacitivnost superkondenzatora. Iz formule (4.1) se može izračunati koliko je vremena potrebno da se superkondenzator isprazni do vrednosti napona za koju se smatra da je prazan ili neupotrebljiv za napajanje čvora. Vreme pražnjenja $t_{\text{pražnjenja}}$ se računa kao:

$$t_{\text{pražnjenja}} = -R \cdot C \cdot \ln \frac{V_0}{V}. \quad (4.2)$$

Ako se usvoji da je napon napajanja čvora 3 V, a da u uspavanom stanju troši struju od 10 μA , dobija da je ukupna vrednost ekvivalentne otpornosti od oko 300 k Ω . Smatra se da je superkondenzator koristan u opsegu napona od 3,6 V do 2,7 V, gde su izabrani mikrokontroler, integrisano kolo za radio komunikaciju i većina komercijalnih senzora operativni. Ako se uvrste vrednosti kapacitivnosti posmatranih superkondenzatora, dobijaju se njihova vremena pražnjenja. Za vrednost kapacitivnosti od 0,47 F to vreme iznosi oko 40.500 sekundi, tj. oko 11,5 sati. Zato je za proizvode 1) i 6) usvojeno da nemaju dovoljnu kapacitivnost. Upravo je ovo jedan od presudnih razloga zašto je *DMT334R2S474M3DTA0* [81] proizvođača *Murata*, izabran kao rešenje za testiranje i merenje u vezi sa održivošću čvora u pogledu napajanja. Ipak, nije kapacitivnost jedini razlog. Razmatran je i radni napon. Pomenuto je da su izabrani mikrokontroler, radio čip i senzori operativni do maksimalno 3,6 V. Radni napon *DMT334R2S474M3DTA0* superkondenzatora je 4,2 V, dok ostala rešenja imaju radni napon preko 5 V. Jasno je da je procenat iskorišćenja mnogo bolji pri naponu od 4,2 V, što je normalan inženjerski pristup u izboru komponenti. Struja curenja je takođe važan parametar. Kada je čvor u uspavanom stanju, ova struja najviše utiče na trajanje energije superkondenzatora, jer je uporediva sa potrošnjom svih ostalih elektronskih komponenti. Iz tabele 4.1 se vidi da su te vrednosti reda veličine od 5 do 10 μA . Interesantno je da proizvođači često ovaj parametar definišu kao vrednost posle vremena od 96 sati. Struja curenja superkondenzatora nije konstantna. Najveća je pri maksimalnom naponu, a kako napon superkondenzatora opada eksponencijalno, tako opada i struja curenja. Zato se kao kataloški podatak koristi struja curenja posle proteklih 96 sati, a kod nekih superkondenzatora posle 72 sata. Pojedini proizvodi se definišu samo maksimalnom strujom curenja.

Dimenzije, tj. oblik superkondenzatora ima važnu ulogu pri izboru, pre svega zbog zahteva za minijaturnim dizajnom. Superkondenzatorom pod brojem 2) u tabeli 4.1 povećava ukupnu visinu na štampanoj ploči. Osim toga, zajedno sa komponentom pod brojem 3) nije pogodna za mašinsku fabrikaciju korišćenjem *SMT* tehnologije (engl. *SMT – Surface-mount Technology*). Pošto se BSM-e sastoje od veoma velikog broja čvorova, troškovi fabrikacije čak i na infinitezimalnom nivou utiču na ukupnu cenu. Jasno je da je mašinska fabrikacija pouzdanija, brža i jeftinija.



Slika 4.6 Razlika u visini proizvoda kada se koriste: (a) standardni valjkasti [82] i (b) Murata planarni superkondenzatori [81]

Komponente pod brojem 1), 4), 5) i 6) imaju malu visinu, tako da ne povećavaju ukupne dimenzije u pravcu normalnom na štampanu ploču (visina). Ovo je nepovoljno posebno za slojeviti dizajn, gde na osnovnu štampanu ploču nadograđuje dodatna štampana ploča. Na slici 4.6 [81], [82], vidi se razlika u izgledu uređaja kada se koristi superkondenzator standardnog valjkastog oblika i superkondenzator planarnog oblika. Očividno je da planarni superkondenzator proizvođača *Murata* zauzima manje mesta, a štedi mesta u ravni iznad SMT komponenti.

Važno je napomenuti da su superkondenzatori proizvođača *Murata* međusobno kompatibilni. Superkondenzatori 4) i 5) iz tabele 4.1 imaju isti elektronski otisak, tako da je moguće povećati kapacitivnost sa 0,47 F na 1 F ukoliko za to postoji potreba. Na slici 4.7 je prikazan izgled obe varijante superkondenzatora proizvođača *Murata*. Varijanta koja ima vrednost kapacitivnosti od 1 F je neznatno duža.

Cena izabranog superkondenzatora je oko 3 evra na 1000 komada, što je neznatno viša cena od litijum jonske baterije sličnih dimenzija. Naravno, kapacitet baterije je mnogo veći, ali je ranije objašnjen razlog korišćenja superkondenzatora. Ipak, treba imati u obzir da je tehnologija superkondenzatora relativno nova i da se može očekivati u budućnosti značajan pad cene.



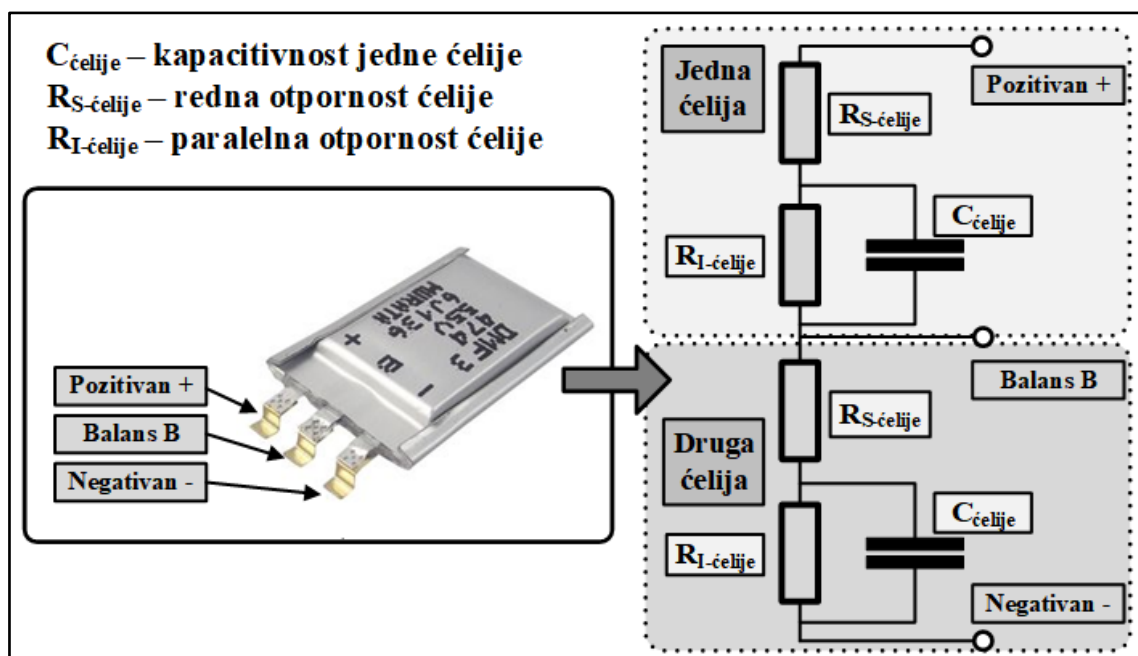
Slika 4.7 Dva superkondenzatora proizvođača *Murata* sa različitim kapacitivnostima, ali istim otiskom za štampanu ploču [83]

4.2.3 Modelovanje i performace izabranog superkondenzatora

Projektovano kolo za prikupljanje energije iz okoline koristi superkondenzator *DMT334R2S474M3DTA0* proizvođača *Murata*, kapacitivnosti 0,47 F. Jednačine (4.1) i (4.2) pokazuju promenu napona i vreme pražnjenja superkondenzatora. Na osnovu (4.2), dobijeno je matematički da za promenu napona u opsegu od 3,6 V do 2,7 V pri struji pražnjenja od 10 μA , pražnjenje traje oko 12 sati. Ako se usvoji da u proseku dan i noć traju po 12 sati, onda je ovaj superkondenzator interesantan za testiranje, jer su mu mogućnosti na granici održivosti, bar prema matematičkom proračunu.

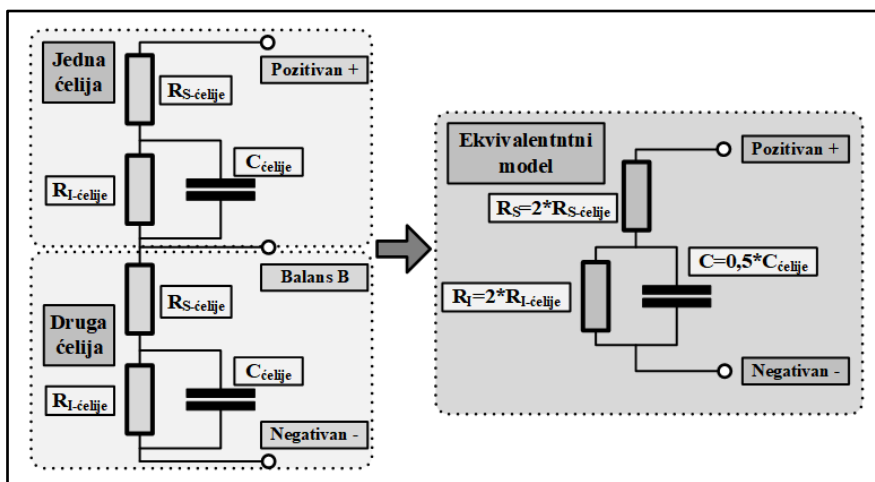
Pojedini parametri u toku pražnjenja pokazuju međusobnu zavisnost i promenljivu prirodu. Na primer, pri matematičkom proračunu usvojena je konstantna struja potrošača od 10 μA . U praksi ova struja je promenljiva i zavisi od napona napajanja, tj. pri višim vrednostima napona superkondenzatora, veća je i struja potrošača. Isti zaključak važi i za struje curenja korišćenih elektronskih komponenti, na nižem naponu je manja. Struja curenja superkondenzatora prati isti trend.

Matematički proračun prema formulama (4.1) i (4.2) se odnosi na standardni kondenzator. U cilju boljeg razumevanja ponašanja superkondenzatora, potrebno je detaljnije proučiti njegovo ekvivalentno kolo. Generalno, superkondenzator se zadovoljavajućom tačnošću modeluje kao idealni kondenzator, kome je na red dodata serijska otpornost R_S i paralelna otpornost izolacije R_I . Pošto se izabrani superkondenzator sastoji iz dve osnovne ćelije, njegova ekvivalentna šema je data na slici 4.8. Vezivanjem dve ćelije na red povećava se dvostruko maksimalni radni napon superkondenzatora, kapacitivnost se dvostruko smanjuje, a serijska otpornost i otpornost izolacije se dvostruko povećavaju (slika 4.9).

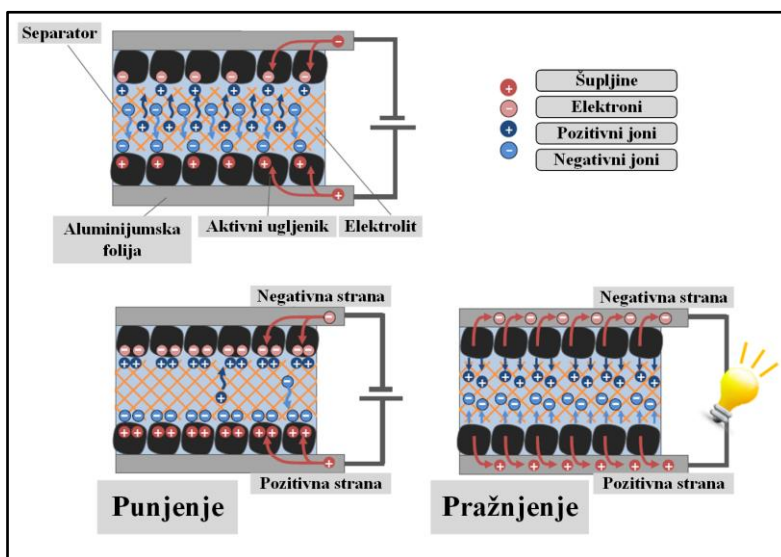


Slika 4.8 Izgled, terminalne oznake i model korišćenog superkondenzatora *DMT334R2S474M3DTA0* proizvođača *Murata* [83]

Redno vezivanje ćelija superkondenzatora se obavlja samo u slučaju potrebe povećanja maksimalnog radnog napona pošto se ostale važne karakteristike uglavnom degradiraju. Od redne otpornosti će zavisiti brzina punjenja i mogućnost saopštenja velike vršne snage, što je jedna od najvažnijih karakteristika u odnosu na punjive baterije. Posledica ovog vezivanja je postojenje trećeg terminalnog izvoda na komponenti koji se naziva balans, a njegova uloga je da obezbedi da se obe ćelije superkondenzatora podjednako pune. Ekvivalentno kolo superkondenzatora prikazano je na slici 4.9. Superkondenzator se ponaša slično kao na prikazanom modelu, ali u praksi postoje odstupanja. Razlog je što se u njegovoj konstrukciji koriste elektrode od aktivnog ugljenika sa porama koje imaju promenljivu veličinu na površini. Električna naelektrisanja u obliku jona prolaze kroz pore na površini elektrode što je prikazano na slici 4.10.

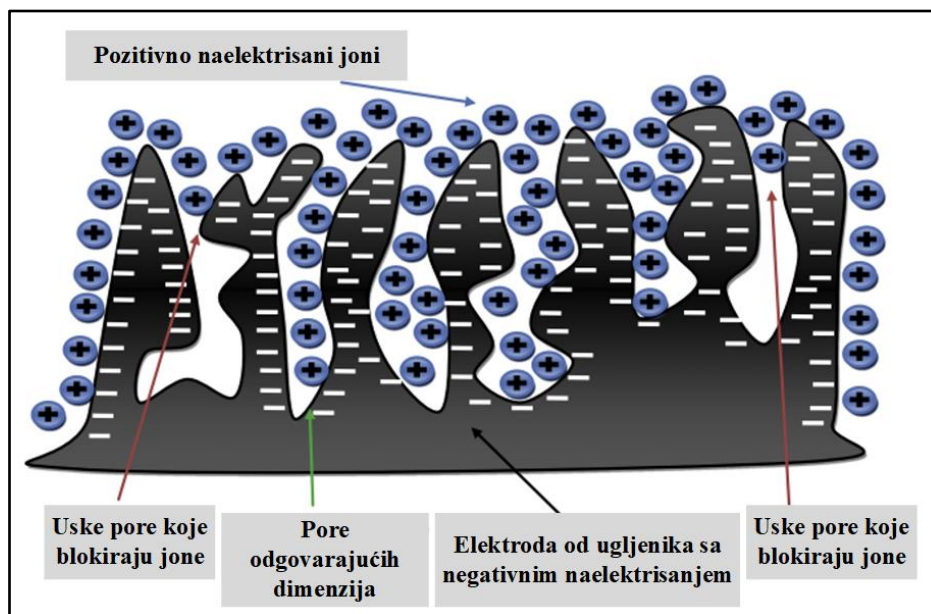


Slika 4.9 Transformacija DMT334R2S474M3DTA0 koji sadrži dve ćelije superkondenzatora u ekvivalentni model sa prikazanim promenama bitnih parametara

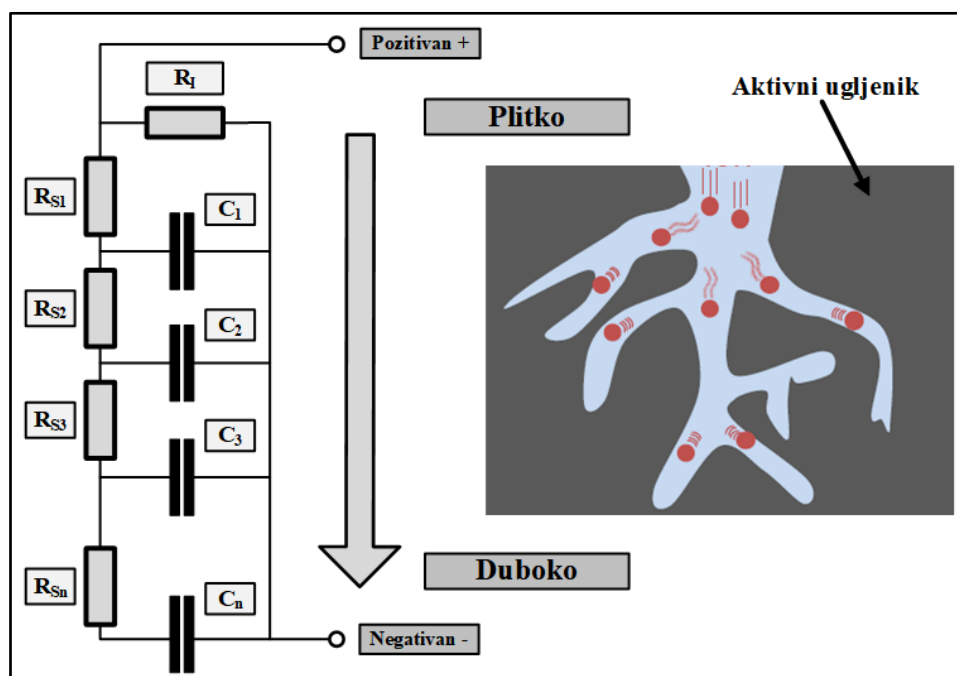


Slika 4.10 Interna struktura superkondenzatora i raspodela naelektrisanja u stanju punjenja i pražnjenja [81]

Izgled raspodele naelektrisanja na nanoporoznoj elektrodi ugljenika data je na slici 4.11. Može se primetiti da su pojedine pore veoma male, tako da blokiraju prodiranje jona dublje unutar strukture, pa se ne koristi cela raspoloživa površina u potpunosti. Proces raspodele naelektrisanja je složen dinamički proces i postoji fizička otpornost koja utiče na brzinu raspodele naelektrisanja.



Slika 4.11 Uveličani izgled elektrode od ugljenika sa nano porama koje povećavaju efektivnu površinu za nagomilavanje naelektrisanja [66]



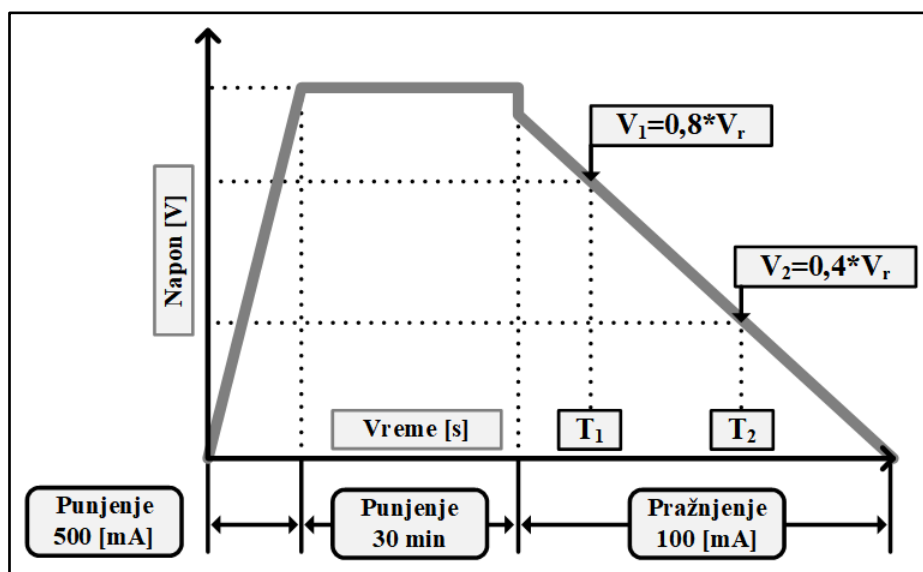
Slika 4.12 Ekvivalentna šema kondenzatora koja modeluje zavisnost kapaciteta i ekvivalentne serijske otpornosti od dubine pora [83]

Usled otpora u raspodeli naelektrisanja unutar pora, detaljni ekvivalentni model izgleda kao veliki broj paralelnih kondenzatora između kojih se nalaze serijski otpornici, kao što je prikazano na slici 4.12. Što je dubina pore veća, prodor naelektrisanja je teži, tako da se vrednosti kapacitivnosti i otpornosti veće.

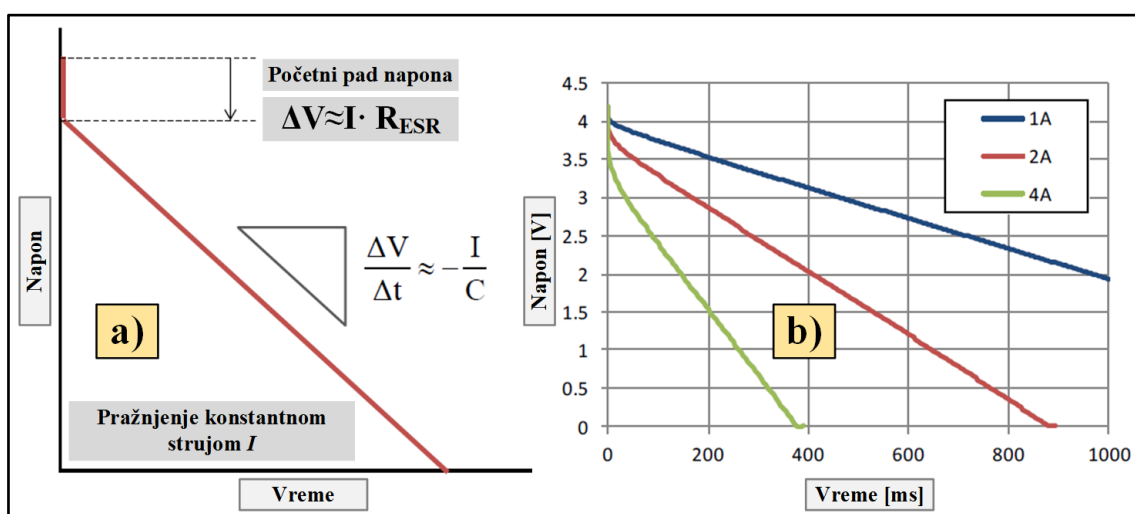
Kapacitivnost superkondenzatora C se može odrediti merenjem vremena pražnjenja superkondenzatora od 80% do 40% maksimalnog napona V_r pri struji I od 100 mA:

$$C = I \frac{T_1 - T_2}{V_1 - V_2}, \quad (4.3)$$

kao što je prikazano na slici 4.13.



Slika 4.13 Eksperimentalno određivanje kapacitivnosti superkondenzatora metodom pražnjenja konstantnom strujom



Slika 4.14 a) Grafik pražnjenja superkondenzatora sa početnim padom napona usled serijske otpornosti, b) karakteristike pražnjenja za različite struje pražnjenja [83]

Tokom početka pražnjenja, napon početno opada u zavisnosti od struje i redne otpornosti kao:

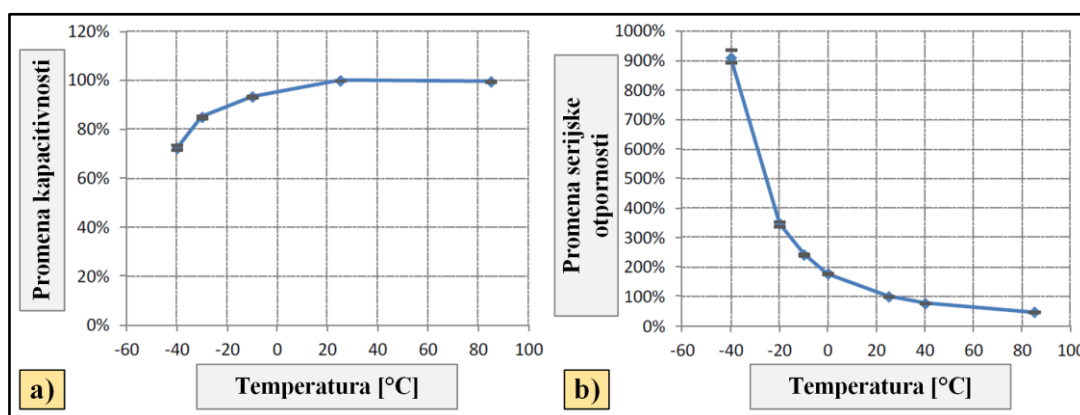
$$\Delta V \approx I \cdot R_{ESR}, \quad (4.4)$$

gde je ΔV početni pad napona, I konstantna struja pražnjenja i R_{ESR} redna serijaska otpornost. Ovaj početni pad napona se razmatra pri velikim strujama pražnjenja ili kada je vrednost serijske otpornosti velika, što u našoj primeni nije slučaj. Posle početnog pada, pri konstantnoj struji pražnjenja, napon opada skoro linearno:

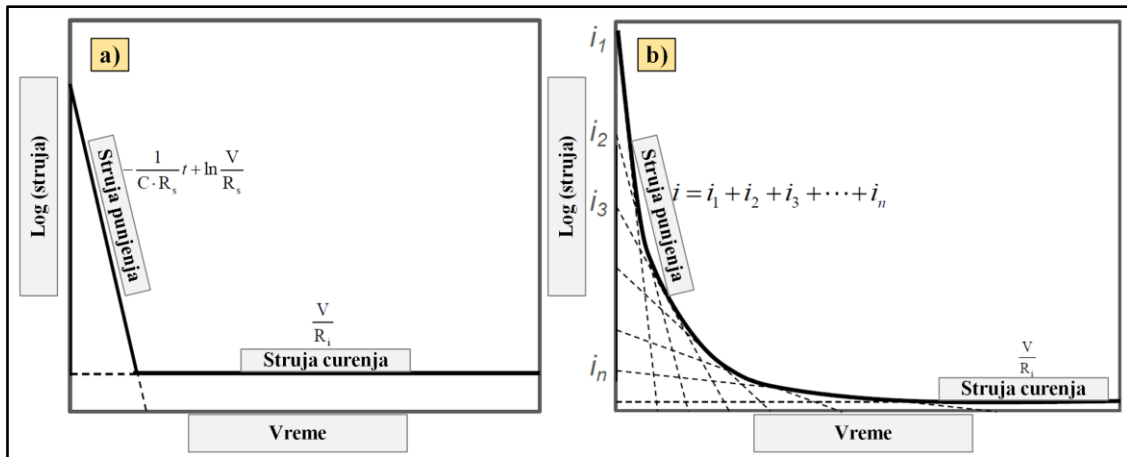
$$\frac{\Delta V}{\Delta t} \approx \frac{I}{C}. \quad (4.5)$$

Na slici 4.14 je prikazano pražnjenje konstantnom strujom i profili pražnjenja pri različitim konstantnim strujama. Zbog kompleksne strukture superkondenzatora, koja je predstavljena mnoštvo paralelnih kondenzatora na osnovu modela sa slika 4.12, pri pražnjenju dolazi od odstupanja od izraza (4.5), što se manifestuje kraćim vremenom pražnjenja kada su vrednosti struje veće. Na slici 4.14 se vidi da pražnjenje pri struji od 2 A traje oko 900 ms, a pri struji od 4 A pražnjenje traje manje od 400 ms, iako je očekivano vreme 450 ms. Izabrani superkondenzator podržava maksimalnu struju pražnjenja od 10 A, što je mnogo manje od usvojenog maksimuma od 200 mA. Znači, može se smatrati da se pražnjenje odvija na način opisan formulom (4.5).

Za potrebe merenja parametara životne sredine u terenskim uslovima, veoma bitno je razmotriti zavisnost karakteristika superkondenzatora od temperature. Temperaturni opseg superkondenzatora pripada takozvanom industrijskom opsegu od -40°C do $+85^{\circ}\text{C}$. Kapacitivnost na temperaturi od -40°C je približno 70% u odnosu na temperaturu od $+25^{\circ}\text{C}$. Razlog ovakvog ponašanja je karakteristična unutrašnja struktura i povećanje unutrašnje otpornosti na nižim temperaturama. Drugim rečima, joni na nižim temperaturama ostaju zarobljeni unutar strukture, tako da je nemoguće potpuno pražnjenje superkondenzatora. Slika 4.15a pokazuje zavisnost kapacitivnosti superkondenzatora od temperature. Za većinu primena u oblasti zaštite životne sredine, može se smatrati da je temperatura od -20°C donja granica primene. Za ovu vrednost temperature može se videti sa grafika da je kapacitet i dalje dobrih 90%, što ne bi trebalo drastično da utiče na rad čvora.



Slika 4.15 a) Zavisnost kapacitivnosti i b) serijske otpornosti superkondenzatora [83]



Slika 4.16 a) Struja punjenja idealnog superkondenzatora i struja curenja nakon završetka punjenja. b) Realna promena struje punjenja superkondenzatora usled složene unutrašnje strukture elektroda od ugljenika [83]

Slika 4.15b pokazuje promenu ekvivalentne serijske otpornosti. U poređenju sa vrednošću na temperaturi od $+25^\circ\text{C}$ koja je kataloški podatak i iznosi $130\text{ m}\Omega$, serijska otpornost na višim temperaturama opada, a na gornjoj granici temperaturnog opsega od $+85^\circ\text{C}$ je dvostruko manja. Na nižim temperaturama serijska otpornost se drastično povećava i na donjoj granici temperaturnog opsega od -40°C veća je 9 puta. Na usvojenoj donjoj granici temperature operativnosti čvora od -20°C serijska otpornost je veća oko 3 puta. U okviru planirane primene, povećanje redne otpornosti ne utiče znatno na performanse pošto je očekivana maksimalna struja čvora oko 200 mA . Na temperaturi od -20°C serijska otpornost iznosi oko $3 \times 130\text{ m}\Omega = 390\text{ m}\Omega$. Za struju od 200 mA prema formuli (4.4) dobija se da je pad napona 91 mV , što je veoma mala vrednost za ozbiljniji uticaj u radu.

Ako se posmatra model idealnog superkondenzatora sa slike 4.9, struja punjenja se može opisati sledećom formulom (4.6):

$$i(t) = i_0 \cdot e^{-\frac{t}{CR_S}} = \frac{V}{R_S} \cdot e^{-\frac{t}{CR_S}}, \quad (4.6)$$

gde je t vreme, i struja punjenja, i_0 početna struja punjenja, C kapacitivnost, R_S serijska otpornost i V napon superkondenzatora. Formula (4.6) se može prikazati i kao (4.7):

$$\ln i = -\frac{1}{C \cdot R_S} t + \ln \frac{V}{R_S}. \quad (4.7)$$

Grafik na kojoj je prikazana idealna struja punjenja u logaritamskoj skali dat je na slici 4.16a. Struja punjenja opada do trenutka kada se superkondenzator napuni na nominalnu vrednost kapacitivnosti. Nakon trenutka kada se napuni superkondenzator, struja se može aproksimirati strujom curenja, koja zavisi od vrednosti otpornosti izolacije R_i i u praksi mnogo veća od serijske otpornosti, reda veličine megaoma. Usled složene unutrašnje strukture koristi se model superkondenzatora prikazan na slici 4.12. Formula (4.7) se modifikuje u skladu sa realnim modelom:

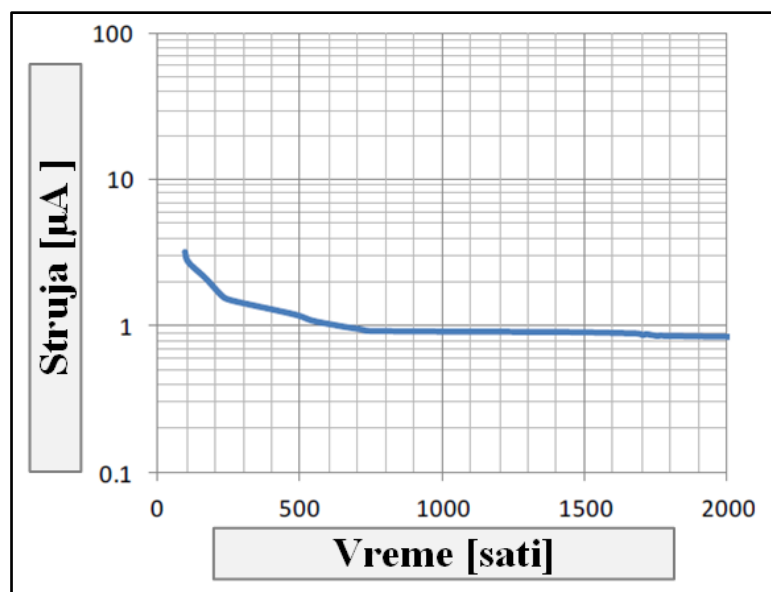
$$\ln i_n = -\frac{1}{C_n \cdot (R_{S1} + R_{S2} + \dots + R_{Sn})} t + \ln \frac{V}{(R_{S1} + R_{S2} + \dots + R_{Sn})}. \quad (4.8)$$

Izgled realne struje punjenja superkondenzatora prikazan je na slici 4.16b. Vrednosti kapacitivnosti i otpornosti u plićim oblastima (sa manjim brojem koeficijenta) su manje tako da je struja punjenja u početku velika. Pošto dublje oblasti imaju velike vrednosti kapacitivnosti i otpornosti, struja punjenja opada kako se naelektrisanje širi. Dok se sve raspoložive pore napune naelektrisanjem, teći će određena struja veoma male vrednosti koja je veća od struje curenja u idealnom modelu. Ovaj efekat se u praksi manifestuje kao veća struja curenja tokom procesa punjenja. Za većinu aplikacija superkondenzatora ovaj efekat nije problematičan. Ipak, za primene u oblasti prikupljanja energije iz okoline, treba voditi računa i o ovom efektu.

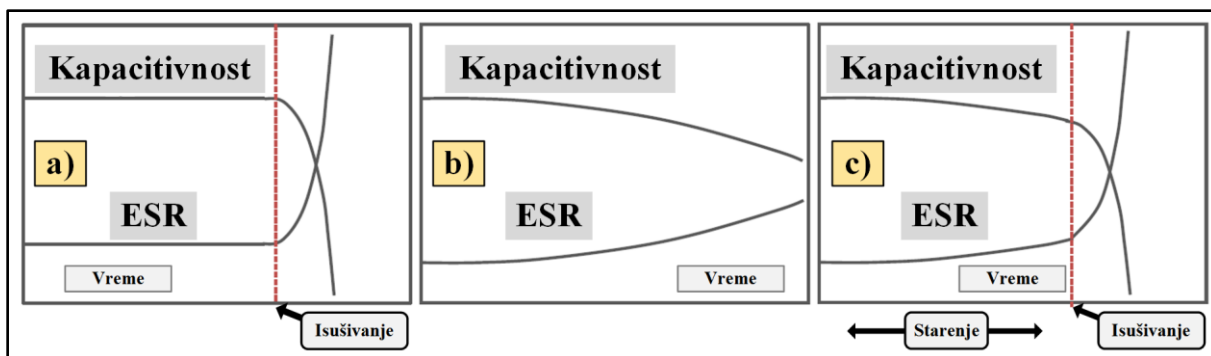
Dakle, struja curenja superkondenzatora nije konstantna, već se smanjuje tokom vremena. U cilju ocene kvaliteta superkondenzatora, pojedini proizvođači daju vrednost struje curenja čak posle nekoliko dana, jer unutrašnja struktura postaje stabilna. Za korišćeni superkondenzator ta vrednost iznosi 5 μA na 96 sati. Za jako duge intervale od nekoliko stotina sati vrednost struje curenja opada ispod 1 μA što je prikazano na slici 4.17.

Jedan od važnih zahteva koji čvor treba da ispuni je pouzdan rad u toku vremena. Superkondenzator, kao centralna komponenta podsistema za napajanje ima važnu ulogu u ostvarivanju ovog zahteva. Zato je neophodno analizirati pouzdanost superkondenzatora tokom vremena i njegov uticaj na ukupnu pouzdanost čvora.

Isušivanje elektrolita je efekat koji se javlja kod superkondenzatora kada se u toku vremena nepovratno gubi deo elektrolita. Kada količina elektrolita opadne ispod određene granice, kapacitivnost superkondenzatora naglo opada, a serijska otpornost raste kao na slici 4.18a i praktično se može smatrati da je superkondenzator izgubio svoju funkcionalnost.



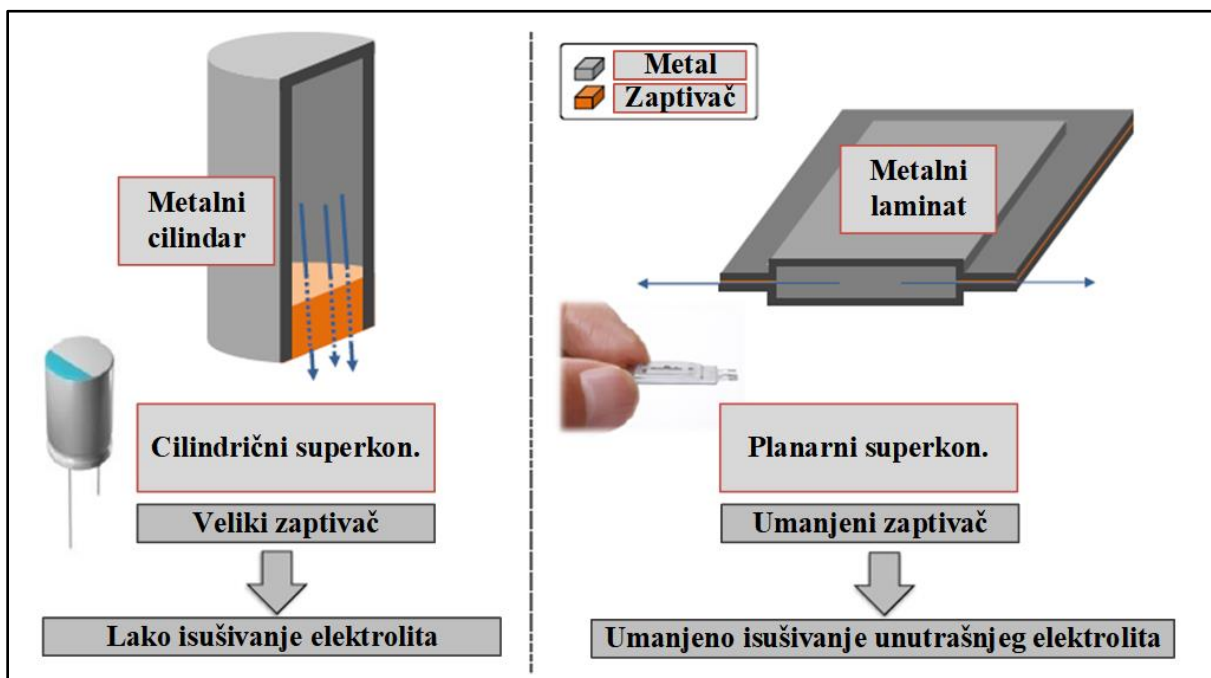
Slika 4.17 Promena struje punjenja i struje curenja tokom velikog intervala vremena [83]



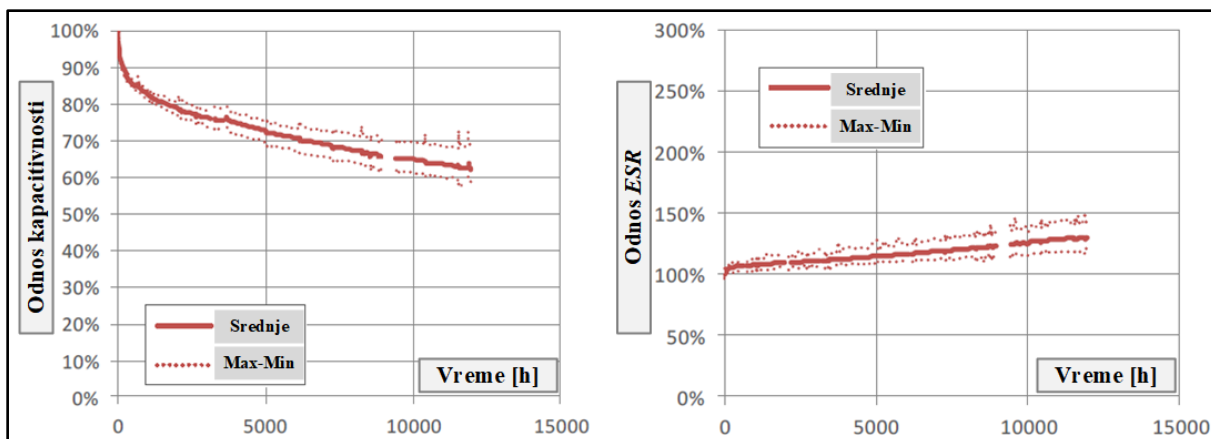
Slika 4.18 Promene kapacitivnosti i serijske otpornosti superkondenzatora usled efekta: a) isušivanja, b) starenja i c) usled zajedničkog efekta [83]

Korišćeni superkondenzator se karakteriše tehnologijom koja drastično produžava vreme do trenutka isušivanja. Iako vreme isušivanja zavisi od temperature, ono je za ovaj superkondenzator tipično preko 20 godina. Ovako dobre karakteristike ovaj superkondenzator ima zbog relativno male površine zaptivanja u odnosu na standardni cilindrični oblik (slika 4.19).

Kapacitivnost i serijska otpornost kao najvažnije karakteristike superkondenzatora se menjaju tokom vremena i ovaj proces se naziva starenje. Slika 4.18b pokazuje kako se ove vrednosti menjaju tokom vremena usled starenja. Pravi razlog starenja je najčešće prodor vlage koja remeti unutrašnje hemijske procese.



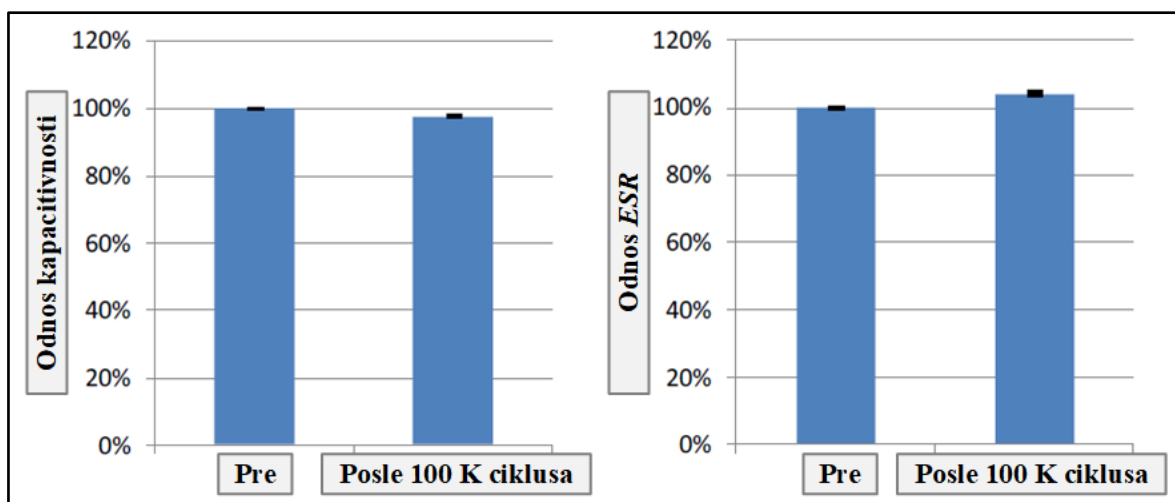
Slika 4.19 Prednosti planarnog oblika superkondenzatora u odnosu na cilindrični usled manje površine zaptivanja, što utiče na smanjivanje prodiranja vlage i isušivanje elektrolita [83]



Slika 4.20 Promena kapacitivnosti i serijske otpornosti za vreme od 12.000 sati pri temperaturi od 70°C [83]

Proizvođač je izvršio testiranje u trajanju od 12.000 sati pri povišenoj temperaturi od 70°C. Na graficima na slici 4.20 mogu se videti promene kapacitivnosti i serijske otpornosti tokom ovog vremena. Može se zaključiti da efekat starenja utiče u određenoj meri na karakteristike superkondenzatora, ali treba napomenuti da je ovaj proces izraženiji na višoj temperaturi. U svakom slučaju, kako bi se minimizovao efekat starenja, preporuka je da senzorski čvorovi imaju što manju radnu temperaturu. Ovo nije lako ostvariti pošto se čvorovi direktno izlažu Suncu, ali je moguće smanjiti radnu temperaturu kvalitetnijim hlađenjem i korišćenjem materijala za izradu kućišta koji odbijaju dobar deo svetlosti.

Kao što je već ranije navedeno, superkondenzatori se karakterišu velikim brojem ciklusa punjenja, što predstavlja jednu od najvažnijih prednosti u odnosu na punjive baterije. Proizvođač je izvršio testiranje uticaja karakteristika superkondenzatora u zavisnosti od broja ciklusa punjenja. Superkondenzator je napunjen strujom od 0,5 A na nominalnih 4,2 V i zatim je nakon 3,5 s ispražnjen na 0 V istom strujom. Postupak je ponovljen 100.000 puta. Rezultati testiranja su prikazani na slici 4.21.



Slika 4.21 Kapacitivnost i serijska otpornost posle 100.000 ciklusa punjenja i pražnjenja [83]

Može se zaključiti da je uticaj broja ciklusa na performanse superkondenzatora zanemarljiv. Izabrani superkondenzator predstavlja reprezentativan izbor za testiranje u okviru podsistema za napajanje koji se bazira na prikupljanju energije Sunca iz okoline. Temperaturna stabilnost parametara pogoduje u primeni praćenja parametara životne sredine. Efekat starenja može da utiče na parametre, ali tek posle puno vremena. Broj ciklusa punjenja ne utiče na karakteristike superkondenzatora. Struja curenja nije u potpunosti određena, ali je njeno ponašanje poznato. Treba napomenuti da je zbog manjeg radnog napona senzorskog čvora od 3,6 V životni vek superkondenzatora dodatno produžen, jer se on ne izlaže maksimalnom opterećenju.

4.2.4 Kolo za punjenje superkondenzatora

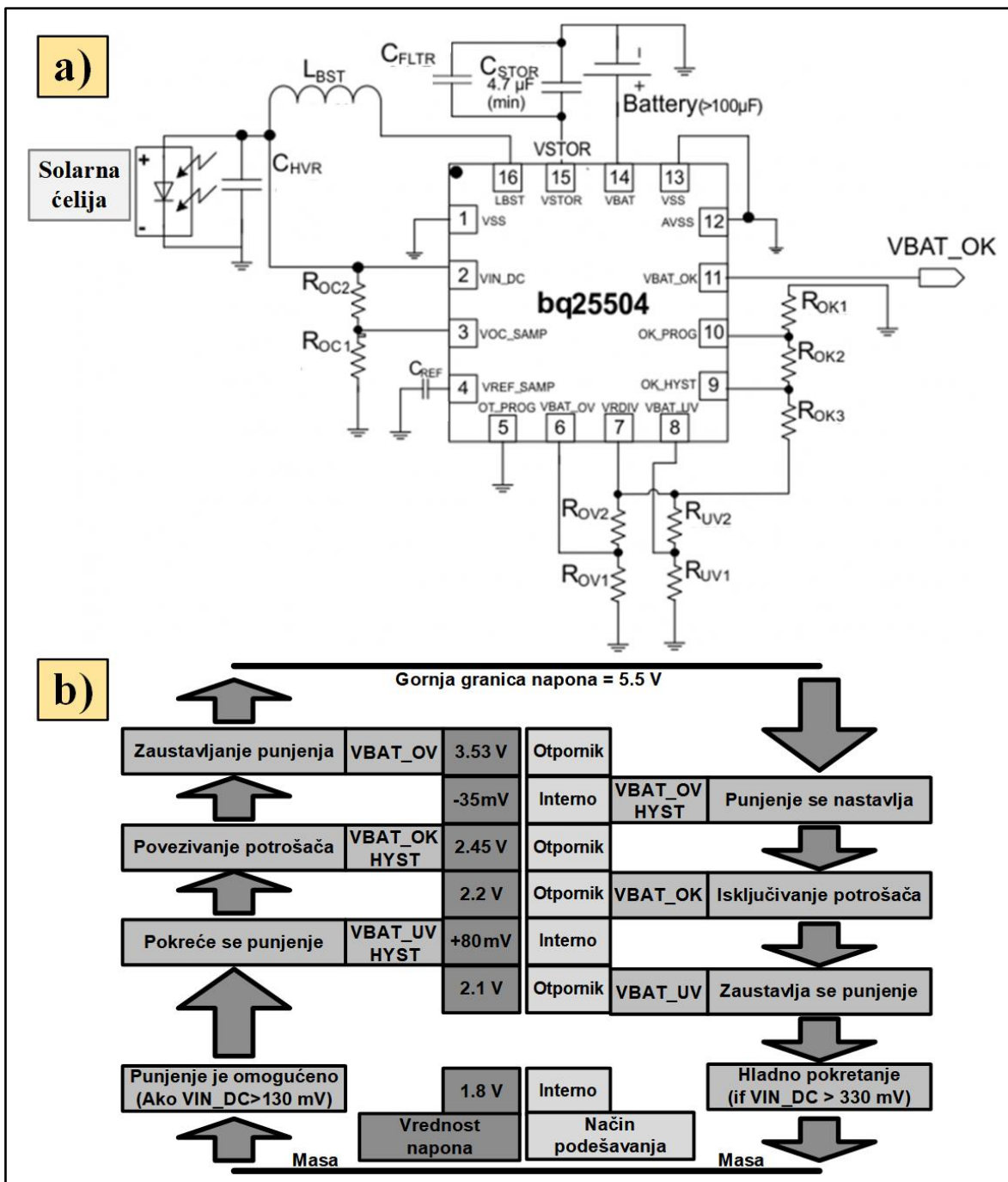
Direktno punjenje superkondenzatora sa solarnog panela nije preporučljivo, naročito ako je nominalni napon solarnog panela veći od dozvoljenog napona superkondenzatora. U našem slučaju, nominalni napon izabranog solarnog panela iznosi 2 V, što je manje od dozvoljenog napona superkondenzatora koji iznosi 4,2 V. Ovo znači da direktno punjenje može napuniti superkondenzator do 2 V maksimalno, tako da se ne iskorišćava maksimalan kapacitet. S druge strane, pošto se prazan superkondenzator terminalno ponaša kao veoma mala otpornost, u slučaju direktnog vezivanja solarni panel će biti u kratkom spoju i ako se posmatra karakteristika panela (slika 3.9), veoma daleko od tačke maksimalne snage. Dakle, neophodno je koristiti prilagodno kolo koje obezbeđuje da se superkondenzator napuni do željenog napona i da se iz fotonaponske ćelije koristi maksimalna snaga u svakom trenutku.

Za maksimalno iskorišćenje snage je potrebno upotrebiti neki od *MPPT* algoritama. Postoji puno dostupnih algoritama koji imaju različitu složenost, brzinu konvergencije, cenu, broj potrebnih komponenti, širinu parametrizacije, a neki od njih su dati u [61].

Pošto je napon solarnog panela (2 V) manji od maksimalno dozvoljenog od superkondenzatora (4,2 V), neophodno je koristiti prekidačko napajanje koje podiže napon, tj. prekidački podizač, tzv. „*boost*“ DC-DC kolo (engl. *Boost* – podizanje). Iako je moguće ovo kolo napraviti od diskretnih komponenti, radi zauzimanja što manjeg prostora na štampanoj ploči i smanjivanja ukupne cene, proučena su komercijalna integrisana rešenja. Ovakvih rešenja trenutno nema puno na tržištu, pogotovo za veoma male snage koje zahteva čvor. Zato je kao rešenje relativno brzo izabrano integrisano kolo *bq25504* [84] proizvođača *Texas Instruments*. Ovo kolo predstavlja kontroler punjenja za veoma male snage, može se osim za solarne panele koristiti sa drugim izvorima energije iz okoline, na primer sa termoelektričnim generatorima. Pogodno je za punjenje superkondenzatora ili punjivih baterija. Ovo kolo ima hardverski implementiran, ranije opisan, *OCV MPPT* algoritam. Svakih 16 sekundi se vrši odvajanje solarnog panela od potrošača i meri se napon u otvorenom kolu (V_{OK}). Merenje traje 256 milisekundi i u tom periodu punjenje je onemogućeno, što se smatra nedostatkom ovom algoritma, jer se u tom periodu snaga nepovratno gubi. Ipak, ovaj nedostatak dolazi do izražaja kod solarnih panela velikih snaga, što ovde nije slučaj.

Kontroler punjenja *bq25504* je univerzalno rešenje za prikupljanje energije iz okoline i poseduje mogućnost parametrizacije dodavanjem i menjanjem vrednosti spoljašnjih komponenti, najčešće otpornika. Moguće je podesiti donji prag punjenja V_{BUT_UV} (engl. *UV* -

undervoltage) i na taj način sprečiti da se element za skladištenje energije ne ošteti dubokim pražnjenjem. Gornja granica punjenja V_{BUT_OV} (engl. *OV* - *overvoltage*) se takođe može podesiti. Za svrhu buđenja mikrokontrolera iz nekog od režima uspavanosti, postoji posebna fizička linija V_{BUT_OK} , koja se aktivira kada napon u elementu skladištenja energije dostigne podešenu granicu. Ugrađeni podešljivi histerezis sprečava oscilacije stanja ovog signala. Tipično kolo sa neophodnim eksternim komponentama i ciklus punjenja i pražnjenja su prikazani na slici 4.22.



Slika 4.22 a) Tipično povezivanje eksternih komponenti za bq25504 integrisanje rešenje i b) ciklus punjenja i pražnjenja sa obeleženim nivoima

Kada ulazni napon dostigne 130 mV aktivira se punjenje pomoćnog kondenzatora C_{STOR} koje se još naziva i hladno punjenje, zato što zbog malog napona još uvek nije u potpunosti aktivno prekidačko kolo kontrolera punjenja. Kada vrednost napona kondenzatora C_{STOR} dostigne 1,8 V, aktivira se prekidački podizač napona, ali punjenje, u našem slučaju superkondenzatora, počinje tek kada se dostigne podešena vrednost napona V_{BUT_UV} uvećana za vrednost internog napona histerezisa koji iznosi 80 mV. Ova vrednost je na slici 4.22 obeležena kao $V_{BUT_UV_HYST}$ i usvojeno je da je $V_{BUT_UV}=2,1$ V, tako da je vrednost $V_{BUT_UV_HYST} = 2,1$ V + 80 mV. Kada se superkondenzator napuni na vrednost 2,45 V aktivira se signal $V_{BUT_OK_HYST}$ i superkondenzator se spaja sa potrošačem. Punjenje se nastavlja do vrednosti 3,53 V koliko iznosi podešena gornja granica napona V_{BUT_OV} .

Kada se ova vrednost dostigne, punjenje se zaustavlja, ali se ponovo pokreće ukoliko napon opadne za 35 mV, koliko iznosi interni histerezis. Vrednost ovog napona je označena sa $V_{BUT_OV_HYST}$. Ukoliko napon opadne na 2,2 V dostiže se donja granica podešljivog histerezisa označenog sa V_{BUT_OK} i potrošač se odvaja od superkondenzatora, a preko posebne linije se o tome upozorava mikrokontroler. Kada napon opadne na $V_{BUT_UV} = 2,1$ V, prekidačko kolo prestaje sa radom. Ciklus se onda ponavlja.

Izabrani kontroler punjenja predstavlja savršeno rešenje za napajanje čvora. Velika širina u podešavanju pruža mnogo različitih mogućnosti u primeni, kako u pogledu izvora energije tako i u pogledu korišćenih skladišta energije. Moguće je podesiti da se napon kreće u opsegu koji je pogodan za korišćene elektronskih komponenti i da se na ovaj način izbegne stepen izlazne regulacije prikazan na slici 3.7.

4.3 Projektovanje bežičnog senzorskog čvora

U prethodnom poglavlju su objašnjeni osnovni zahtevi koje čvor treba da ispuni kako bi se smatrao kvalitetnim rešenjem za primenu u oblasti praćenja parametara životne sredine. Zahtevi su niska cena, pouzdan rad, prilagodljivost različitim primenama i minimalan uticaj na životnu sredinu. Takođe, ranije u ovom poglavlju su definisane osnovne komponente čvora i objašnjeni razlozi za njihov izbor. Sledi opis postupka projektovanja.

4.3.1 Definisane specifikacije čvora

Prilikom projektovanja uvek je poželjno imati definisanu jasnu specifikaciju koja se koristi kao smernica ili uputstvo u daljem radu. Prvi zadatak je uvek definisanje karakteristika napajanja. Napajanje čvora treba da omogući maksimalno iskorišćenje snage iz solarnog panela, punjenje superkondenzatora i napajanje ostalih podsistema. Rasipanje energije mora biti svedeno na minimum, kako bi akumulirana energija u superkondenzatoru duže trajala. Zato je tendencija da napon bude što niži, jer je snaga gubitaka direktno proporcionalna naponu napajanja.

Izabrani mikrokontroler, *MSP430G2553*, podržava opseg napona od 1,8 V do 3,6 V. Kao osnovna kontrolna jedinica, mikrokontroler mora biti pod neprekidnim napajanjem.



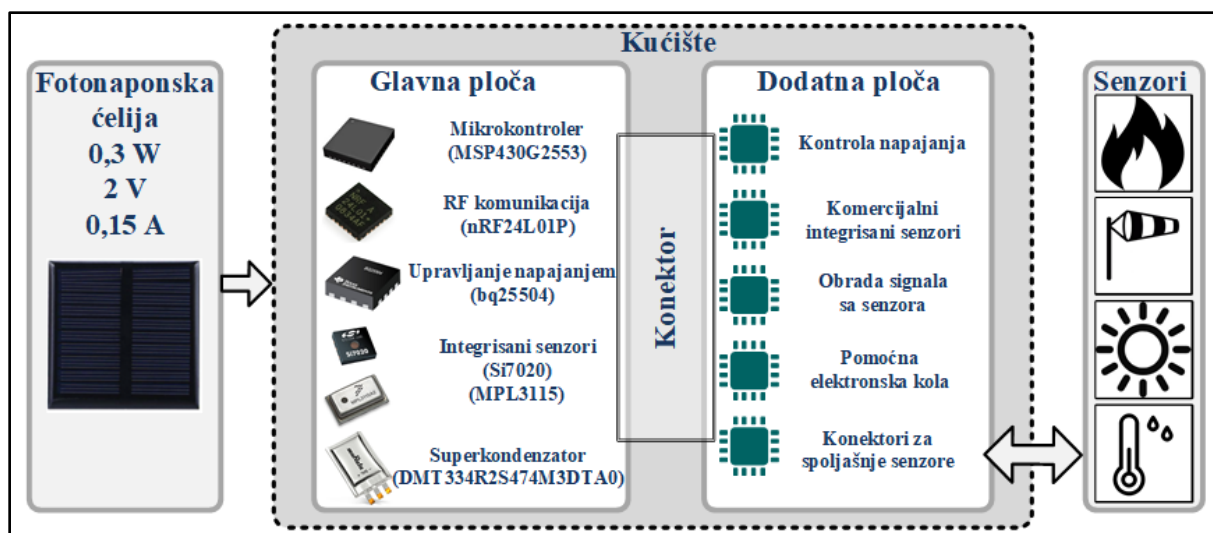
Slika 4.23 Zbog kvadratnog oblika solarnog panela, poželjni oblik projektovanog bežičnog senzorskog čvora je u obliku kocke [85]

Ako pojedine komponente nisu funkcionalne i ukoliko je napon napajanja u svakom trenutku poznat, mikrokontroler to prepoznaje, i može da kontroliše trenutnu funkcionalnost čvora.

Organizacija na štampanoj ploči je bitan deo svake specifikacije. Kao što je već napomenuto, dizajn treba da bude što minijaturniji. U ovom slučaju poznata veličina solarnog panela je usvojena kao referenca za dimenziju štampane ploče. Dimenzije solarnog panela su $6,0\text{ cm} \times 6,0\text{ cm}$ i ako se usvoji da ovo bude osnova (x-y ravan) senzorskog čvora, tj. da i kućište ima istu dimenziju u osnovi, onda štampana ploča mora biti manjih dimenzija kako bi se uspešno ugradila u definisani prostor. Ukoliko su poznate dimenzije čvora u osnovi, jasno je da od upotrebljenih komponenti zavisi ukupna visina čvora. Može se zaključiti da je zbog je osnovni oblik bežičnog senzorskog čvora kocka, slično rešenju koje nudi firma *Libelium* (slika 4.23), [86]. Dakle, na jednoj površini kućišta u obliku kocke je pričvršćen ili zalepljen solarni panel, u pravcu izvora svetlosti, a na ostalim površinama se mogu nalaziti otvori ili priključci za senzore. Najčešće na donjoj stranici se nalazi mehanički sistem za pričvršćivanje na različite površine. U skladu sa izloženim razmatranjem, definisani su tehnički parametri čvora (tabela 4.2). Nakon definisanja podsistema za napajanje, kontrolu i komunikaciju čvora, potrebno je analizirati i senzorski podsistem. Broj parametara koji se mogu meriti u životnoj sredini je ogroman. Zato nije moguće precizno definisati ovaj podsistem, već samo ostaviti slobodne ulaze/izlaze i interfejse za proširivanje funkcionalnosti.

Tabela 4.2 Specificirani parametri koje projektovani čvor treba da ispuni

Naziv parametra	Vrednost	Napomena
Napon napajanja	1,8 V – 3,6 V	Optimalan napon 3 V
Maksimalna struja	200 mA	Trenutna podržana maksimalna struja potrošnje
Frekvencija radio komunikacije	2,4 GHz	nRF24L01 integrisano rešenje
Brzina prenosa podataka	0,25 do 2Mbps	nRF24L01 integrisano rešenje
Dimenzije štampane ploče	6 cm x 6 cm	Maksimalna veličina
Temperaturni opseg	-20°C do + 85°C	Za najveći broj primena



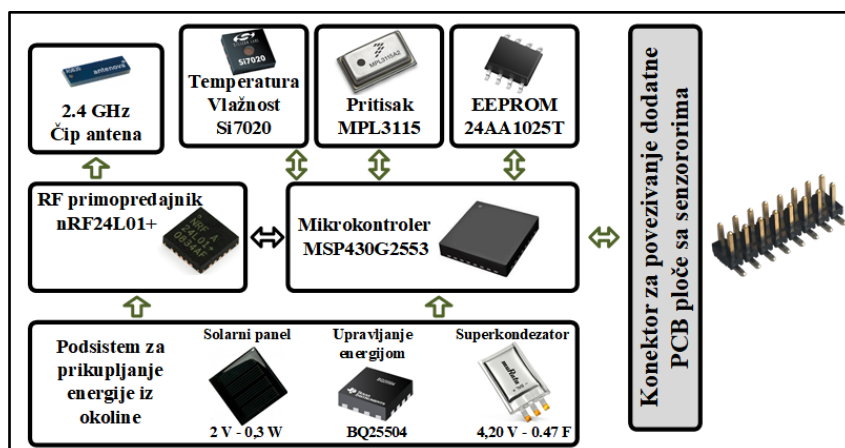
Slika 4.24 Blok dijagram bežičnog senzorskog čvora za praćenje parametara životne sredine

Predviđeno je da se na glavnoj štampanoj ploči ostavi slobodan konektor za povezivanje dodatne štampane ploče. Na dodatnoj štampanoj ploči bi se nalazili integrisani senzori, pomoćna elektronika i konektori za eksterne senzore, koji se instaliraju izvan kućišta čvora. Blok dijagram čvora prikazan je na slici 4.24.

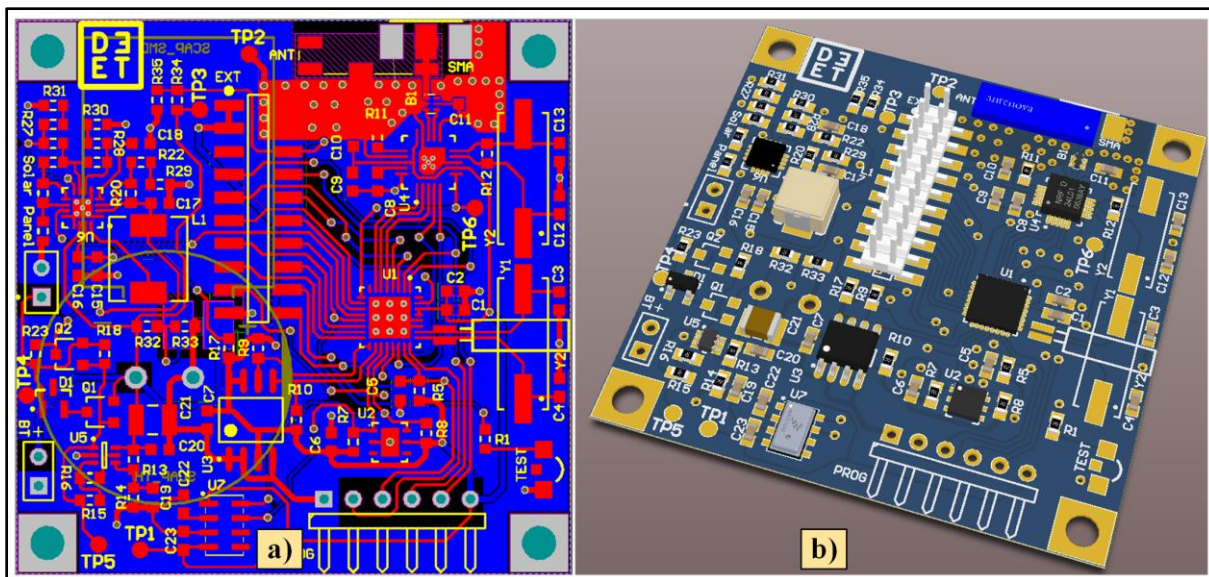
Pomenuto je da se na glavnoj štampanoj ploči nalaze senzori za temperaturu, vlažnost i pritisak, a koji se koriste u svrhu testiranja. Ipak, senzori za merenje su izloženi oscilacijama sredine i često zahtevaju reparametrizaciju i kompenzaciju u odnosu na temperaturu, vlažnost i pritisak, tako da je veoma korisno imati ove senzore na raspolaganju.

4.3.2 Implementacija bežičnog senzorskog čvora

Na osnovu specifikacije definisan je blok dijagram glavne ploče koji je prikazan na slici 4.25. Mogu se uočiti svi podsistemi jednog čvora. Osim osnovnih senzora za pritisak, temperaturu i vlažnost, postoji mogućnost da se povežu dodatni senzori preko posebnog konektora za proširenje čime se povećava fleksibilnost u korišćenju senzorskog čvora.



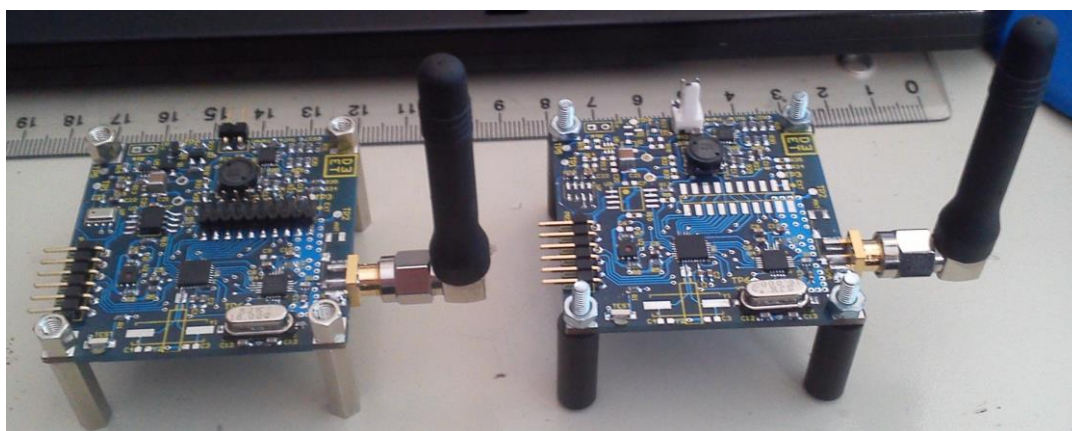
Slika 4.25 Blok dijagram glavne štampane ploče bežičnog senzorskog čvora sa izabranim ključnim komponentama



Slika 4.26. a) Izgled glavne štampane ploče i b) 3D modela čvora u programskom paketu Altium Designer

Radi ostvarivanja većeg stepena minijaturizacije, korišćene su pasivne komponente dimenzija $1,6 \text{ mm} \times 0,8 \text{ mm}$, što se u tehnologiji projektovanja štampanih ploča označava kao „0603“, prema dimenzijama u inčima ($0.06 \text{ in} \times 0.03 \text{ in}$). Male dimenzije pasivnih komponenti omogućavaju veliku gustinu pakovanja, a ujedno i malu ukupnu visinu, što pogoduje kod uređaja koji se sastoje od više štampanih ploča povezanih jedna na drugu. Čip antena sa oznakom A5887 [87], proizvođača *Antenova* doprinosi ukupnom smanjivanju dimenzija. Izgled štampane ploče u *Altium Designer* alatu za projektovanje i 3D model dati su na slici 4.26.

Štampana ploča je realizovana u dva sloja bakra. Dimenzije ploče su $4,8 \text{ cm} \times 4,8 \text{ cm}$, što je manje od predviđenih dimenzija kućišta čvora, koje iznosi $6,0 \text{ cm} \times 6,0 \text{ cm}$. U uglovima postoje rupe za lakše montiranje glavne ploče u kućište i pričvršćivanje dodatne. Moguće je umesto čip antene montirati SMA (engl. *SMA - SubMiniature version A*) konektor i iskoristiti neku drugu komercijalnu antenu ili kabelom izbaciti antenu van kućišta, ukoliko je to potrebno.



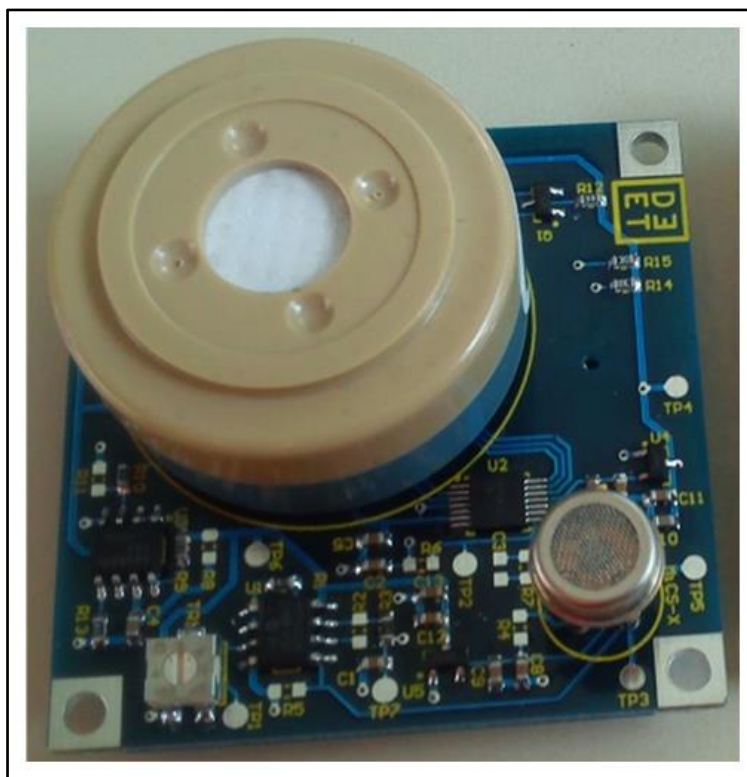
Slika 4.27 Konačan izgled projektovanog bežičnog čvora

Na slici 4.26a se vide dva konektora, jedan za solarni panel, a drugi za eksterni superkondenzator ili punjivu bateriju. Podsetimo da izabrano integrisano rešenje *bq25504* pruža mogućnost rada sa punjivim baterijama i drugim izvorima iz okoline, tako da je u cilju budućeg testiranja ostavljena ova mogućnost. Takođe, dodata je *EEPROM* memorija *24LC128T* [88] kapaciteta 128 kbit, proizvođača *Microchip*, za skladištenje podataka, koja se može iskoristiti za buduću konfiguraciju senzorskog čvora. Konačan izgled dva bežična senzorska čvora prikazan je na slici 4.27.

4.4 Karakteristike projektovanog rešenja

Sledi analiza koja pokazuje koliko realizovani senzorski čvor ispunjava definisane zahteve. Svi podsistemi se nalaze na istoj štampanoj ploči sa mogućnošću proširenja senzorskog podsistema. Najvažniji zahtev u projektovanju je niska cena. Tabela 4.3, između ostalog pokazuje cenu ključnih komponenti.

Na ovu sumu je potrebno dodati cenu pasivnih komponenti, koje iznose oko 2,0 evra, zatim troškove izrade štampane ploče od 0,5 evra, fabričkog lemljenja 0,5 evra i vodootpornog kućišta približno 3,5 evra, po jednom čvoru na 1000 komada. Ukupna cena iznosi oko 20,0 evra, a cena bez integrisanih senzora i *EEPROM*-a (označeni crvenom bojom u tabeli 4.3) iznosi 16,0 evra. Proračunata cena je drastično manja od komercijalnih senzorskih čvorova opisanih u [55].



Slika 4.28 Primer nadogradnje bežičnog senzorskog čvora dodatnom štampanom pločom sa komercijalnim senzorima za merenje koncentracije ozona u vazduhu

Naravno, potrebno je izračunati koliko na cenu utiče dodatna ploča. Ako se pretpostavi da fabrikacija dodatne ploče (izrada + lemljenje) iznosi 1,0 evro, što je ista cena kao i kod glavne ploče, na ukupnu cenu utiču korišćene komponente i senzori. U praksi cena najviše zavisi od vrste senzora. Na primer, ako čvor treba da na nekoj lokaciji meri intezitet ultraljubičaste svetlosti, na dodatnoj ploči treba dodati senzor i dodatnu elektroniku čija je cena oko 1,5 evra, što znači da dodatna ploča povećava ukupnu cenu za 2,5 evra, tako da je ukupna cena čvora 22,5 evra. Međutim, ako je potrebno meriti koncentraciju ozona na terenu, cena dodatnih elektronskih komponenti iznosi oko 5,0 evra, a cena komercijalnog senzora iznosi oko 60 evra, što povećava ukupnu cenu čvora na 86 evra. Upravo je pomenuto rešenje za merenje koncentracije ozona projektovano za svrhu testiranja funkcionalnosti i može se videti na slici 4.28.

Dakle, može se zaključiti da cena čvora za konkretnu primenu pre svega zavisi od korišćenih senzora. Što se tiče cene osnovnog čvora bez senzora, može se smatrati potrošnim elementom. U slučaju kvara, popravka čvora čija je cena 20 evra nije opravdana na terenu. Mnogo je jednostavnija zamena novim čvorom. Ipak, prikazano rešenje predstavlja ekstremnu varijantu, jer većina senzora ima mnogo manju cenu i tendenciju smanjivanja cene.

U tabeli 4.3 se mogu videti potrošnje ključnih komponenti u aktivnom i uspavanom režimu. Od interesa je posmatrati i maksimalnu potrošnju u oba režima. Može se zaključiti da je potrošnja u aktivnom režimu manja od gornje dozvoljene granice koja iznosi 200 mA. Potrošnja u uspavanom režimu iznosi oko 9,0 μ A i treba naglasiti da se koriste tipične vrednosti. Potrošnja bez integrisanih senzora i *EEPROM* memorije iznosi oko 6,7 μ A. U poređenju sa komercijalnim rešenjima [55], može se zaključiti da projektovani čvor predstavlja uređaj veoma male potrošnje. Na ukupnu potrošnju u oba režima treba predvideti potrošnju dodatne pločice za proširenje funkcionalnosti. Generalno za aktivni režim to znači da priključena dodatna ploča ne sme da troši struju veću od 200 mA umanjenu za potrošnju osnovnog čvora u pomenutom režimu. U uspavanom režimu podrazumeva se da dodatna štampana ploča nema napajanje, tj. kontroliše se programski od strane mikrokontrolera.

Tabela 4.3 Cena i potrošnja energije navažnijih komponenti čvora

<i>Komponenta</i>	<i>Radni režim</i>	<i>Potrošnja</i>	<i>Cena na 1k</i>
MSP430G2553	Aktivni	230 μ A (1 MHz)	0,95€
	Pripravnost	0.5 μ A	
nRF24L01+	Aktivni	11.3 mA TX at 0 dBm 13.5 mA RX at 2 Mbps	1,37€
	Isključen	900 nA	
Si7020	Aktivni	150 μ A	1,91€
	Pripravnost	60 nA	
MPL3115	Aktivni	2 mA	1,52€
	Pripravnost	2 μ A	
24LC128T	Aktivni	400 μ A	0,42€
	Pripravnost	100 nA	
BQ25504	Struja curenja	330 nA	2,39€
DMT334R2S474M3DTA0	Struja curenja	5 uA	3,40€
A5887			0,60€
Solarni panel			1,00€

4.5 Unapređeni bežični senzorski čvor

Namenski projektovani čvor se pokazao kao funkcionalno rešenje za BSM-e za praćenje parametara životne sredine. Ipak, iako funkcionalno, postoje određena ograničenja koja se moraju detaljnije analizirati. Zato je izvršena analiza za projektovanje unapređenog čvora. „Projektovani čvor“ predstavlja prvu verziju prikazanu na slici 4.27, a „unapređeni čvor“ je druga unapređena verzija, i ova terminologija će se koristiti u daljem tekstu.

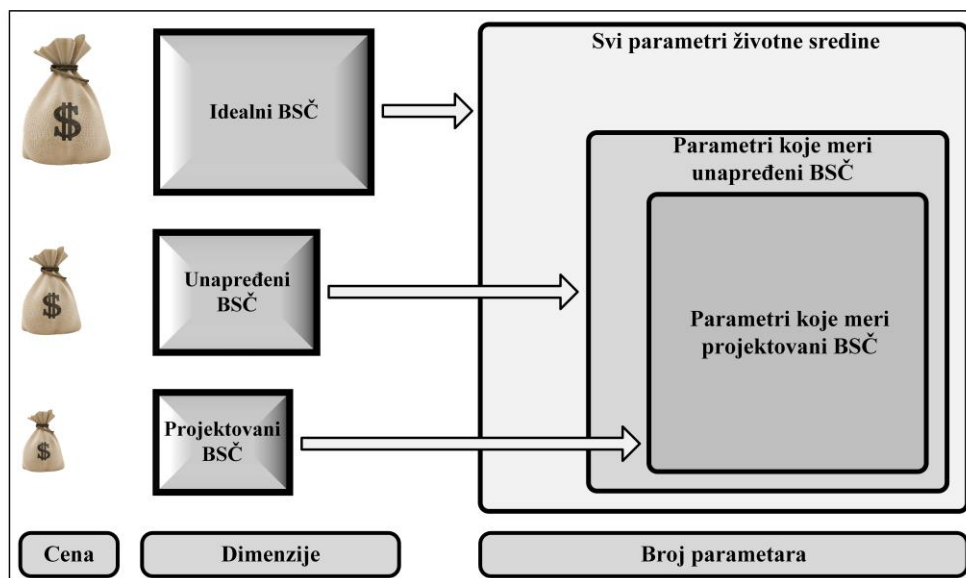
4.5.1 Ograničenja projektovanog bežičnog senzorskog čvora

Projektovani čvor se odlikuje niskom cenom, minijaturnim dimenzijama i generalno jednostavnošću. Predstavlja savršeno namenski projektovano rešenje ukoliko je potrebno pratiti određeni parametar životne sredine, koji se drastično menja na malom prostoru, pa je neophodan veliki broj čvorova. Takođe, primena je prilagođena prostoru sa dovoljno inteziteta sunčeve svetlosti. Veliki broj parametara sredine se može pratiti opisanom konfiguracijom.

Međutim, postavlja se pitanje, šta ako se određeni parametar ne menja drastično na određenom prostoru, tj. šta ako nije neophodan veliki broj čvorova. Na primer, ako se pretpostavi da je domet komunikacije oko 100 m, a promenu određenog parametra ima smisla meriti tek na intervalima rastojanja od 5000 m. Jasno je da treba dodati preko 50 čvorova između dva čvora sa integrisanim sensorima, koji uglavnom obavljaju ulogu prenosa podataka, tzv. „*multihop*“ operaciju. „*Multihop*“ operacija podrazumeva da čvor primljeni podatak samo prosledi do sledećeg čvora u dometu i ovi čvorovi ne sadrže senzore. Čak i pored veoma male cene, korišćenje velikog broja čvorova za obavljanje samo prenosa podataka nije optimalno rešenje. Jednostavnije je u okviru čvora ugraditi podsistem za bežičnu radio komunikaciju sa većim dometom. Ugradnja ovakvog podsistema zahteva novo namensko projektovanje, a za ostvarivanje većeg dometa je potrebno koristiti skuplje komponente sa većom potrošnjom.

Projektovani čvor je primenljiv na mestima gde postoji sunčeva svetlost. Međutim, postoje parametri životne sredine na mestima gde ne dopire sunčeva svetlost. Već su pomenute primene BSM-a u pećinama [20], [33], zatim gustim šumama [89], a postoje i mnoga druga mesta gde iz objektivnih razloga ne može da se računa na sunčevu svetlost. Na ovim mestima je poželjno ili koristiti baterije ili neki drugi izvor energije iz okoline koji je prikazan na slici 3.5. Projektovani čvor podržava izvore energije iz okoline sa jednosmernim naponom, kao što je fotonaponska ćelija ili termoelektročni generator. Ostali izvori energije iz okoline nisu podržani. Ukoliko postoji potreba da se na nekom prostoru koristi drugi izvor energije iz okoline, neophodno je ponovo namenski projektovati čvor.

Korišćeni mikrokontroler se odlikuje veoma niskom cenom, ali i relativno slabim performansama. Sa integrisanom programskom fleš memorijom kapaciteta 16 KB i memorijom za podatke kapaciteta 512 B, nije moguće implementirati kompleksniju obradu podataka sa senzora ukoliko je to neophodno. Ukoliko mikrokontroler ima bolje performanse i podržava više perifernih jedinica i interfejsa, povećava se skup senzora koji se mogu priključiti na čvor. Ograničenja uočena na projektovanom čvoru su:



Slika 4.29 Razlika u ceni, dimenzijama i broju parametara životne sredine između idealnog, unapređenog i projektovanog čvora

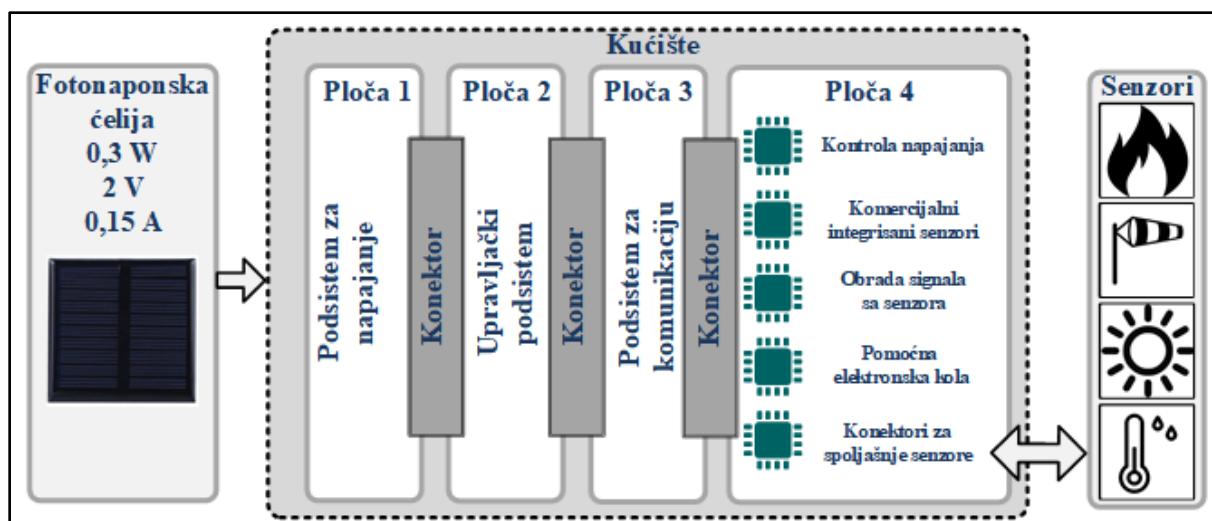
1. samo jedan tip bežičnog prenosa je podržan, sa kratkim dometom,
2. nepostojanje podrške za druge izvore energije iz okoline,
3. slabe performanse mikrokontrolera,
4. informacija o tačnom vremenu nije dostupna na nivou čvora,
5. koristi se interni referentni napon za analogne senzore koji zavisi od temperature i
6. ne postoji podrška za promenu firmvera sa udaljene lokacije.

Ovo su najveća ograničenja projektovanog čvora, ali treba naglasiti da se u zavisnosti od primene mogu pojaviti nova. Uveden je pojam idealnog čvora kako bi se lakše shvatila ograničenja i mogućnosti u analizi i projektovanju novih rešenja. Idealni čvor može da prati sve parametre životne sredine, podržava praćenje svih poznatih parametara sredine i izvore energije iz okoline. Zbog puno elektronskih komponenti koje to omogućavaju, dimenzije takvog uređaja su velike, a isto važi i za cenu. Projektovani čvor podržava praćenje jednog dela parametara, baš kao i unapređeni čvor, ali je kod unapređene verzije skup parametara je veći. Grafička zavisnost između idealnog, projektovanog i unapređenog čvora je data na slici 4.29.

Dakle, unapređeni čvor treba da proširi skup mogućih parametara koji se prate, uz prevazilaženje ograničenja projektovanog čvora. Naravno, osnovni zahtevi za niskom cenom, robusnošću, prilagodljivošću i minimalnim uticajem na životnu sredinu moraju biti zadovoljeni u što većoj meri.

4.5.2 Projektovanje unapređenog bežičnog senzorskog čvora

Vrlo je teško pronaći optimalno rešenje za čvor koje prevazilazi sva moguća ograničenja. Raznovrsnost parametara životne sredine je veoma široka i to se preslikava u tekuću tehnologiju izrade senzora. Upravo je ovo glavni razlog da se celokupni elektronski sistem podeli na glavnu i dodatnu ploču kao što je prikazano na slici 4.24.

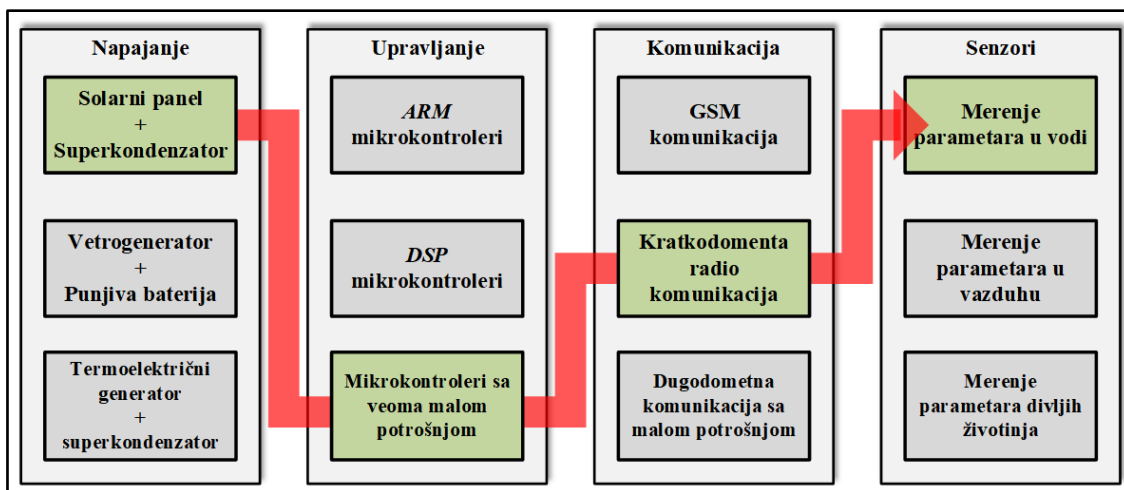


Slika 4.30 Modularna struktura unapređenog čvora koji se sastoji od četiri štampane ploče, po jedne za svaki podsistem

Na osnovu ove analize, razmatrana je modularnost kao jedan način rešavanja ograničenja projektovanog čvora i dodatnog proširivanja mogućnosti u primeni. U prilog ovakvoj realizacije ide tekuća podela čvora na podsisteme, kao što je to prikazano na slici 2.3. Dakle, ideja je da se glavna ploča projektovanog čvora podeli na module koji predstavljaju podsisteme za napajanje, komunikaciju i upravljanje. Modularna struktura čvora sada izgleda kao na slici 4.30. Svaki podsistem je realizovan na posebnoj štampanoj ploči, tj. modulu. U odnosu na projektovani, očividno je da unapređeni čvor ima složeniju strukturu, zahteva više vremena za projektovanje i zauzima više prostora. Međutim, ovakav pristup rešava većinu uočenih ograničenja kod prve verzije projektovanog čvor i pruža mnoštvo novih mogućnosti.

Posebna štampana ploča za napajanje omogućava da se u zavisnosti od primene ili parametara koji se prate, upotrebe različiti izvori energije iz okoline. Na primer, ukoliko je neophodno pratiti parametre potoka u šumi, gde je sunčeva svetlost nedovoljna za napajanje čvora, onda je dovoljno zameniti samo ploču za napajanje novom koja prikuplja energiju iz okoline korišćenjem generatora na vodu. Ukoliko na mestu merenja nekog parametra postoji dosta vetra, onda se koristi podsistem za napajanje koji podržava prikupljanje energije vetra iz okoline. Preostali delovi čvora ostaju isti, uključujući hardver, program u mikrokontroleru, način komunikacije i očitavanje senzora. Vrlo verovatno dimenzije kućišta ostaju iste, ali to zavisi od kompleksnosti modula koji se koristi kao zamena. Ista logika važi i za upravljačku i komunikacionu ploču. Ukoliko je potrebna veća procesorska snaga, jer to određeni senzor zahteva, onda se dodaje modul sa mikrokontrolerom koji poseduje bolje performanse. Ukoliko je potrebno ostvariti veći domet komunikacije, koristi se modul sa elektronskim kolima koja to podržavaju.

Jasno je da broj različitih modula koji se mogu koristiti za napajanje zavisi od mnogo faktora, kao što su, broj različitih izvora energije, neophodna maksimalna snaga, da li se koristi baterija ili superkondenzator kao element za skladištenje energije itd. Takođe, moguće je napraviti veliki broj raznovrsnih upravljačkih i komunikacionih modula, sa obzirom na ogroman broj komercijalnih mikrokontrolera i komunikacionih čipova.



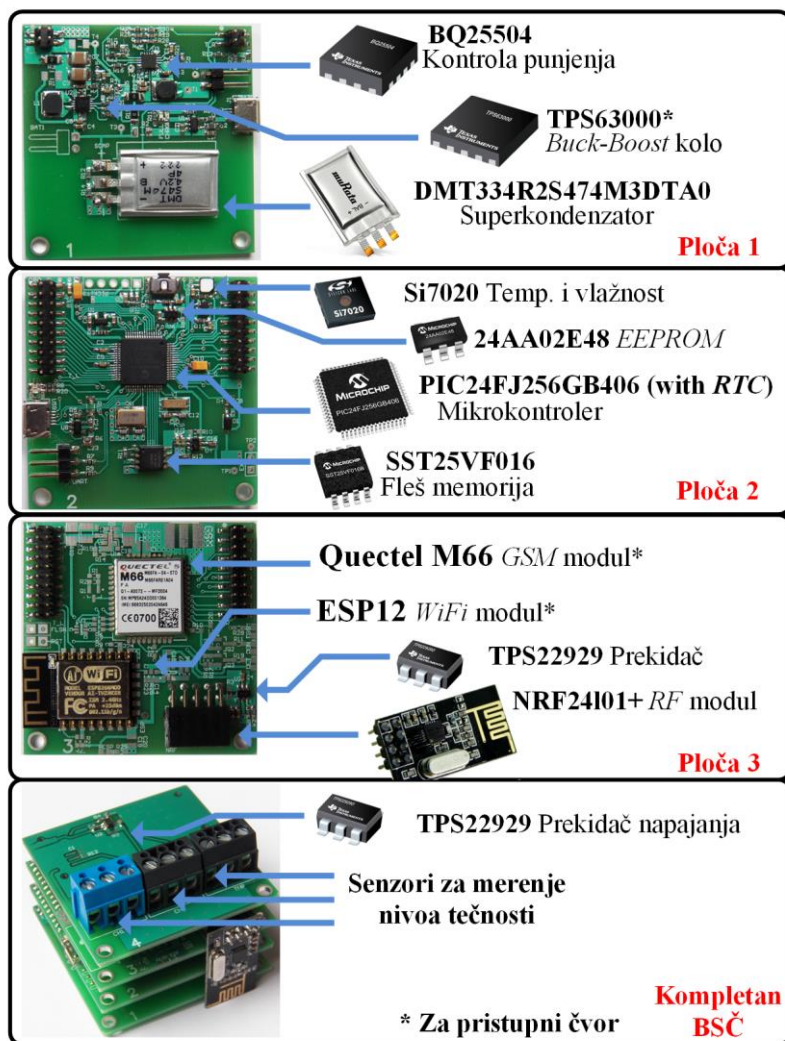
Slika 4.31 Primer tri potencijalna modula za svaki podsistem čvora. Strelica označava module koji su ekvivalentni projektovanom čvoru

U okviru ove disertacije neće biti razmatran broj potencijalnih modula za svaki podsistem čvora, jer je on potencijalno neograničen. Jedan način kombinovanja različitih modula prikazan je na slici 4.31.

U ovoj disertaciji je fabrikovan čvor korišćenjem modularnog pristupa, sa sličnim performansama kao projektovani čvor. Prilikom projektovanja su i dalje u prvom planu zahtevi za niskom cenom, pouzdanim radom, prilagodljivošću i minimalnim uticajem na životnu sredinu. Projektovanje je fokusirano u pravcu otklanjanja nedostataka primećenih kod prve projektovane verzije čvora. Podsistem za napajanje zasnovan na prikupljanju energije Sunca iz okoline i superkondenzatoru je ostao isti u cilju kvalitetnijeg poređenja projektovane i unapređene verzije čvora. Svi projektovani moduli sa ključnim komponentama i izgled unapređenog sistema prikazani su na slici 4.32 [90].

Sledi opis unapređenog čvora. Osim funkcionalnosti opisanih kod projektovanog čvora, dodate su nove koje omogućavaju da uređaj, uz dodatne komponente, može da obavlja funkcije merne stanice ili pristupnog čvora. Komunikacioni podsistem na istoj štampanoj ploči podržava kratkodometnu komunikaciju, ali podržava i ugradnju *GSM* i *WiFi* modula. Zbog ovih funkcionalnosti je unapređen i podsistem za napajanje.

Ranije je pomenuto da u prirodi postoje parametri koji se na određenom prostoru relativno malo menjaju. Primeri ovakvih parametara su temperatura i pritisak. Za praćenje parametara koji se ne menjaju drastično na jednom prostoru nije potreban veliki broj čvorova, već optimalno jedan. Sa ciljem da se projektovani čvor što kvalitetnije primeni, u okviru komunikacionog podsistema, ugrađen je *GSM* modul koji koristi mreže mobilnih operatera za prenos podataka. Osim funkcije jedinstvene merne tačke na terenu koja je sposobna da samostalno šalje podatke na udaljenu lokaciju, ovo rešenje je moguće koristiti i kao pristupni čvor. Pošto pristupni čvor radi u aktivnom režimu i zahteva više energije, bilo je neophodno unaprediti podsistem za napajanje. Za ovu svrhu su dodate su nove komponente koje ne povećavaju dimenzije ploča, dakle svi moduli su dimenzija 4,8 cm x 4,8 cm.



Slika 4.32 Izgled i moduli unapređenog čvora sa ključnim komponentama [90]

Za potrebe funkcionalnosti merne stanice ili pristupnog čvora, predviđeno je korišćenje punjivih baterija zbog većih zahteva za energijom. Naravno, ako se rešenje koristi kao čvor onda se dodatne komponente ne montiraju, tako da ne utiču na konačnu cenu i dimenzije.

Modul za napajanje je kao i prva verzija baziran na integrisanom rešenju *bq25504*. Ovo rešenje je pogodno za punjenje superkondenzatora i punjivih baterija. Za potrebe funkcionalnosti u režimu merne stanice ili pristupnog čvora, dodato je *buck-boost* integrisano rešenje. Prekidačko napajanje je u stanju da veoma brzo reaguje na tranzijentne zahteve za strujom od strane *GSM* i *WiFi* modula. U toku fabrikacije se definiše da li je elektronski sistem bežični senzorski čvor, pristupni čvor (*GSM* ili *WiFi*) ili merna stanica.

Zbog veoma skromnih performansi *MSP430G2553* mikrokontrolera, projektovan je novi upravljački modul koji koristi *PIC24FJ256GB406* [91], proizvođača *Microchip*. Ovaj mikrokontroler u poređenju sa *MSP430G2553* ima 16 puta više programske memorije, 32 puta više memorije za podatke, mnogo više periferija i ulazno-izlaznih pristupa, sličnu potrošnju, i to sve po svega tri puta većoj ceni. Izbor ovog mikrokontrolera rešava neka od uočenih ograničenja projektovanog čvora, takođe dodaje nove moguće funkcionalnosti. Na primer,

integrirani sat realnog vremena (engl. *RTC – Real Time Clock*) čuva informacije o proteklom vremenu, što je od izuzetne važnosti za sinhronizaciju i protokole rutiranja u okviru BSM-e. Posедуje hardverski implementiran kriptografski algoritam za zaštitu podataka, integrirani 12-bit *ADC*, mnoštvo ulaza i izlaza sa sekundarnim funkcijama i mnoge druge opcije. Pojedini ulazi se mogu konfigurirati za merenje malih kapacitivnosti o čemu će više reći biti kasnije. Na upravljačkom modulu su dodati senzor za temperaturu i vlažnost (*Si7020*), serijski *EEPROM* 24AA02E48 [92], proizvođača *Microchip*, koji je novije generacije sa podrškom prepoznavanja identiteta (engl. *Node Identity*) za podršku „internet stvari“ i fleš memorija kapaciteta 16 Mbit. Fleš memorija je predviđena za implementiranje ažuriranja firmvera na daljinu, što je jedno od ograničenja projektovanog čvora.

Na komunikacioni modul su osim ranije korišćenog *nRF24L01* radio primopredajnika kratkog dometa dodati *GSM* i *WiFi* moduli. Njihova svrha je da povećaju ukupnu upotrebljivost rešenja, tako da se ono može koristiti kao pristupni čvor ili nezavisna merna stanica. Napajanje ovih modula je u potpunosti kontrolisano od strane mikrokontrolera korišćenjem integriranog prekidača napajanja *TPS22929* [93].

Može se zaključiti da unapređeni čvor koji koristi modularni pristup ima mnogo veću fleksibilnost u primeni. Ova fleksibilnost se može iskoristiti u daljem radu i istraživanju. Novi mikrokontroler znatno povećava broj senzora koji se mogu povezati na čvor, bilo da je u pitanju kvantitet ili nestandardan interfejs, a bolje performanse omogućavaju bržu lokalnu obradu podataka i izvršavanje programa, što povećava efikasnost i štedi energiju.

5. Eksperimentalna verifikacija projektovanog rešenja

5.1 Održivost superkondenzatora kao elementa za skladištenje energije

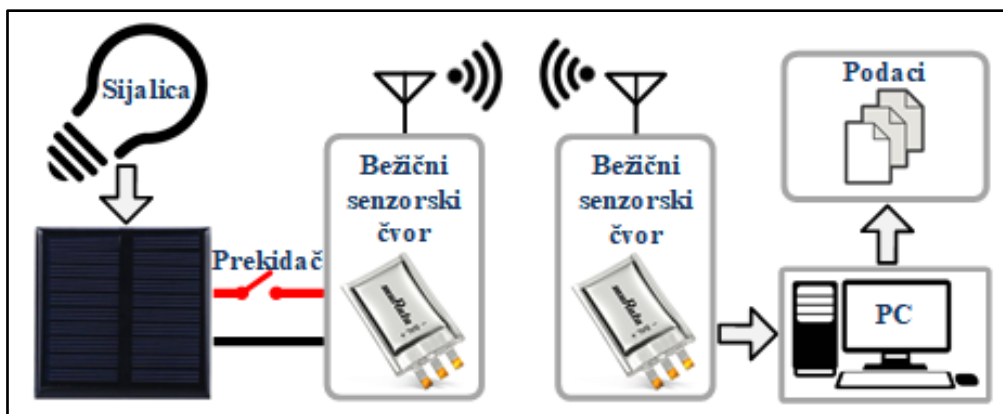
Za normalno funkcionisanje bežični senzorski čvor zahteva neprekidno napajanje. Čak i u uspavanom režimu, memorija mikrokontrolera je pod stalnim napajanjem, što u praksi znači da se program izvršava i da je spreman da se u zavisnosti od spoljašnjih događaja probudi, izvrši neku radnju, i ponovo vrati u režim spavanja. Kada čvor koristi napajanje iz baterije, sve dok postoje hemijske reakcije koje proizvode energiju, funkcionalnost je zagarantovana. U slučaju kada se sistem za napajanje sastoji od solarnog panela kao izvora i superkondenzatora kao skladišta energije, postoji verovatnoća da se u nekom trenutku funkcionalnost poremeti, pre svega u toku noći kada sunčeva svetlost nije dostupna, a količina energije u superkondenzatoru nije dovoljno uskladištena. Dakle, potrebno je ispitati da li će u nekom trenutku čvor ostati bez napajanja.

Usled gubitka napajanja, čvor prestaje sa radom, a to znači da se ne dobijaju podaci o parametrima koji se prate. Takođe se gubi trenutni sadržaj memorije mikrokontrolera. Kada se ponovo uspostavi napajanje, program se izvršava iz početka, a čvor se resetuje i biće desinhronizovan u okviru BSM-e. Različitim tehnikama je moguće ponovo sinhronizovati čvor, ali se ne mogu nadoknaditi izgubljeni podaci. Praktično je izgubljen bitan deo slagalice. Ukoliko se prati neki kritičan parametar, na primer požar u šumi ili poplave, može se dogoditi da nastane velika šteta usled ispada čvora.

Povoljna situacija kod čvora koji zavisi od solarne energije je da će eventualno povratiti svoju funkcionalnost pri dovoljnom intezitetu svetlosti u toku dana. Problem u radu čvora može da nastane u toku noću kada se koristi samo energija iz superkondenzatora. Zato je neophodno izvršiti analizu održivosti napajanja koje zavisi od solarne energije i superkondenzatora. U ovom slučaju, smatra se da je podsistem za napajanje održiv ako čvor u toku svog rada, danju ili noću, uvek ima dovoljno energije za normalan rad.

5.1.1 Ispitivanje brzine pražnjenja superkondenzatora

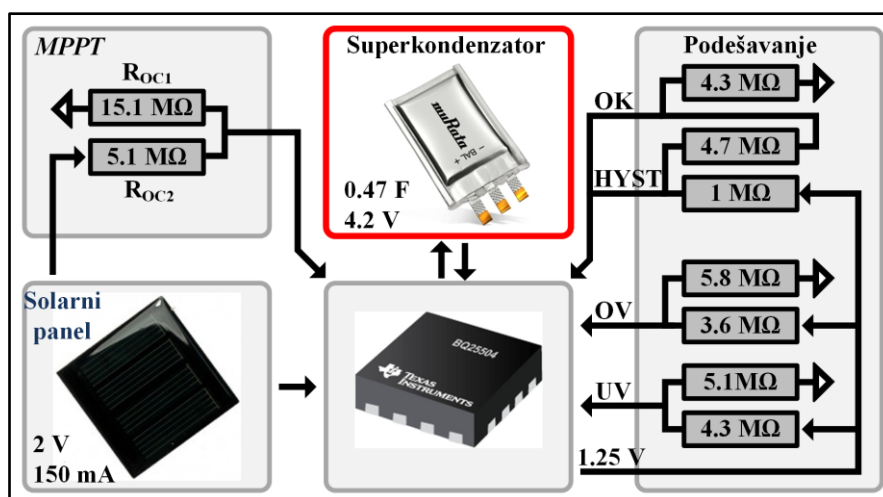
U cilju provere održivosti napajanja projektovanog čvora sprovedeno je nekoliko eksperimenata. Jedan od eksperimenata je da se proverí koliko dugo je čvor operativan kada se koristi potpuno napunjen superkondenzator. Sprovedeni su eksperimenti koji pokazuju trajanje energije superkondenzatora u zavisnosti od učestanosti bežičnog slanja podataka. Promenom učestanosti slanja podataka menja se srednja potrošnja čvora u toku vremena. Postavka eksperimenta je prikazana na slici 5.1.



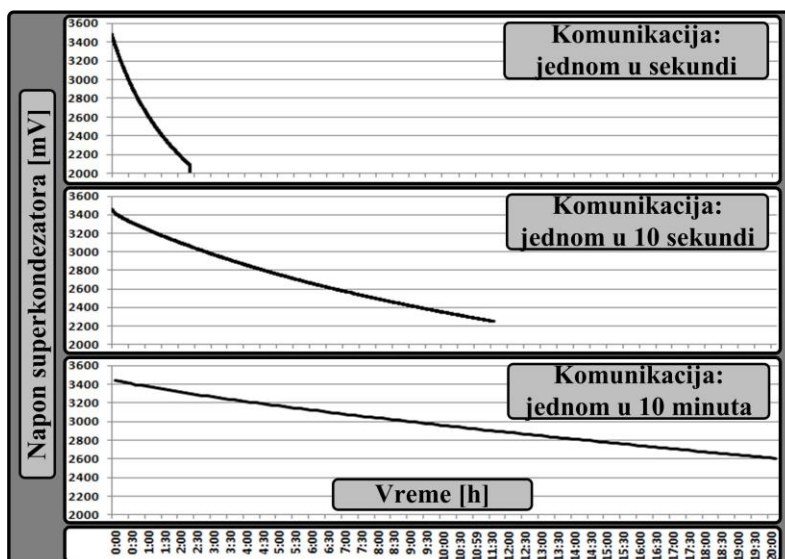
Slika 5.1 Postavka za merenje vremena opadanja napona superkondenzatora u odnosu na učestanost slanja podataka putem bežične komunikacije

Kao izvor energije se koristi sijalica sa užarenim vlaknom koja simulira sunčevu svetlost. Kada se superkondenzator napuni, fotonaponska ćelija se fizički odvaja od čvora i pokreće se eksperiment. Pošta većina korišćenih elektronskih komponenti ima maksimalni radni napon od 3,60 V, podešeno je da se superkondenzator napuni na tačno 3,53 V. Čvor je funkcionalan sve dok napon na superkondenzatoru ne opadne ispod 2,20 V, kada kolo za punjenje prestaje sa radom. Vrednosti maksimalnog i minimalnog operativnog napona se podešavaju spoljašnjim komponentama kao što je prikazano na slici 5.2. Vrednosti spoljašnjih otpornika su reda megaoma, kako bi se minimizovala sopstvena potrošnja kontrolera za punjenje, tj. da se spreči suvišno gubljenje energije.

Dakle, kada se superkondenzator napuni, odvaja se izvor energije, tj. solarni panel. Mikrokontroler se nalazi u uspavanom stanju i budi se na tačno programirane intervale. Nakon buđenja, korišćenjem integrisanog analogno-digitalnog konvertora se izmeri vrednost napona na superkondenzatoru, koja se šalje putem radio komunikacije do pristupnog čvora, koji povezan na računar gde se vrši arhiviranje podataka.



Slika 5.2 Prikaz dostupnih podešavanja kontrolera za punjenje korišćenjem spoljašnjih otpornosti



Slika 5.3 Primer pražnjenja superkondenzatora DMT334R2S474M3DTA0 za različite frekvencije slanja podataka

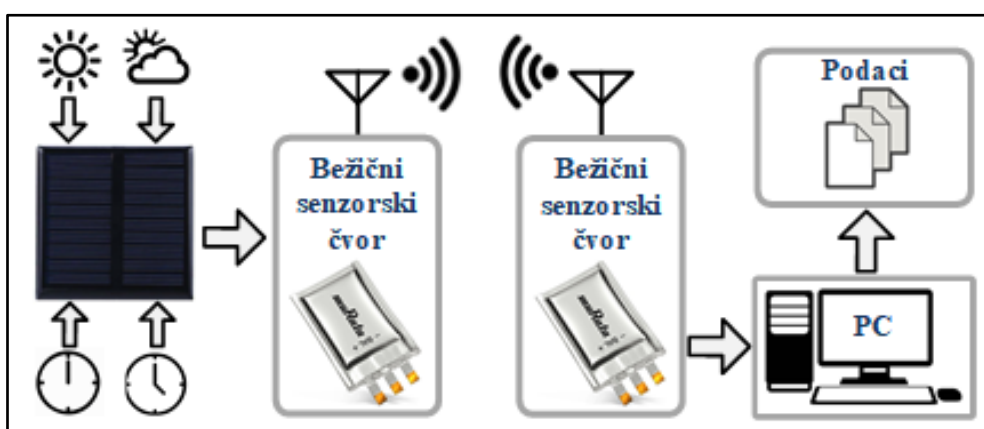
Čvor u aktivnom stanju ima drastično veću potrošnju. Prema tabeli 4.3 potrošnja iznosi oko 15 mA, ali samo u kratkom intervalu vremena. Pošto se osnovna funkcionalnost čvora se ostvaruje putem bežičnog slanja podataka, od interesa je mogućnost slanja što više podataka, ali da se ne troši previše energije. Zato je u eksperimentu posmatrana potrošnja raspoložive energije u zavisnosti od frekvencije slanja podataka, sa tendencijom da se pošalje što više podataka. U eksperimentima, podaci se šalju jednom u svakoj sekundi, jednom u 10 sekundi i jednom u 10 minuta. Prve dve vrednosti su izabrane kako bi se jasno videla razlika kada se interval slanja promeni za red veličine, dok je treća vrednost izabrana kao realno moguća za primene u praćenju sporopromenljivih parametara životne sredine.

Kada se slanje podataka vrši svake sekunde, superkondenzator se isprazni za manje od tri sata, dok se za interval slanja jedanput u 10 sekundi superkondenzator isprazni za oko 12 sati. Za slučaj kada se podaci šalju jednom u 10 minuta, superkondenzator se nije ispraznio ni posle 20 sati rada, kada je eksperiment prekinut. Na slici 5.3 se vidi promena napona superkondenzatora za pomenute frekvencije slanja podataka.

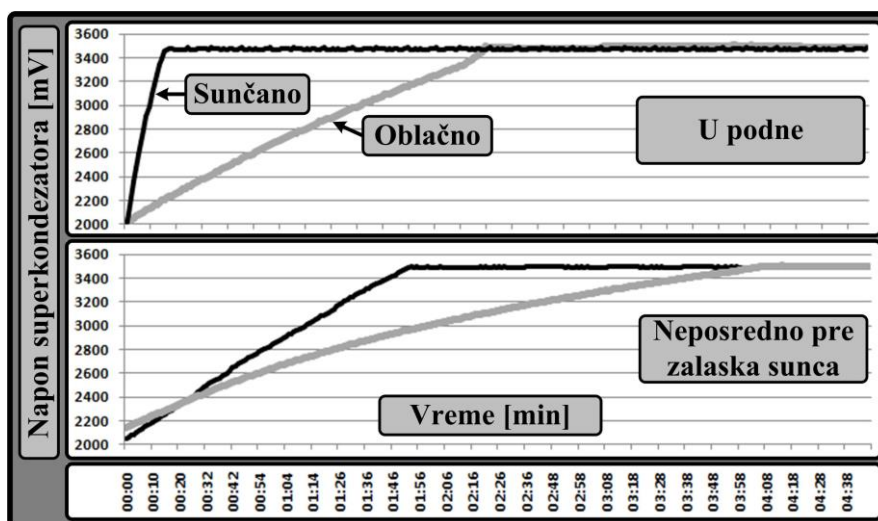
Kao što je očekivano, povećanje frekvencije slanja podataka utiče na potrošnju čvora tako što ubrzava pražnjenje superkondenzatora. Teorijski, ako se podaci šalju jednom u 10 sekundi, energija superkondenzatora je dovoljna da čvor bude operativan celu noć. U praksi, ako je noć duža od 12 sati, na primer zimi, može se dogoditi da čvor ostane bez napajanja. Takođe, na ukupnu potrošnju utiču priključeni integrisani senzori koji u toku ovog eksperimenta nisu korišćeni. Zaključak je da ukoliko je potrebna učestanost slanja podataka veća od 1 Hz, predloženo rešenje nije optimalno. Međutim, uzimajući u obzir da je osnovna funkcija čvora praćenje sporopromenljivih parametara životne sredine, zaključak je da je moguće pronaći optimalnu frekvenciju slanja, tako da uskladištena energija u superkondenzatoru izdrži do sledećeg ciklusa punjenja, što je u ovom slučaju trenutak kada se pojavi sunčeva svetlost.

5.1.2 Ispitivanje punjenja superkondenzatora

Pošto je sunčeva svetlost nekontrolisani, ali predvidljivi izvor energije iz okoline, razmatrana je održivost primene prikupljanja energije iz okoline i superkondenzatora za konstantno napajanje čvora u realnim uslovima. Izvršena su merenja u različitim vremenskim uslovima i različitim delovima dana, a posmatrana je brzina punjenja superkondenzatora. Eksperimenti treba da pokažu da se u različitim uslovima osvetljenja superkondenzator uvek napuni na podešenu vrednost od 3,53 V. Eksperimentalna postavka je prikazana na slici 5.4. Superkondenzator se prvo isprazni, ali ne do kraja, već do granice operativnosti, a to je 2,1 V. Zatim se povezuje fotonaponska ćelija koje je izložena sunčevoj svetlosti. Kao i kod eksperimenata sa pražnjenjem superkondenzatora, mikrokontroler se budi na tačno određene intervale i korišćenjem integrisanog analogno-digitalnog konvertora meri se vrednost napona na superkondenzatoru i šalje putem radio komunikacije na arhiviranje.



Slika 5.4 Eksperiment punjenja superkondenzatora pri normalnom osvetljenju Sunca i za slučaj kada je vreme oblačno. Punjenje je sprovedeno u podne pri najvećem intezitetu osvetljaja i posle podne neposredno pred zalazak Sunca, kada je intezitet osvetljaja najmanji u toku dana.



Slika 5.5 Vreme punjenja superkondenzatora za slučaj sunčanog i oblačnog vremena. Gornji grafikon pokazuje punjenje u podne, a donji neposredno pred zalazak Sunca

Važno je napomenuti da su eksperimenti sprovedeni sredinom decembra, kada se može smatrati da je najnepovoljniji odnos trajanja dana i noći, odnosno najgori mogući slučaj prikupljanja sunčeve energije iz okoline. Slika 5.5 pokazuje vreme punjenja superkondenzatora za dva granična slučaja raspoložive osvetljenosti, u toku podneva i pred zalazak Sunca. Sa grafika se vidi da se u podne, pri maksimalnoj osvetljenosti, superkondenzator napuni za manje od 20 s, a kada je oblačno, punjenje traje očekivano duže, oko 150 s. Neposredno pred zalazak Sunca može se smatrati da je intezitet svetlosti na minimumu u toku dana. Punjenje superkondenzatora u ovom slučaju je oko 120 s za vedro vreme i oko 240 s za oblačno vreme. Naravno, izmerene vrednosti su podložne promenama u zavisnosti od stepena oblačnosti, ali grubo opisuju red veličine trajanja procesa punjenja.

Eksperiment je pokazao da na punjenje superkondenzatora utiču promenljivi vremenski uslovi. Bez obzira na uticaj inteziteta osvetljenosti na punjenje, zaključak je da će se superkondenzator sigurno napuniti na maksimalnu podešenu vrednost u toku dana, čak i pri oblačnom vremenu pred kraj dana. Takođe, može se smatrati da čvor u toku dana praktično ima mnogo više energije nego što je potrebno, a kada se superkondenzator napuni, višak energije se ne koristi.

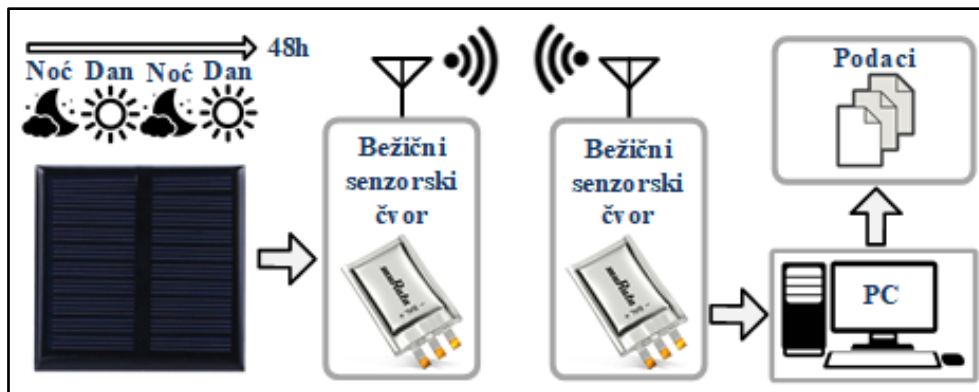
Zbog viška energije na raspolaganju, čvor nije primoran da štedi energiju kao u noćnom režimu rada, kada je neophodno upravljati energijom. Ipak, zbog mogućih oscilacija raspoložive sunčeve energije, neophodno je uvek imati informaciju o trenutnoj raspoloživoj energiji superkondenzatora. Racionalna potrošnja energije tokom noći podrazumeva smanjivanje frekvencije slanja podataka i manji broj merenja parametara.

Dakle, može se zaključiti, da će superkondenzator u toku dana konstantno biti napunjen na podešen napon od 3,53 V i da je u toku dana je na raspolaganju mnogo više energije od one koja obezbeđuje normalan rad čvora. Višak energije se može potrošiti na različite načine, a najjednostavniji način je povećanje broja merenja i učestalije slanje podataka. S druge strane, u toku dana moguće je očitavati senzore koji zahtevaju više energije, kao što su, na primer, senzori za merenje koncentracije gasova koji u svojoj strukturi imaju grejač koji znatno povećava potrošnju. U toku noći ovi senzori brzo prazne superkondenzator, tako da njihovo korišćenje nije preporučljivo. Prema simulacijama, senzor koji zahteva struju od 50 mA, isprazniće superkondenzator za oko 10 sekundi.

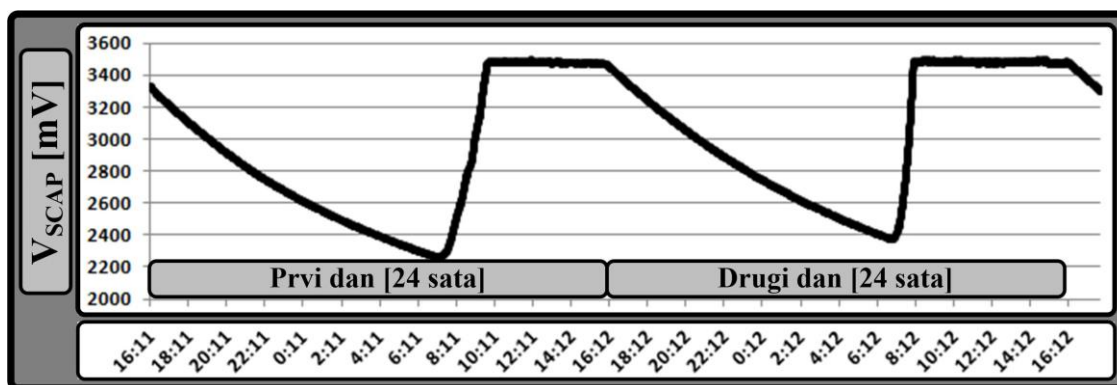
5.1.3 Ponašanje superkondenzatora u normalnom radu

Nakon eksperimenata u kojima je analizirano punjenje i pražnjenje superkondenzatora u različitim uslovima, napravljen je eksperiment koji potvrđuje da je čvor održiv u pogledu neprekidnog napajanja. Postavka eksperimenta je prikazana na slici 5.6 i slična je kao u prethodnom eksperimentu, osim što je proces prikupljanja podataka trajao neprekidno 48 sati.

Čvor je ostavljen da radi neprekidno, a na slici 5.7 je prikazana promena napona na superkondenzatoru u toku dva dana. Na osnovu promene napona može se zaključiti kako se čvor ponaša u realnoj primeni.



Slika 5.6 Postavka eksperimenta u kome je testirana odživost čvora u trajanju od 48 sati



Slika 5.7 Promena napona na superkondenzatoru (V_{SCAP}) DMT334R2S474M3DTA0 u toku perioda od dva dana

Eksperiment je izvršen u toku decembra pod najnepovoljnijim odnosom trajanja dana i noći. U svakom drugom periodu u godini, čvor će na raspolaganju imati više energije i šire mogućnosti u radu. Frekvencija slanja podataka je podešena na jedan minut, jer je na osnovu prethodnih eksperimenata ustanovljeno da najbolje odgovara granici ispod koje održivost čvora dolazi u pitanje. Treba napomenuti da je u ovom eksperimentu slanje podataka definisano u tačno određenim vremenskim intervalima, što u realnosti ne mora biti tako. Promenom učestanosti frekvencije slanja podataka u toku dana i noći, moguće je kontrolisati nivo raspoložive energije.

Sa slike 5.7 se vidi da razlika u trajanju dana i noći drastično utiče na oblik napona superkondenzatora. Kada se pojavi sunčeva svetlost, počinje da se puni superkondenzator, ali je potrebno preko sat vremena da se napuni do kraja. Prethodni eksperiment je pokazao da punjenje u najgorem slučaju traje nekoliko minuta. Postoje dva razloga za ovakvo ponašanje. Prvi, uređaj je bio zaklonjen senkom susedne zgrade, a drugi razlog je potrošnja čvora, jer radio komunikacija stalno troši određeni deo energije koji je uskladišten između dva intervala slanja podataka. Može se primetiti i da je pretpostavka da će u toku dana superkondenzator biti stalno napunjen bila opravdana.

Projektovani sistem za prikupljanje energije iz okoline u kombinaciji sa superkondenzatorom može se smatrati konstantnim izvorom napajanja za čvor. U toku dana ima dovoljno energije za povećanje broja merenja i bežično slanje podataka. Takođe, moguće

je koristiti senzore koji za normalan rad zahtevaju više energije. U toku noći, moguće je obaviti merenja određenih parametara, ali samo korišćenjem senzora veoma male potrošnje. Broj merenja i slanja podataka mora biti zavistan od raspoložive energije u superkondenzatoru.

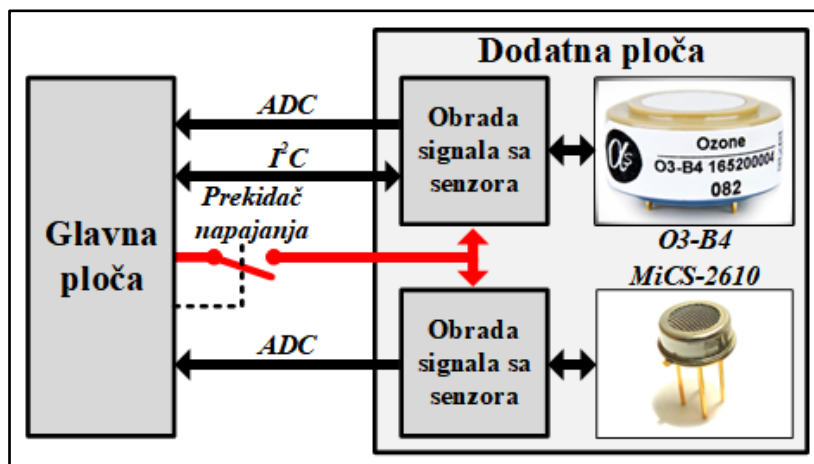
5.2 Proširivanje funkcionalnosti projektovanog bežičnog senzorskog čvora

Proširivanje funkcionalnosti projektovanog čvora je od izuzetnog značaja, jer u životnoj sredini postoji puno parametara za čije praćenje je potrebno koristiti razne vrste senzora. Smatra se da je čvor kvalitetniji ukoliko je moguće priključiti veći broj senzora. Zato je veoma važno da se razmotre načini povezivanja senzora i ispita mogućnost projektovanog čvora u tome. Ako se poznaje postupak proširivanja funkcionalnosti čvora, može se zaključiti o potencijalnim mogućnostima za buduće primene. Važno je shvatiti način povezivanja komercijalnih senzora. U disertaciji je opisan postupak povezivanja namenski projektovanog senzora i utvrđena mogućnost korišćenja čvora kao platforme za ispitivanje novih senzora i primena u oblasti životne sredine.

5.2.1 Proširivanje funkcionalnosti bežičnog senzorskog čvora sa komercijalnim sensorima

Projektovani čvor se sastoji od glavne i dodatne štampane ploče kao što se može videti na slici 4.24. Glavna ploča objedinjuje funkcionalnosti podsistema za napajanje, upravljanje i komunikaciju, a dodatna ploča je namenjena za senzorski podsistem. Ipak, integrisani senzori za temperaturu, vlažnost i pritisak koji su prikazani na slikama 4.25, 4.26 i 4.27, čine da je i deo senzorskog podsistema nalazi na glavnoj ploči. Njihova uloga je da obezbedi realne podatke za testiranje čvora, ali i zbog činjenice da puno senzora zahteva kalibraciju i kompenzaciju u zavisnosti od pomenutih veličina. Ostali komercijalni senzori se mogu ugraditi na dodatnu ploču, koja se na glavnu ploču povezuje preko konektora za proširivanje.

Na slici 4.28 (levo) je prikazana dodatna ploča sa komercijalnim sensorima za merenje koncentracije ozona. Blok šema dodatne ploče sa ključnim komponentama je prikazana na slici 5.8.



Slika 5.8 Blok šema dodatne ploče koja koristi komercijalne senzore za merenje koncentracije ozona

Na dodatnoj ploči se nalaze dodatne komponente koje omogućavaju kontrolu napajanja od strane glavne ploče, zatim dodatna elektronska kola za obradu signala sa senzora i konektori za priključivanje senzora. Na konektorima se mogu priključiti dva komercijalna senzora za merenje koncentracije ozona, jedan ima oznaku *O3-B4* [94], proizvođača *Alphasense*, a drugi *MiCS-2610* [95], proizvođača *SGX Sensortech*. Prvi se odlikuje malom potrošnjom struje u toku rada od 1 mA, a drugi znatno većom od 34 mA. Ova senzorska ploča je projektovana upravo za testiranje mogućnosti senzora sa različitom potrošnjom. Senzor sa većom potrošnjom koristi jednostavnu tehnologiju izrade poznatiju kao metal-oksid poluprovodnik (engl. *Metal-Oxide Semiconductor*) i ima mnogo manju cenu, oko 4 evra na 1000 komada. Cena *O3-B4* senzora je znatno veća i iznosi oko 60 evra. Cena čvora sa *MiCS-2610* senzorom je mnogo manja, ali je ovaj senzor zbog veće potrošnje smatran nepogodnim za baterijski napajana rešenja. Mnoga istraživanja [96] su se bavila primenom metal-oksid-poluprovodnih senzora u BSM-ma, ali je njihova potrošnja uvek predstavljala „usko grlo“ u primeni, naročito ako se koriste ograničeni izvori energije kao što su baterije. Međutim, primenom sistema napajanja koji koristi fotonaponsku ćeliju i supekondenzator, otvaraju se nove mogućnosti primene. Eksperiment čiji su rezultati prikazani na slici 5.7 je pokazao da je napon na superkondenzatoru u toku dana praktično konstantan. U toku dana, izabrani fotonaponski panel generiše struju od maksimalno 150 mA, što je i više nego dovoljno da se superkondenzator brzo napuni, tako da se višak energije može iskoristiti za napajanje senzora koji zahtevaju veću struju, kao što je *MiCS-2610* senzor. Problem može da nastane ako se usled oblačnosti smanji intezitet sunčeve svetlosti. Ipak ovaj problem se lako može rešiti na dva načina. Prvi podrazumeva korišćenje dodatnog senzora za merenje inteziteta sunčeve svetlosti, a drugi da se relativno često u toku rada senzora sa velikom potrošnjom meri nivo napona na superkondenzatoru. Kada nivo osvetljenosti ili napon na superkondenzatoru opadnu ispod određene granice, rad senzora se momentalno zaustavlja, bar dok se superkondenzator ponovo ne napuni i intezitet sunčeve svetlosti ne vrati na optimalan nivo. U toku noći, rad senzora kao što je *MiCS-2610* nije preporučljiv, jer pri potrošnji od 34 mA napunjen superkondenzator ima energiju za oko 15 sekundi. Ipak, ukoliko je opravdano merenje koncentracije samo u toku dana pri dovoljnom nivou osvetljenosti, onda se ovo rešenje može smatrati upotrebljivim. U suprotnom, preporučuje se korišćenje *O3-B4* senzora, koji ima veću cenu, ali znatno manju potrošnju.

U svakom slučaju, navedeni primer pokazuje jedan uspešan način proširivanja funkcionalnosti čvora korišćenjem namenski projektovane dodatne štampane ploče. Na sličan način se mogu koristiti drugi komercijalni senzori. Međutim, ukoliko se senzori razlikuju, potrebno je svaki put projektovati novu dodatnu ploču, što se donekle može smatrati manom. Ipak, u praksi se to ne dešava tako često. Senzori za merenje parametra sredine se uglavnom montiraju izvan kućišta, a na čvor su povezani preko standardnih konektora na kojima se nalazi podrška za različite komunikacije i standarde. Proizvođači senzora nastoje da poštuju standarde, ili ako imaju svoj standard, onda se on koristi za sve senzore. Na primer, osim senzora za ozon, isti konektor može da se iskoristi za senzore koji mere koncentraciju azot-monoksida, azot-dioksida, vodonik-sulfida i sumpor-dioksida [97].

5.2.2 Proširivanje funkcionalnosti bežičnog senzorskog čvora namenski projektovanim senzorom

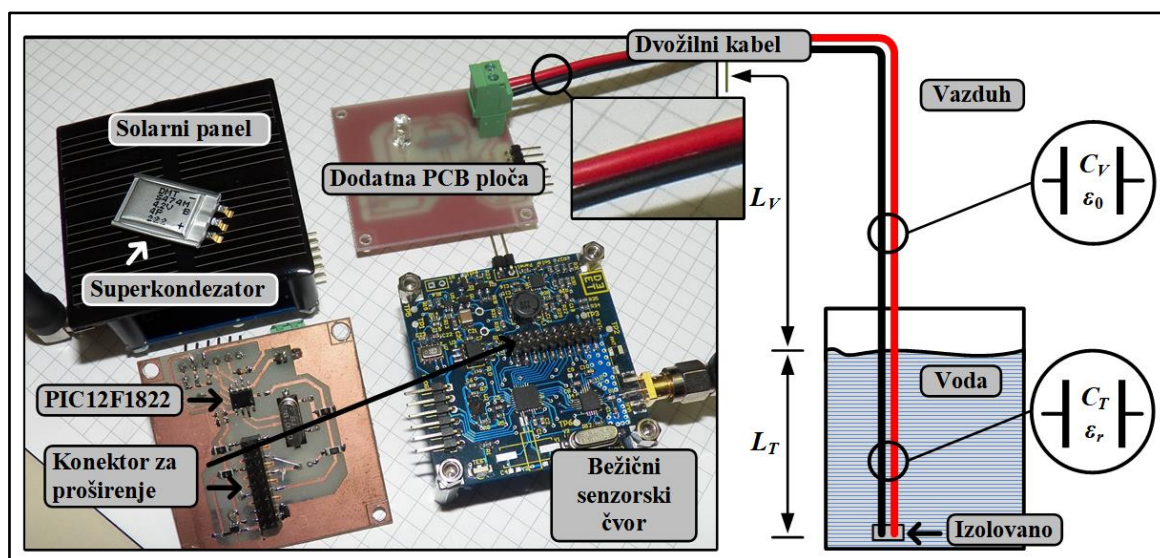
U prethodnom odeljku je prikazan primer kako se funkcionalnost čvora menja povezivanjem dodatne ploče sa komercijalnim sensorima na osnovnu ploču. U zavisnosti od konkretne primene u životnoj sredini vrši se izbor odgovarajućih komercijalnih senzora, definiše se šema, i na kraju projektuje i fabrikuje dodatna ploča. Međutim, na osnovu prethodnog iskustva iz oblasti praćenja parametara životne sredine, u toku projektovanja je uočen potencijal čvora da se koristi kao platforma za ispitivanje novih vrsta senzora. Zato je deo disertacije posvećen projektovanju senzora koji koriste predloženi čvor kao platformu za rad. Na ovaj način se takođe testira čvor u realnoj primeni praćenja parametara životne sredine.

Primenom iskustava iz ranijih istraživanja, projektovan je senzor za merenje nivoa tečnosti, koji se bazira na merenju promena malih kapacitivnosti [28], [98]. Kapacitivnost pločastog kondenzatora se određuje na osnovu izraza:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d}, \quad (5.1)$$

gde je C ukupna kapacitivnost, ε_0 dielektrična konstanta u vakuumu, ε_r relativna dielektrična konstanta materijala, A površina između ploča kondenzatora i d rastojanje između ploča. Ukoliko su površina i rastojanje konstantni, onda je moguće promenom relativne dielektrične konstante uticati na ukupnu kapacitivnost. Razlika dielektrične konstante u vazduhu i vodi je iskorišćena za sintezu senzora za merenje nivoa tečnosti.

Kao element za merenje upotrebljen je običan spojen dvožilni kabel koji se vidi na slici 5.9. Kabel se ovde ponaša kao kondenzator sa konstantnom površinom i rastojanjem iz formule (5.1) i zato je važno da kabel bude spojen kako bi rastojanje d iz formule (5.1) ostalo konstantno.



Slika 5.9 Prikaz kapacitivnog senzora za merenje nivoa tečnosti i njegovo povezivanje na dodatnu ploču i projektovani čvor [30]

U daljem tekstu za kondenzator forimiran dvožilnim kabelom koristiće se termin „kapacitivni element“. Kada se deo kabela uroni u vodu menja se dielektrična konstanta, a samim tim i ukupna kapacitivnost. Kabel mora biti izolovan na drugom kraju, što se lako postiže nekim vodootpornim silikonskim materijalom.

Kapacitivnost kabela u tečnosti sa dielektričnom konstantom ε_r je označena kao C_T , a kapacitivnost u vazduhu kao C_V , gde je dielektrična konstanta ε_0 . Ukoliko se startuje punjenje ovog kondenzatora u trenutku t_0 strujom i , napon na kondenzatoru V_K u trenutku t_1 se određuje na osnovu izraza:

$$V_K(t_1) = V_K(t_0) + \frac{1}{C_{EKV}} \cdot \int_{t_0}^{t_1} i(t) \cdot dt, \quad (5.2)$$

gde je C_{EKV} ukupna ekvivalentna kapacitivnost kabela. Ukoliko je struja punjenja kondenzatora konstantna i označena sa I_K , izraz (5.2) se menja u:

$$V_K(t_1) = V_K(t_0) + \frac{I_K}{C_{EKV}} \cdot (t_1 - t_0). \quad (5.3)$$

Iz (5.3) se lako dobija da se ukupna kapacitivnost C_{EKV} može izraziti kao:

$$C_{EKV} = \frac{I_K \cdot (t_1 - t_0)}{V_K(t_1) - V_K(t_0)}. \quad (5.4)$$

Dakle, ukupna kapacitivnost kabela se može izračunati ako su poznati naponi kondenzatora V_K u trenutku t_1 i t_0 , i ako je poznata konstantna struja punjenja I_K . Postavlja se pitanje kako izmeriti ove napone, kako generisati konstantu struju i kako uopšte ovakvu strukturu pretvoriti u senzor sa komercijalnom primenom.

Zahvaljujući popularnosti komercijalnih elektronskih uređaja koji u svrhu interakcije sa korisnikom koriste opciju aktiviranje na dodir (engl. *Touch*), danas postoji puno komercijalnih integrisanih čipova i mikrokontrolera sa ugrađenom *touch* opcijom koja radi na principu merenja malih kapacitivnosti. U ranijim radovima [28], [98] korišćen je mikrokontroler sa integrisanim modulom za merenje kapacitivnosti, označen kao *CSM* (engl. *CSM - Capacitive Sensing Module*). Inače, ovaj modul obezbeđuje pouzdan rad, jednostavnost u primeni i malu cenu pošto nema komplikovanih pokretnih delova. Takođe, modul je u potpunosti programski konfigurabilan, a princip rada je prikazan na slici 5.10.

Za potrebe testiranja predloženog senzora projektovana je jednostavna dodatna ploča sa mikrokontrolerom *PIC12F1822* [99], proizvođača *Microchip*, koja je prikazana na slici 5.9. Sa ciljem da se napajanje dodatne ploče u potpunosti kontroliše, iskorišćen je prekidač napajanja u obliku integrisanog rešenja *TPS22929* [93], proizvođača *Texas Instruments*. Na ovaj način napajanje dodatne ploče se programski kontroliše preko mikrokontrolera *MSP430G2553* koji se nalazi na glavnoj ploči.

gde je t_P vreme rasta napona do pozitivnog referentnog napona V_P , t_N vreme opadanja do negativnog referentnog napona V_N , a f je frekvencija izlaznog signala koja se meri brojačem mikrokontrolera. Podužna kapacitivnost kabela je ili kataloški podatak proizvođača ili se može posebno izračunati. U našem slučaju korišćen je kabel sa sledećim vrednostima podužne kapacitivnosti:

$$\begin{aligned} C'_V &= 55.13 \text{ pF/m,} \\ C'_T &= 296.33 \text{ pF/m,} \end{aligned} \quad (5.6)$$

gde je C'_V podužna kapacitivnost kabela u vazduhu, C'_T podužna kapacitivnost u tečnosti. Ukupna kapacitivnost kabela C_{EKV} koja se meri je prikazana izrazom:

$$C_{EKV} = C_0 + L_V \cdot C'_V + L_T \cdot C'_T = C_0 + (L_{UK} - L_T) \cdot C'_V + L_T \cdot C'_T, \quad (5.7)$$

gde je C_0 parazitivna kapacitivnost provodnih linija i konektora, L_V dužina kabela u vazduhu, L_T dužina kabela u vodi i L_{UK} je ukupna dužina kabela. Na osnovu podešenih vrednosti unutar modula za merenje kapacitivnosti i ako se usvoji da t_1 odgovara trenutku kada je dostignut napon V_P , a t_0 odgovara trenutku kada napon dostigne V_N , onda se (5.4) preko relacije (5.5), može prikazati kao:

$$C_{EKV} = \frac{I_K \cdot t_P}{V_P - V_N} = \frac{I_K}{(V_P - V_N) \cdot 2 \cdot f}. \quad (5.8)$$

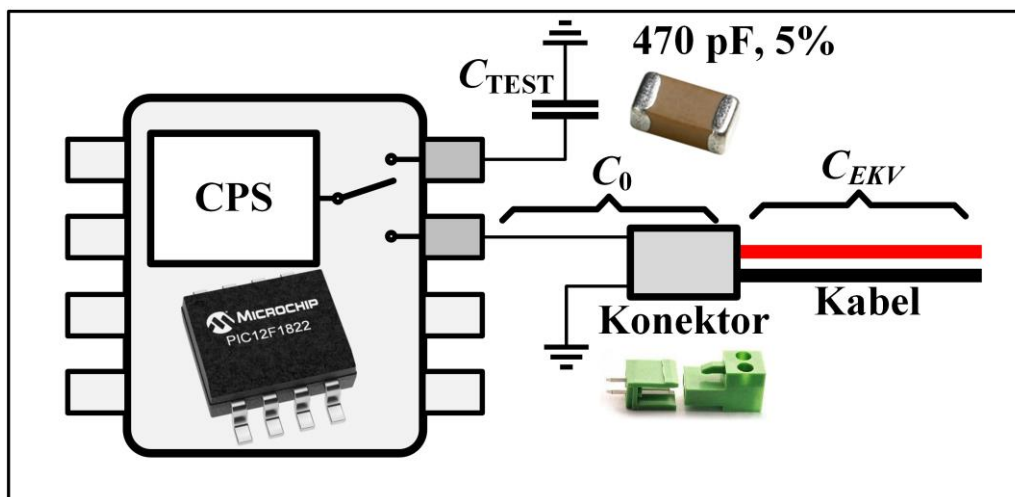
Dužina kabela u tečnosti na osnovu (5.7) se izračunava prema izrazu:

$$L_W = \frac{C_{EKV} - C_0 - L_{UK} \cdot C'_V}{C'_T - C'_V}. \quad (5.9)$$

Vrednost parazitne kapacitivnosti C_0 se izračunava pre nego što se kabel priključi na konektor i u principu može se smatrati da je ova vrednost zajednička za sve čvorove ukoliko se koristi ista dodatna ploča, jer su fizička konstrukcija, elektronske komponente i konektori isti za svaki uređaj. Podužne kapacitivnosti kabela u vazduhu C'_V i vodi C'_T su unapred poznati parametri, kao i ukupna dužina kabela L_{UK} . Dakle, dužina kabela uronjenog u tečnost se izračunava na osnovu merenja ukupne kapacitivnosti kabela C_{EKV} . Ova zavisnost je linearna. Podužna kapacitivnost u tečnosti C'_T zavisi od vrste tečnosti, ali promena nije drastična pa se ona može zanemariti.

Radi eksperimentalne provere principa rada senzora za merenje kapacitivnosti, jedan od ulaznih kanala mikrokontrolera je povezan na komercijalni keramički kondenzator kapacitivnosti 470 pF sa tolerancijom od 5%. Povezivanje je prikazano na slici 5.11.

Programski su podešene vrednosti pozitivnog napona V_P na 2048 mV, vrednost negativnog napona V_N je 640 mV, a struja punjenja kondenzatora I_K je 9 μ A. Podešavanje negativnog napona se vrši korišćenjem internog digitalno-analognog konvertora.



Slika 5.11 Primer povezivanje kapacitivnosti za testiranje i kabela koji predstavlja kapacitivni senzor za merenje nivoa tečnosti

Zamenom ovih vrednosti u(5.8) dobija se sledeći izraz:

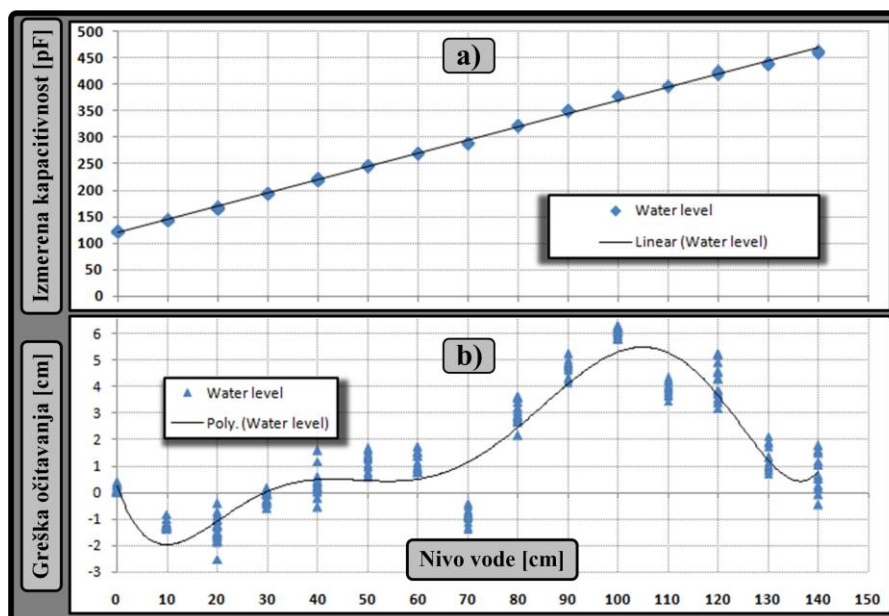
$$C_{EKV} = \frac{3.196 \cdot 10^{-6}}{f} \text{ [F]}, \quad (5.10)$$

gde je f frekvencija izlaznog testerastog signala iz *CSM* modula. Izabrani keramički kondenzator je malih dimenzija i montiran je veoma blizu mikrokontrolera tako da se u ovom slučaju parazitivna kapacitivnost C_0 praktično može zanemariti. Eksperimentalno je dobijena frekvencija od 6885 Hz i na osnovu formule (5.10) dobijena kapacitivnost iznosi 464,2 pF. Ova vrednost odstupa 1,27% od naznačene vrednosti, što je u granicama tolerancije za izabrani kondenzator. Zaključak je da integrisani *CSM* modul mikrokontrolera *PIC12F1822* precizno meri male kapacitivnosti u skladu sa datom analizom.

5.2.3 Testiranje implementiranog senzora nivoa tečnosti

Projektovani čvor je podvrgnut eksperimentalnom ispitivanju u realnim terenskim uslovima. Testirana je upotreba čvora sa senzorom nivoa tečnosti u svrhu praćenja naglih promena, koje su karakteristične za poplave. Kao lokacija eksperimenta je izabrana reka Dunav, jer se odlikuje relativno mirnim tokom, ali ipak ima određeni stepen talasnosti.

Za potrebe eksperimenta izabran je kabl već pomenutih karakteristika datih u (5.6), dužine 200 cm, ali je za merenje nivoa koristi samo 150 cm. Vodostaj Dunava se može smatrati konstantnim tokom eksperimenta. Poplava i povlačenje vode su simulirani uranjanjem i izranjanjem kabela prema tačno definisanim intervalima dužine. Kabl je markiran belom bojom na svakih 10 cm. Za jednu označenu tačku uzeto je 10 vrednosti ukupne kapacitivnosti kabela C_{EKV} . Više merenja obezbeđuje da se usrednjavanjem potire uticaj talasnosti površine vode. Zatim se kabl manuelno uroni ili izroni do sledeće bele tačke i merenje se ponavlja. Na osnovu merenja ukupne kapacitivnosti kabela C_{EKV} i korišćenjem izraza (5.9) računa se vrednost koja predstavlja dužinu kabela uronjenog u vodu. Na slici 5.12 (a) je prikazan grafik očekivanih i izmerenih vrednosti ekvivalentne kapacitivnosti. Može se primetiti da je poklapanje skoro savršeno, kao što je i očekivano, ali da ipak postoje mala odstupanja.

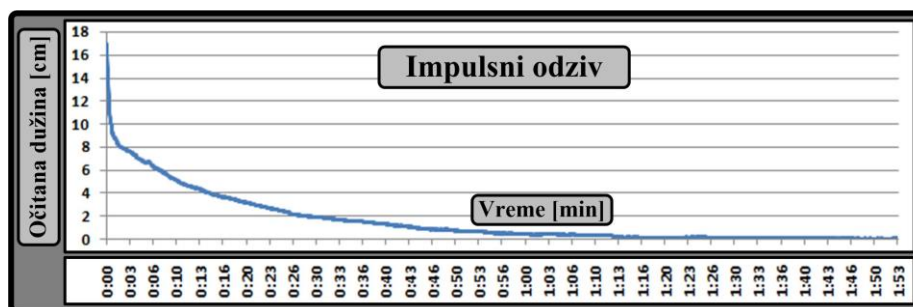


Slika 5.12 a) Poklapanje izmerenih vrednosti kapacitivnosti u odnosu na idealno linearno ponašanje i b) apsolutna greška nastala usled ljudskog faktora i talasnosti površine vode

Vizuelno je obezbeđeno da se kretanje kabela vrši u koracima od po 10 cm, ali usled nesavršenosti procesa spuštanja i talasnosti površine vode, povremeno se javlja greška od nekoliko centimetara. Na slici 5.12 (b) se vidi da je greška veća pri većim dubinama, što se može objasniti ljudskim faktorom zbog složenosti eksperimenta na terenu. Naprednije testiranje projektovanog senzora nije sprovedeno, jer to nije bila tema ove disertacije.

Glavna mana rešenja je prisustvo vremena oporavka prilikom izranjanja kabela iz vode. Pošto je kabel navlažen pojavljuje se lažno očitavanje dubine. Zato je kao poseban eksperiment ispitan impulsni odziv senzora. Ceo kabel je trenutno uronjen i izronjen, a zatim je merena vrednost ukupne ekvivalentne kapacitivnosti kabela. Impulsni odziv je prikazan na slici 5.13.

U realnoj primeni, opisano ponašanje se može javiti samo kada nivo tečnosti jako brzo opadne. Međutim, tokom podizanja nivoa tečnosti, rezultati su pouzdani i tačni, što se kod sistema za detektovanje poplava smatra važnim. Ipak, čak i kada nivo vode naglo opadne, impulsni odziv utiče eksponencijalno i već za manje od jednog minuta dostiže vrednost koja se razlikuje samo za 5% od tačne vrednosti.



Slika 5.13 Odziv senzora kada se nivo vode smanji trenutno u celom opsegu merenja

Prednosti ovog rešenja su jednostavnost, mala cena i jednostavna ugradnja, a mane su relativno spor odziv kada se nivo vode naglo spušta. U realnim primenama nivo vode se ne menja drastično, tako da reakcija senzora ne dolazi u pitanje. Za primene kao što je praćenje nivoa voda kod poplava, daleko opasniji je nagli porast nivoa vode, a tu je reakcija senzora pouzdana i trenutna.

Može se zaključiti da se projektovani čvor pokazao funkcionalnim i sa namenski projektovanim sensorom. Prikazano rešenje pokazuje pristup merenja određenog parametra životne sredine, a u ovom slučaju to je nivo površinskih ili podzemnih voda.

5.3 Karakteristike i mogućnosti unapređenog bežičnog senzorskog čvora

Sa ciljem da se poveća upotrebljivost i fleksibilnost u upotrebi, projektovani čvor je unapređen modularnim rešenjem, gde je svaki podsistem implementiran na posebnoj štampanoj ploči. Ovakav pristup zahteva kompleksnije projektovanje, povećava ukupne dimenzije i cenu čvora, ali zato rešava ograničenja prethodnog rešenja, ali i znatno proširuje ukupne mogućnosti, kako u realnoj primeni, tako i u istraživanju.

5.3.1 Karakteristike unapređenog bežičnog senzorskog čvora

Sa ciljem da se unapređeno rešenje uporedi sa prethodnim, izvršena je fabrikacija koja obezbeđuje istu funkcionalnost, a to je funkcionalnost čvora sa superkondenzatorom kao elementom za skladištenje energije i radio komunikacijom kratkog dometa. Od interesa je posmatrati potrošnju u uspavanom režimu i cenu komponenti na 1000 komada. Cene i potrošnje struje u uspavanom režimu upoređene su u tabeli 5.1.

Tabela 5.1 Poređenje potrošnje u uspavanom režimu i cene ključnih komponenti projektovanog i unapređenog čvora

Prva verzija projektovanog BSC			Unapređena verzija BSC		
Komponenta	Potrošnja u uspavanom stanju	Cena na 1k	Komponenta	Potrošnja u uspavanom stanju	Cena na 1k
MSP430G2553	0.5 μ A	0,95€	PIC24FJ256GB406	650 nA (sa RTC)	3,10€
nRF24L01+	900 nA	1,37€	nRF24L01+ (ploča)	Prekidač napajanja	0,52€
Si7020	60 nA	1,91€	Si7020	60 nA	1,91€
MPL3115	2 μ A	1,52€	Ne postoji		
24LC128T	100 nA	0,42€	24AA02E48	Prekidač napajanja	0,18€
BQ25504	330 nA	2,39€	BQ25504	330 nA	2,39€
DMT334R2S474M3DTA0	5 μ A	3,40€	DMT334R2S474M3DTA0	5 μ A	3,40€
A5887		0,60€	Ne postoji		
Solarni panel		1,00€	Solarni panel		1,00€
Ne postoji			REF3020	0 μ A	0,60€
Ne postoji			3 x TPS22929 (prekidač)	3 x 0,2 μ A	0,72€
Ne postoji			SST25VF016B	Prekidač napajanja	1,20€
Ne postoji			Li baterija CR2032	20 godina	0,30€

Kao i prilikom prve analize, na sumu ključnih komponenti treba dodati cenu pasivnih komponenti, koja je u ovom slučaju malo veća i iznosi oko 3,5 evra. Izrada štampane ploče je

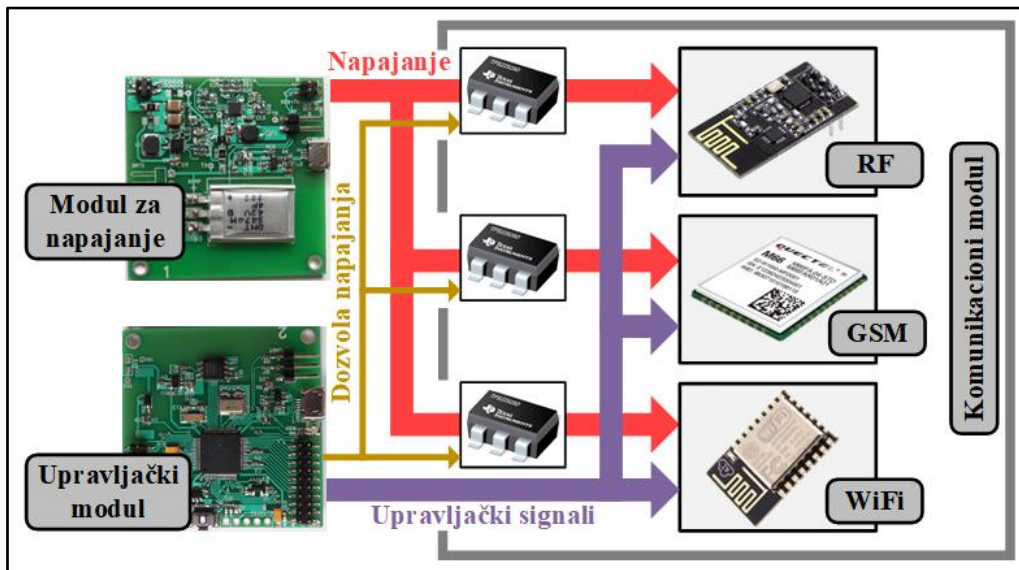
oko 0,5 evra, kao i lemljenje, ali sada u okviru čvora postoje ukupno tri štampane ploče, ne računajući dodatnu štampanu ploču za senzore. Planirano kućište je malo većih dimenzija, jer je sada čvor sastavljen od ukupno četiri štampane ploče, ali se može smatrati da je cena po kućištu ista i iznosi oko 3,5 evra. Ukupna cena unapređenog čvora iznosi oko 25 evra, što je svega 5 evra više od prve verzije, i to je relativno mala cena u odnosu na dodatne mogućnosti uređaja. Naravno ova cena se može umanjiti ukoliko se ne koriste sve elektronske komponente predviđene projektom, što naravno zavisi od planirane primene. Na primer, komponenta *REF3020* [100], proizvođača *Texas Instruments*, predstavlja integrisanu stabilnu referencu napona koja se koristi za analogne senzore. Ukoliko se ne koriste analogni senzori u primeni, ova komponenta je suvišna i može se izbaciti u toku fabrikacije. Slično važi za fleš memoriju *SST25VF016B* [101], proizvođača *Microchip*, ukoliko opcija ažuriranja firmvera na daljinu nije neophodna.

U pogledu potrošnje, unapređeni čvor ima neznatno manju potrošnju u uspavanom režimu koja se kreće oko $6,5 \mu\text{A}$. Potrošnja u uspavanom režimu je od izuzetne važnosti u pogledu održivosti napajanja zasnovanog na superkondenzatoru kao elementu za skladištenje energije. Potrošnja u aktivnom režimu se može kontrolisati od strane mikrokontrolera u zavisnosti od raspoložive energije. Upravo iz ovih razloga su na upravljačkoj ploči dodata dva, a na komunikacionoj još tri integrisana prekidača napajanja *TPS22929*, koji imaju veoma malu sopstvenu potrošnju i omogućavaju da mikrokontroler u potpunosti kontroliše potrošnju. Jedan prekidač se koristi za *EEPROM* i integrisani senzor temperature i vlažnosti, a drugi za fleš memoriju. Ovakav način projektovanja, gde se integrisanim prekidačim upravlja napajanjem, omogućava da se potrošnja u uspavanom režimu dodatno smanji.

Na primer, fleš memorija se odlikuje relativno malom potrošnjom u uspavanom režimu od tipično $5 \mu\text{A}$. Ova vrednost struje se smatra veoma malom za većinu komercijalnih uređaja koji koriste ovu komponentu. Međutim, potrošnja od $5 \mu\text{A}$ za projektovani čvor predstavlja znatnu potrošnju koja može da utiče na njegovu održivost u energetskom smislu. Dodavanjem integrisane komponente preko koje mikrokontroler upravlja napajanjem fleš memorije, potrošnja se smanjuje sa $5 \mu\text{A}$ na $0,2 \mu\text{A}$, što predstavlja veliki pomak u uštedi energije. Slična ušteda se ostvaruje kod *EEPROM* memorije i senzora za temperaturu i vlažnost. Takođe, mikrokontroler preko integrisanih prekidača kontroliše napajanje prema komunikacionom modulu. Na slici 5.14 se vidi blok šema komunikacionog modula i način upravljanja napajanjem.

Komunikacioni modul podržava tri načina prenosa podataka, kratkodometna komunikacija bazirana na *nRF24L01*, *GSM* i *WiFi* komunikacija. U realnoj upotrebi na modulu fizički ne moraju biti prisutni svi načini komunikacije. Ukoliko se ceo uređaj koristi kao bežični senzorski čvor, koristi se samo kratkodometna komunikacija. Pristupni čvor sem kratkodometne, sadrži *GSM* i/ili *WiFi* komunikaciju. Samostalna merna stanica podržava samo *GSM* komunikaciju. Dakle, mogućnosti uređaja se vrlo lako mogu menjati u zavisnosti od primene. Napajanje se dovodi sa modula za prikupljanje energije iz okoline do integrisanih prekidača *TPS22929*. Mikrokontroler na upravljačkom modulu kontroliše izbor aktivne komunikacije u datom trenutku. Ukoliko je uređaj u uspavanom stanju, svi integrisani prekidači

su neaktivni, tako da se potrošnja komunikacionog modula zamenjuje potrošnjom neaktivnih integrisanih prekidača, a to je $0,2 \mu\text{A}$.



5.14 Blok šema komunikacionog modula sa opisom načina upravljanja napajanjem

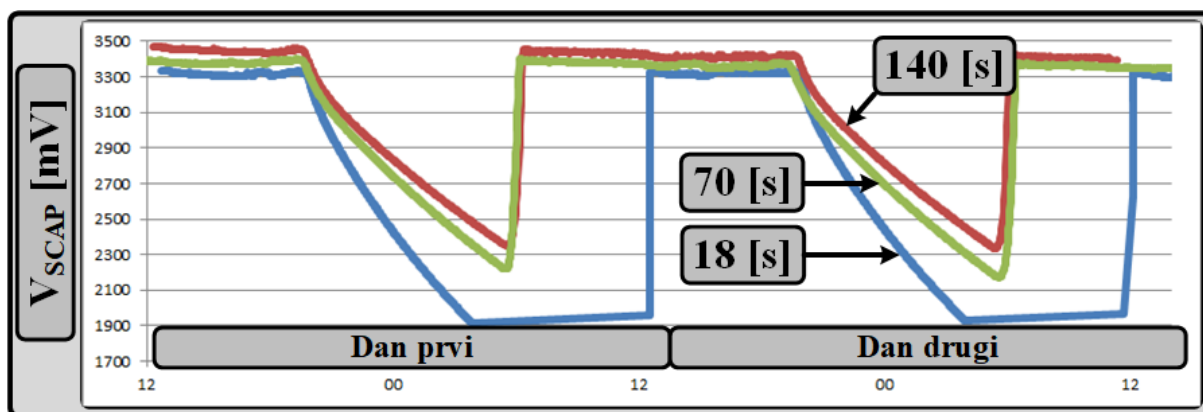
Unapređeni čvor ima mogućnost dodavanja minijaturne CR2032 litijumske baterije koja se koristi za napajanje RTC modula u okviru mikrokontrolera. Na ovaj način se postiže da čvor sadrži informacije o proteklom vremenu, bez obzira da li je napajanje iz superkondenzatora dostupno ili ne. Trajanje baterije za ovu primenu je tipično do 20 godina, tako da se može smatrati da nema troškova održavanja usled zamene. Naravno, za određene primene ovo može predstavljati dodatnu opciju.

Može se zaključiti da unapređeni čvor predstavlja mnogo kvalitetnije i upotrebljivije rešenje u odnosu na prvu verziju. Kvalitet se ogleda u manjoj potrošnji, većim mogućnostima u upravljanju energijom, veći je i broj intefejsa, ulaza i izlaza i drugih specijalnih mogućnosti. Modularnost omogućava znatno širu primenu. Sve ove pogodnosti su dobijene za cenu od 5 evra više u odnosu na prvu verziju.

5.3.2 Ponašanje unapređenog čvora u normalnom radu

U pogledu primene za praćenje parametara životne sredine, izvršeni su isti eksperimenti kao kod projektovanog čvora koji se odnose na proveru održivosti fotonaponske ćelije kao prikupljača energije iz okoline i superkondenzatora kao elementa za skladištenje energije.

Za potrebe eksperimenata, unapređeni uređaj je konfigurisan kao čvor sa sličnim karakteristikama kao prva projektovana verzije. Podsystem za napajanje koji koristi sunčevu energiju i superkondenzator je u potpunosti isti. Zato je eksperiment, čija je postavka opisana slikom 5.1, pokazao slične rezultate na osnovu kojih se dolazi do istog zaključka, da je energija napunjenog superkondenzatora dovoljna za funkcionisanje čvora do sledećeg ciklusa punjenja i da se može računati na slanje podataka u toku noći, ali samo do određene učestanosti i uz konstantno praćenje raspoložive energije.



Slika 5.15 Promena napona na superkondenzatoru (V_{SCAP}) DMT334R2S474M3DTA0 u toku perioda od dva dana, za unapređeni čvor, za različite intervale slanja podataka

Eksperiment opisan postavkom sa slike 5.4 je pokazao da se na dnevnoj svetlosti, bez obzira na vremenske uslove, superkondenzator relativno brzo napuni energijom. Takođe, u toku dana, može se smatrati da je superkondenzator konstantno napunjen, što se može iskoristiti ili za učestalije slanje podataka ili za napajanje senzora sa većom potrošnjom.

Ponovo je sproveden eksperiment sa slike 5.6, ali u ovom slučaju za različite frekvencije slanja podataka. Cilj eksperimenta je da se utvrdi donja granica funkcionalnosti čvora. Rezultati se mogu videti na slici 5.15. Eksperimentalno je utvrđeno da se donja granica funkcionalnosti postiže ako se podaci šalju svakih 18 sekundi [90]. Ukoliko se podaci šalju češće može se desiti da u toku noći čvor ostane bez energije i prestane sa radom. Naravno, ukoliko je učestanost slanja podataka znatno manja, podiže se prag sigurnosti normalnog funkcionisanja čvora. Treba napomenuti da je frekvencija slanja podataka bila ista tokom 24 časa i da se mnogo veća sigurnost u napajanju može postići smanjivanjem učestanosti slanja podataka u toku noći, ukoliko dostupna energija opadne ispod određene granice.

Na osnovu eksperimenata sprovedenim nad unapređenim čvorom, može se zaključiti da kombinacija fotonaponske ćelije i superkondenzatora predstavlja održivo rešenje sa stanovišta neprekidnog napajanja, kao što je i pokazano eksperimentima nad projektovanim čvorom.

5.3.3 Potencijalne mogućnosti unapređenog čvora u budućem radu i primeni

Početna motivacija da se BSM-e u okviru definisanih zahteva koriste za praćenje parametara životne sredine je ostvarena jednostavnom, minijaturnom i pre svega jeftinom realizacijom samonapajajućeg čvora. U cilju proširivanja mogućnosti i rešavanjem uočenih ograničenja u primeni, projektovan je unapređeni čvor. Međutim, deo motivacije za unapređenjem je uslovljen i potencijalnim budućim primenama u istraživanju. Upravo je modularna struktura čvora pogodna za ovu primenu.

Veliki broj aktuelnih istraživanja su usmerena na moguće načine prikupljanja energije iz okoline. Sa slike 3.5 se vidi jedan deo mogućih izvora energije iz okoline. Neki od primera su prikupljanje energije radio talasa [102], [103], energije vetra [104], energije toplote [105], energije koju generiše čovek [106], pa čak i energije koju generišu biljke [107], [108]. Posebna istraživanja se sprovode u domenu korišćenja energije gubitaka ili oduzimanjem dela energije

(engl. *Energy Scavenging*), kao što su na primer korišćenje energije vibracija mašina [109], uzimanje energije od provodnih linija dalekovoda posredstvom elektromagnetnog polja [110] ili prikupljanje energije koju stvara ljudsko telo [111]. Bilo da je u pitanju optimizovanje izvlačenja ili testiranje novog načina energije iz okoline, unapređeni čvor se lako može iskoristiti upravo zbog pomenute modularnosti. Modul za prikupljanje energije se može menjati prema potrebi, dok upravljački, komunikacioni i senzorski sistem ostaju nepromenjeni, što olakšava i ubrzava razvoj i testiranje.

Unapređeni čvor je pogodan za istraživanje novih načina komunikacije i novih protokola rutiranja. Na primer, modul za komunikaciju se može zameniti nekim od aktuelnih modula za komunikaciju velikog dometa i male potrošnje (engl. *LPWAN – Low Power Wide-Area Network*), kao što je na primer sve popularnija *LoRa*. Takođe, ukoliko se na komunikacioni modul instalira modul koji podržava bežične standarde četvrte generacije (*4G*) kao što je *NB-IoT* (engl. *NB-IoT – Narrow Band Internet-of-Things*), dobija se rešenje koje koristi infrastrukturu mobilnih operatera.

Ranije je opisan primer testiranja senzora za merenje nivoa tečnosti. Sličnom metodologijom se mogu testirati bilo koji netipični senzori, razvojem samo podsistema za obradu signala sa senzora, dok ostali podsistemi ostaju isti. U istraživačkom smislu, unapređeni čvor praktično predstavlja platformu pogodnu za veliki broj različitih primena i istraživanja iz raznih oblasti.

6. Diskusija

U ovom poglavlju prikazana je diskusija rezultata dobijenih u okviru istraživanja vezanih za ovu doktorsku disertaciju.

Usled nedovoljno sredstava, bežične senzorske mreže se veoma malo koriste za praćenje parametara životne sredine. Kako bi razumeli i zaštitili životnu sredinu neophodno je prikupiti veliku količinu informacija, tj. potrebno je pratiti veliki broj relevantnih parametara u dugom vremenskom periodu od nekoliko godina, pa do nekoliko decenija. Baterijski napajane bežične senzorske mreže nisu povoljne za ovu svrhu, jer zahtevaju konstantno održavanje, najčešće usled zamene baterija, a neophodno je ponekad da rade u nepristupačnim i opasnim terenima i sredinama pod uticajem hazardnih supstanci. Zato je u ovoj disertaciji projektovan namenski senzorski čvora za potrebe praćenja isključivo parametara životne sredine.

Projektovane su dve štampane ploče, glavna, na kojoj se nalaze podsistem za napajanje, upravljanje i komunikaciju, i dodatna ploča za proširivanje funkcionalnosti na kojoj se nalazi senzorski podsistem. Obe ploče su dimenzija 4,8 cm × 4,8 cm, tako da se uklapaju u planirano kućište u obliku kocke, slično po obliku onom prikazanom na slici 4.23. Projektovani bežični senzorski čvor se smatra kvalitetnim rešenjem za primenu u praćenju parametara životne sredine, jer:

- ima malu osnovnu cenu (od 15 do 20 evra, u zavisnosti od primene),
- malu sopstvenu potrošnju (u opsegu od 6 do 9 μ A),
- mogućnost proširivanja funkcionalnosti i primene korišćenjem dodatne senzorske štampane ploče,
- koristi slobodni spektra frekvencija na 2,4 GHz za komunikaciju (slanje podataka),
- zahteva male dimenzije kućišta (koskasto kućište 6 cm × 6 cm × 6 cm je maksimalna veličina),
- koristi samoodrživo napajanje (kombinacija fotonaponska ćelija i superkondenzator),
- ima dug životni vek, preko deset godina (koji proizilazi iz dugog životnog veka superkondenzatora kao elementa za skladištenje energije),
- lako se instalira na terenu (usled malih dimenzija),
- podržava rad i širokom temperaturnom opsegu (industrijski opseg od -40°C do +85°C),
- ima minimalan uticaj na životnu sredinu (sastavni elementi i elektronske komponente nisu štetne, tokom ugradnje vrlo mali prostor sredine se uništava), i
- drastično smanjuje troškove održavanja (nema zamena baterija na terenu).

Osnovna prednost projektovanog čvora je cena, koja je drastično niža u odnosu na slične komercijalne bežične senzorske čvorove, kao na primer prikazane u [55]. U odnosu na čvorove koje nudi proizvođač Libelium [86], cena je manja i preko 50 puta. Treba napomenuti da komercijalni čvorovi zbog svoje univerzalne namene nisu spremni za praćenje parametara sredine i da zahtevaju značajna sredstva za dodatnu opremu (kućište, baterije, dodatne prilagodne štampane ploče i dr.). Projektovani čvor je rešenje koje se trenutno može iskoristiti za ugradnju na terenu i to sve za cenu od oko 20 evra. Naravno, cena ukupnog rešenja zavisi od cene korišćenih komercijalnih senzora, ali ista zavisnost važi i za bilo koji drugi bežični senzorski čvor.

Niska cena čvora je postignuta pažljivim izborom ključnih komponenti koje za minimalnu cenu garantuju željenu funkcionalnost. Ovde se pre svega misli na izbor mikrokontrolera i integrisanog rešenja za radio komunikaciju. Na smanjivanje cene utiču i drugi faktori kao što su, korišćenje elektronskih komponenti malih dimenzija, jednostavnost u dizajnu i namensko projektovanje u odnosu na konačnu primenu.

Osim cene, projektovani čvor se odlukuje veoma malom potrošnjom. Na primer, potrošnja čvora u uspavanom stanju se kreće u opsegu od 6 do 9 μA , što je slično ili bolje od komercijalnih rešenja datih u [55] i sličnih namenskih rešenja datih u [25], [68], [69], [71], [72]. U svakom slučaju, predloženo rešenje sa veoma malom potrošnjom energije je izuzetno pogodno za primenu kod BSM-a.

Još jedna prednost predloženog čvora je modularnost senzorskog podsistema. Proširivanje i menjanje funkcionalnosti projektovanog čvora se ostvaruje preko dodatne ploče, koja se preko posebnog konektora povezuje na glavnu ploču. Dodatna ploča može da sadrži posebna elektronska kola za obradu, prilagođavanje i upravljanje različitim tipovima senzora. Ovakav pristup osigurava da glavni mikrokontroler upravlja tokom energije, i da se trenutna verzija firmvera vrlo lako prilagođava, što štedi vreme u razvoju za konkretnu primenu.

Minijaturan dizajn je jedna od glavnih prednosti projektovanog čvora, posebno u poređenju sa sličnim rešenjima datim u [25], [68], [69], [71], [72]. Velika ušteda u prostoru je ostvarena namenskim dizajnom, ali i pre svega optimalnim izborom ključnih komponenti. Na primer, korišćen je superkondenzator kapacitivnosti 0,47 F, dok slična rešenja koriste superkondenzatore od 22 F [25], 100 F [68], 2×22 F [112], 2×100 F [71], a prethodno je napomenuto da dimenzije superkondenzatora rastu linearno sa kapacitivnošću. Takođe, veličina solarnog panela je 6 cm \times 6 cm, odnosno maksimalne snage od 300 mW, što je manje od panela snage od 450 mW koji koriste rešenja u [68], [69], [71]. Male dimenzije čvora omogućavaju ugradnju u malo kućište, koje je jeftinije u odnosu na prikazano na slici 3.20 [71]. Kao konačan proizvod, bežični senzorski čvor ima oblik kocke sa stranicom od 6 cm. U poređenju sa sličnim rešenjima, kao što je čvor prikazan na slici 3.20 [71], dimenzije su mu nekoliko puta manje. Slično, čvor prikazan na slici 3.22 [72] ima ukupne dimenzije od 7,4 cm \times 3,4 cm \times 1,5 cm, ali bez dodatne senzorske štampane ploče i kućišta, što je opet više u odnosu na štampanu ploču projektovanog čvora sa slike 4.26, koji ima dimenzije 4,8 cm \times 4,8 cm \times 0,4 cm.

Glavni doprinos u disertaciji postignut je projektovanjem napajanja za bežični senzorski čvor koje se bazira na prikupljanju energije iz okoline. Pošto primarne i sekundarne baterije imaju ograničen vek trajanja, a postupak praćenja pojedinih parametara sredine može da traje i više od decenije, potrebno je na neki drugi način povećati životni vek mreže. Kao alternativa baterijama, posebno za primenu u terenskim uslovima, sve više se koristi proces prikupljanja energije iz okoline. Čvor preko različitih elemenata, koji se nazivaju prikupljači, prikuplja raspoloživu energiju iz okoline kao što je energija Sunca, vetra, vodenih tokova, vibracija, toplote itd.

Kod projektovanog čvora kao prikupljač se koristi fotonaponska ćelija sa naponom i strujom u tački maksimalne snage od 2 V i 150 mA, respektivno. Dakle, sa ukupne površine od 36 cm² prema katalogskim podacima se generiše, pri maksimalnom osvetljaju Sunca, snaga od 300 mW, što je za većinu komercijalnih čvorova više nego dovoljno (ako se pretpostavi da pri bežičnom slanju podataka maksimalna struja čvora dostiže do 30mA, i pri naponu od 3,0 V prema (3.1) dobija se da je neophodna snaga oko 90 mW). Snagu od 90 mW može da generiše i fotonaponska ćelija površine 6 cm² pri maksimalnom sunčevom osvetljaju. Pošto se u svakom trenutku ne može računati na maksimalnu snagu sunčevog osvetljenja, pre svega usled ciklusa dana i noći, a zatim i zbog oblačnosti i sl., izabrana je predimenzionisana fotonaponska ćelija ukupne površine 36 cm² (6 cm x 6 cm).

Usled promenljivih vremenskih uslova, u praksi je složeno odrediti optimalne dimenzije fotonaponske ćelije. U radu [72] je pokazano da fotonaponska ćelija dimenzija 2,2 cm × 3,5 cm uspešno snabdeva energijom bežični senzorski čvor. Ipak, u primeni na terenu mogu se očekivati nepoželjni uticaji, kao što su zaprljanost panela prašinom, pojačana senka usled vegetacije i prirodnih objekata, promena ugla Sunca usled promene nagiba Zemlje i sl. Zato je predimenzionisanost opravdana u ovom slučaju, a dodatni razlog je i vrlo mala cena panela od svega pola evra po fotonaponskoj ćeliji.

Zbog prirode izvora energije iz okoline, koji su često nepredvidivi, nekontrolisani i generišu malu snagu, nije moguće naći optimalno rešenje za konstantno napajanje čvorova. Zato je neophodno korišćenje elemenata za skladištenje prikupljene energije iz okoline, kao što su punjive baterije ili superkondenzatori, ili njihova kombinacija. Korišćenjem punjivih baterija i energije iz okoline, čvor postaje samonapajajući uređaj čiji je životni vek produžen, što je od interesa kod praćenja parametara sredine. Međutim, pre svega zbog ograničenog broja ciklusa punjenja, ali i zbog mogućeg štetnog uticaja na sredinu i zavisnosti karakteristika od temperaturnih varijacija sredine, punjive baterije nisu dobro rešenje. Zato je u disertaciji razmotrena upotreba superkondenzatora. Za primenu čvorova u oblasti praćenja parametara životne sredine, korišćenje superkondenzatora donosi mnoge prednosti, kao što su veliki broj ciklusa punjenja, širi temperaturni opseg korišćenja i znatno duži vek trajanja. Time se postiže i da je životni vek čvora drastično produžen, do nivoa da u toku eksploatacije nije potrebno nikakvo održavanje sistema za napajanje.

Izabrani superkondenzator *DMT334R2S474M3DTA0* je optimalan za predviđenu primenu. Ima planarni oblik koji omogućava da se štampana ploča ne širi u pravcu visine, što je nepovoljna karakteristika standardnih superkondenzatora valjkastog oblika. Vizuelna razlika u

povećanju ukupnih dimenzija je prikazana na slici 4.6. Ovo je generalno mana čvorova prikazanim na slikama 3.16, 3.19, 3.20 i 3.22, jer koriste valjkasti kondenzator koji drastično povećava dimenzije čvora. U poređenju sa komercijalnim superkondenzatorom valjkastog oblika *SCMQ14D474MRBB0* [113], koji ima istu kapacitivnost, njegova visina je 14 mm, što je četiri puta više nego izabrani superkondenzator. Osim toga, zbog boljeg zaptivanja, vremena isušivanja i starenja su mnogo duža, čak i u odnosu na slične superkondenzatore, pa je vek trajanja čak do 15 godina.

Pošto je čvor namenjen za praćenje parametara životne sredine, pri projektovanju je bilo važno obezbediti da što manje na nju utiče. Uticaj čvora na životnu sredinu se može prikazati na dva načina. Prvi, koriste se komponente i materijali čiji uticaj je minimalan u pogledu kontaminacije životne sredine u slučaju nenamernog gubitka čvora u toku rada. Ovde se pre svega uočava razlika uticaja superkondenzatora u odnosu na rešenja koja koriste baterije napravljene od teških metala, koji su zagađujuće materije. Materijali korišćeni za izradu superkondenzatora imaju daleko manji štetni uticaj na sredinu ukoliko se nenamerno izgube. Drugi povoljan uticaj projektovanog čvora na životnu sredinu se ogleda kroz njegovu minijaturnu prirodu, štedi se materijal, kako za izradu hardvera i kućišta, tako i za njegovu instalaciju na terenu. Zatim, dolazi do smanjenog remećenja životne sredine, jer je potreban manji fizički prostor za instalaciju čvora.

Da bi se ispitala pouzdanost rada projektovanog čvora, izvršena su testiranja održivosti napajanja zasnovanog na kombinaciji fotonaponske ćelije i superkondenzatora. Merenje vremena pražnjenja superkondenzatora, bez prisustva solarnog panela, pokazalo je da trajanje energije zavisi od učestanosti slanja podataka, kao što se i očekivalo. Ustanovljeno je da pri učestanosti slanja od jednom u 10 sekundi, pražnjenje superkondenzatora od 3,53 V do 2,20 V traje skoro 12 sati, što je granični slučaj održivosti napajanja. Dakle, pouzdan rad se može garantovati za sve manje učestanosti komunikacije. Generalno, parametri životne sredine su sporopromenljivi i nije kritično da izabrana učestanost ima ovakvu vrednost. Naravno, za primene u kojima bi trebalo učestalije pratiti parametre, moguće rešenje bi bilo da se koristi superkondenzator od 1 F, koji je nešto većih dimenzija (tabela 4.1).

Izvršeno je i merenje punjenja superkondenzatora u različitim delovima dana i pri različitim vremenskim uslovima. U podne, pri maksimalnom intezitetu sunčeve svetlosti, superkondenzator se napuni za oko 20 sekundi, a pred zalazak Sunca, pri oblačnom vremenu, punjenje traje oko 240 sekundi. Dakle, može se zaključiti da će u roku od nekoliko minuta superkondenzator biti sigurno napunjen. Takođe, može se smatrati da je superkondenzator u toku dana konstantno napunjen na 3,53 V pri normalnom režimu rada čvora. Višak energije u ovom slučaju se može iskoristiti za povećanje učestanosti merenja i slanja podataka ili za napajanje senzora koji zahtevaju više energije.

U okviru sledećeg testiranja ispitan je rad čvora u intervalu od 48 sati. Pri učestanosti slanja podataka jednom u minuti, pokazano je da čvor ne gubi funkcionalnost ni u jednom trenutku. Osim toga, rezultati su potvrdili da je u toku dana superkondenzator konstantno napunjen. Generalni zaključak je da kombinacija solarnog panela i superkondenzatora predstavlja održivo rešenje za napajanje čvora, ali uz konstantno praćenje raspoložive energije,

naročito u toku noći. Glavna prednost u odnosu na rešenja opisana u odeljku 3.6 je korišćenje daleko manje vrednosti kapacitivnosti superkondenzatora, od samo 0,47 F, bez gubljenja funkcionalnosti, dok čvor iz [72] kao najpribližnije rešenje, koristi 1,5 F, što je tri puta više.

Za potrebe testiranja projektovanog čvora u praćenju parametara životne sredine, projektovane su dve dodatne senzorske ploče. Na prvoj su se koristila dva tipa komercijalnih senzora za ozon, jedan sa malom (*O3-B4*), a drugi sa značajnom potrošnjom (*MiCS-2610*). Rezultati testiranja su pokazali održivost napajanja u toku celog dana za senzor sa malom potrošnjom, dok je operativnost drugog senzora moguća samo u toku obdanice. Zaključak je da ukoliko je praćenje pomenutih parametara prihvatljivo samo u toku obdanice, projektovani čvor se može koristiti i u tom slučaju.

Na drugoj dodatnoj senzorskoj ploči je dodat kapacitivni senzor merenja nivoa tečnosti, koji je nastao u toku ranijih istraživanja. Kapacitivni senzor, napravljen od dvožilnog kabela, se karakteriše jednostavnošću, niskom cenom i jednostavnom ugradnjom na terenu. Rezultati merenja su pokazali dobro slaganje sa teorijskim modelom. Testiranje je pokazalo da se čvor može lako i jednostavno prilagoditi za različita merenja, kao i za testiranje novih senzora.

Projektovani čvor nije testiran u okviru realne bežične senzorske mreže, jer to nije bila tema ove disertacije, ali se ipak mogu izneti određena predviđanja i zaključci. Jasno je da bežična senzorska mreža podrazumeva kooperaciju između čvorova, a ona je u najvećoj meri ograničena dostupnom energijom. Za razliku baterijski napajanih bežičnih senzorskih mreža koje imaju ograničen kapacitet energije, mreže zasnovane na projektovanim čvorovima imaju više energije na raspolaganju, mogu da razmenjuju više podataka i da koriste napredne protokole rutiranja. Naravno, ovo važi samo u toku dana, dok su noću mogućnosti ograničene. U svakom slučaju, upravljanje energijom i protokoli rutiranja u okviru samonapajajuće bežične senzorske mreže biće predmet budućih istraživanja.

U toku projektovanja i testiranja, uočena su određena ograničenja čvora. Zato je u toku istraživanja projektovan unapređeni, modularni čvor. Po nešto većoj ceni od samo 5 evra, dobijena je ista funkcionalnost kao i u prvom slučaju, ali sa znatno većim mogućnostima, upravljačkim, procesorskim i funkcionalnim. Novo rešenje se sastoji od modula za svaki podsistem čvora. Posebno je unapređen komunikacioni sistem sa *GSM* i *WiFi* modulima, tako da uređaj, osim kao čvor, može da se koristi i kao merna stanica i pristupni čvor. Mogućnost zamene modula pruža napredno proširivanje načina primene, ali predstavlja i univerzalnu platformu za razne primene u oblasti prikupljanja energije iz sredine, upravljanje energijom, protokolima za rutiranje, testiranja različitih komunikacionih protokola i ispitivanja novih senzora u realnim terenskim uslovima.

Konačno, ukoliko bismo uporedili projektovano rešenje sa sličnim primerima iz naučne literature i komercijalnim rešenjima, generalni zaključak je da predloženi samonapajajući bežični senzorski čvor ima manju cenu, dimenzije i uticaj na životnu sredinu, što je pre svega postignuto namenskim projektovanjem i optimalnim izborom elektronskih komponenti.

7. Zaključak

Nakon dugogodišnjeg istraživanja upotrebe telemetrije u oblasti zaštite životne sredine, gde se uglavnom koristila GSM tehnologija i senzori za merenje koncentracije gasova, uočen je potencijal bežičnih senzorskih mreža u praćenju parametara životne sredine. Međutim, pre svega zbog nedostatka ekonomskih sredstava, neisplativosti ulaganja, a i zbog karakterističnih uslova primene u teškim terenskim uslovima, vrlo malo istraživanja i komercijalnih rešenja pokriva ovu oblast. Zato je u ovoj disertaciji izvršeno istraživanje čiji je rezultat projektovanje bežičnog senzorskog čvora za praćenje parametara životne sredine.

Čvor je projektovan u skladu sa zahtevima za niskom cenom, povećanom robusnošću, multifunkcionalnošću i minimalnim uticajem na životnu sredinu, a postignuto je povećanje životnog veka bežičnog senzorskog čvora i smanjeni su troškovi održavanja. Proučavanjem naučne literature i u toku istraživanja, kao pogodno rešenje za ostvarivanje ovih zahteva izabran je proces prikupljanja sunčeve energije kao dugoročno rešenje za napajanje čvorova. Solarna energija, opšteprisutna i dostupna, savršeno se uklapa kao izvor energije za korišćenje u oblasti životne sredine. Izabrana fotonaponska ćelija veličine samo $6\text{ cm} \times 6\text{ cm}$, snage $0,3\text{ W}$ generiše dovoljno energije za napajanje bežičnog senzorskog čvora. Prekidna priroda sunčeve energije zahteva da se prikupljena energija uskladišti u cilju obezbeđivanja funkcionalnosti čvora tokom celog dana. Sa ciljem da se poveća životni vek čvora, smanje troškovi održavanja i uticaja na životnu sredinu, izabran je superkondenzator kao element za skladištenje energije, elektronska komponenta sa mnogo dužim vekom trajanja u odnosu na punjive baterije, većom temperaturnom robusnošću i ekološki prihvatljivom strukturom na bazi ugljenika.

U aktuelnim naučnim istraživanjima se koriste superkondenzatori velikih vrednosti kapacitivnosti, reda nekoliko desetina farada, kako bi se obezbedilo da čvor ima slični energetske potencijal kao čvor napajan baterijom. Na osnovu tipične potrošnje čvora, iz grupe komercijalnih superkondenzatora, izabran je odgovarajući za predloženu primenu, čija je kapacitivnost samo $0,47\text{ F}$, dok čvor iz [72] kao najpribližnije rešenje, koristi $1,5\text{ F}$, što je tri puta više. Projektovani čvor je podvrgnut testiranjima u cilju dokazivanja održivosti napajanja čvora. Jedno testiranje je pokazalo da se superkondenzator napuni za oko 20 sekundi, pri maksimalnom osvetljaju, a pri oblačnom vremenu za oko 240 sekundi, tako da se može smatrati da kombinacija fotonaponske ćelije i superkondenzatora predstavlja konstantan izvor energije za napajanje čvora. Rezultati su pokazali da je rešenje održivo, ako je učestanost slanja podataka manja od jednom u 10 sekundi. Ipak, u toku noći je neophodno i „pametno“ upravljanje energijom kako bi čvor ostao funkcionalan do sledećeg ciklusa punjenja. Zaključeno je da u toku dana čvor ima bolje karakteristike u odnosu na baterijske napajane čvorove, jer mogu da obezbede veću vršnu snagu od preko 1000 W/kg , što je znatno veće u odnosu na litijum jonske baterije ($50\text{-}300\text{ W/kg}$). Zatim, zato što superkondenzator podržava veliki broj ciklusa punjenja, preko 500.000 , životni vek čvora je znatno produžen, dok se

punjive baterije karakterišu sa samo 1000 ciklusa punjenja. Kao posledica dugog veka trajanja supekondenzatora, od preko 10 godina, troškovi održavanja usled zamene baterija se eliminišu u potpunosti. Kao rezultat istraživanja u ovoj oblasti objavljen je radu u časopisu kategorije M23:

- Živorad Mihajlović, Vladimir Milosavljević, Ana Joža, Vladimir Rajs, Mirjana Damjanović, Miloš Živanov, „Surface and Underground Water Level Monitoring Using Wireless Sensor Node with Energy Harvesting Support“, Elektronika Ir Elektrotehnika, 2016, Vol. 22, No 5, pp. 62-68, ISSN 1392-1215,

kao i saopštenja na međunarodnim konferencijama kategorije M33:

- Živorad Mihajlović, Ana Joža, Vladimir Milosavljević, Vladimir Rajs, Miloš Živanov, „Energy Harvesting Wireless Sensor Node for Monitoring of Surface Water“, 21. International Conference on Automation and Computing (ICAC), Glasgow: University of Strathclyde, Glasgow, UK, 11-12 Septembar, 2015, pp. 102-107, ISBN 978-0-9926801-0-7.
- Živorad Mihajlović, Vladimir Milosavljević, Dragana Vasiljević, Ana Joža, Vladimir Rajs, Miloš Živanov, „Implementation of Wearable Energy Harvesting Wireless Sensor Node using Ink-Jet Printing on Flexible Substrate“, 5. Mediterranean Conference on Embedded Computing - MECO, Bar: University of Montenegro, 12-16 Jun, 2016, pp. 100-103, ISBN 978-9940-9436-6-0.
- Živorad Mihajlović, Vladimir Milosavljević, Ana Joža, Mirjana Damjanović, „Modular WSN Node for Environmental Monitoring with Energy Harvesting Support“, 2. IEEE Zooming Innovation in Consumer Electronics International Conference - ZINC, Novi Sad: RT-RK Institute for Computer Based Systems, 31-1 Jun, 2017, pp. 47-50, ISBN 978-1-5386-0865-4.
- Juhas Đorđe, Vladimir Rajs, Živorad Mihajlović, „Pametni nosivi uređaj sa prikupljanjem energije iz okoline za praćenje parametara u okruženju korisnika“, Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, 2016, No 15/2016, pp. 3121-3124, ISSN 0350-428X.

U disertaciji je na nekoliko reprezentativnih primera pokazano da se projektovani čvor lako prilagođava praćenju različitih parametara sredine. Rezultati testiranja su pokazali da je na projektovani čvor moguće povezati *MiCS-2610* senzor za merenje koncentracije ozona, koji ima potrošnju od nekoliko desetina miliampera, ali da je njegova funkcionalnost moguća samo u toku dana. Zaključak je da ukoliko je praćenje pojedinih parametara prihvatljivo samo u toku dana, projektovani čvor predstavlja dobro rešenje i u tom slučaju.

Dakle, projektovani samonapajajući bežični senzorski čvor, predstavlja kvalitetno namensko rešenje za bežične senzorske mreže u oblasti praćenja parametara životne sredine, jer povećava ukupni životni vek, smanjuje potrebu za održavanjem, tj. ukupne troškove i pruža široku mogućnost korišćenja za praćenje različitih parametara. U poređenju sa sličnim

primerima iz naučne literature i komercijalnim rešenjima, projektovani čvor ima nisku cenu, do 20 evra, čak oko pet puta manju od komercijalnih čvorova, zatim i do četiri puta manje dimenzije u odnosu na rešenje sličnih mogućnosti prikazano u [72]. Dodatno, ima smanjen uticaj na životnu sredinu, jer se ne koriste štetne baterije i manji deo životne sredine se narušava prilikom instalacije na terenu. Ovo je postignuto namenskim projektovanjem i optimalnim izborom elektronskih komponenti.

Unapređeni bežični senzorski čvor, otklanja uočena ograničenja prvobitno projektovanog čvora, odlikuje se modularnim dizajnom i pruža znatno više mogućnosti u primeni, po nešto većoj ceni od samo 5 evra. Osim funkcionalnosti bežičnog senzorskog čvora, unapređeni modularni čvor se može koristiti kao pristupni čvor bežične senzorske mreže i kao merna stanica. Modularnost omogućava korišćenje više tipova izvora energije iz okoline, napredno i brzo procesiranje podataka i primenu različitih tipova komunikacije za slanje podataka.

Unapređeni bežični senzorski čvor će predstavljati osnovu za dalji razvoj primene bežičnih senzorskih mreža za praćenje parametara životne sredine. Modularnost u dizajnu će se iskoristiti za istraživanje različitih izvora energije iz okoline, posebno na mestima gde nema sunčeve svetlosti. Novi tipovi komunikacije, kao što je komunikacija dugog dometa *LPWAN*, će takođe biti predmet budućih istraživanja.

8. Literatura

- [1] L. M. Oliveira and J. J. Rodrigues, “Wireless Sensor Networks: a Survey on Environmental Monitoring,” *J. Commun.*, vol. 6, no. 2, pp. 143–151, 2011.
- [2] M. F. Othman and K. Shazali, “Wireless sensor network applications: A study in environment monitoring system,” *Procedia Eng.*, vol. 41, pp. 1204–1210, 2012.
- [3] W. Yi, K. Lo, T. Mak, K. Leung, Y. Leung, and M. Meng, “A Survey of Wireless Sensor Network Based Air Pollution Monitoring Systems,” *Sensors*, vol. 15, no. 12, pp. 31392–31427, 2015.
- [4] K. S. C. Kuang, S. T. Quek, and M. Maalej, “Remote flood monitoring system based on plastic optical fibres and wireless motes,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 147, no. 2, pp. 449–455, 2008.
- [5] J. Kim, C. Chu, and S. Shin, “ISSAQ : An Integrated Sensing Systems for Real-Time Indoor Air Quality Monitoring,” *IEEE Sens. J.*, vol. 14, no. 12, pp. 4230–4244, 2014.
- [6] M. Rossi and D. Brunelli, “Ultra low power Wireless Gas Sensor Network for environmental monitoring applications,” *2012 IEEE Work. Environ. Energy, Struct. Monit. Syst. EESMS 2012 - Proc.*, 2012.
- [7] B. Ando, S. Baglio, C. O. Lombardo, and A. Pistorio, “Seismic and gas monitoring of volcanic sites,” *SAS 2015 - 2015 IEEE Sensors Appl. Symp. Proc.*, pp. 0–4, 2015.
- [8] L. M. W. D.D.Chaudhary, S.P.Nayse, “Application of Wireless Sensor Networks for Greenhouse Parameter Control in Precision Agriculture,” *Int. J. Wirel. Mob. Networks*, vol. 3, no. 1, p. 140, 2011.
- [9] P. Jiang, H. Xia, Z. He, and Z. Wang, “Design of a water environment monitoring system based on wireless sensor networks,” *Sensors*, vol. 9, no. 8, pp. 6411–6434, 2009.
- [10] Aqeel-Ur-Rehman, A. Z. Abbasi, N. Islam, and Z. A. Shaikh, “A review of wireless sensors and networks’ applications in agriculture,” *Comput. Stand. Interfaces*, vol. 36, no. 2, pp. 263–270, 2014.
- [11] P. Rawat, K. D. Singh, H. Chaouchi, and J. M. Bonnin, “Wireless sensor networks: A survey on recent developments and potential synergies,” *J. Supercomput.*, vol. 68, no. 1, pp. 1–48, 2014.
- [12] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, “Wireless sensor network survey,” *Comput. Networks*, vol. 52, no. 12, pp. 2292–2330, 2008.
- [13] Ž. Mihajlović, V. Milosavljević, N. Maoduš, V. Rajs, M. Slankamenac, and M. Živanov, “System for monitoring concentration of NO₂ and CO gasses on landfill sites,” in *MIPRO 2012 - 35th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics - Proceedings*, 2012, pp. 183–186.

- [14] Z. Mihajlovic, V. Milosavljevic, V. Rajs, and M. Zivanov, "Application of GPRS modules in data acquisition and control of devices for air quality monitoring," in *2012 20th Telecommunications Forum, TELFOR 2012 - Proceedings*, 2012.
- [15] Z. Mihajlovic, V. Milosavljevic, V. Rajs, and M. Zivanov, "Remote environmental monitoring system for application in industry and landfill sites," in *Proceedings - 2013 2nd Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2013*, 2013.
- [16] V. Rajs *et al.*, "Realization of instrument for environmental parameters measuring," *Elektron. ir Elektrotehnika*, vol. 20, no. 6, 2014.
- [17] Y. K. Tan, *Energy Harvesting Autonomous Sensor Systems: Design, Analysis, and Practical Implementation*. CRC Press, 2013.
- [18] R. Lopes Pereira, J. Trindade, F. Goncalves, L. Suresh, D. Barbosa, and T. Vazão, "A wireless sensor network for monitoring volcano-seismic signals," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 14, no. 12, pp. 3123–3142, 2014.
- [19] J. H. Huang *et al.*, "Rapid prototyping for wildlife and ecological monitoring," *IEEE Syst. J.*, vol. 4, no. 2, pp. 198–209, 2010.
- [20] A. G. Yavuz, Z. C. Taysi, and E. Celik, "In-cave wireless communication system," *NGMAST 2009 - 3rd Int. Conf. Next Gener. Mob. Appl. Serv. Technol.*, pp. 161–164, 2009.
- [21] J. A. Khan, H. K. Qureshi, and A. Iqbal, "Energy management in wireless sensor networks: A survey," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 41, pp. 159–176, 2015.
- [22] T. Rault, A. Bouabdallah, and Y. Challal, "Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey," *Comput. Networks*, vol. 67, pp. 104–122, 2014.
- [23] M. Navarro, Y. Li, and Y. Liang, "Energy Profile for Environmental Monitoring Wireless Sensor Networks," in *IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, 2014.
- [24] F. K. Shaikh and S. Zeadally, "Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 1041–1054, 2016.
- [25] S. Sudevakatam and P. Kulkarni, "Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 13, no. 3, pp. 443–461, 2011.
- [26] F. Philipp *et al.*, "Adaptive wireless sensor networks powered by hybrid energy harvesting for environmental monitoring," *2012 IEEE 6th Int. Conf. Inf. Autom. Sustain.*, pp. 285–289, 2012.
- [27] J. M. Gilbert and F. Balouchi, "Comparison of energy harvesting systems for wireless sensor networks," *Int. J. Autom. Comput.*, vol. 5, no. 4, pp. 334–347, 2008.
- [28] V. Milosavljević, Ž. Mihajlović, V. Rajs, and M. Živanov, "Implementation of low cost Liquid Level Sensor (LLS) using embedded system with integrated capacitive sensing module," in *2012 Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2012*, 2012.
- [29] Z. Mihajlovic, A. Joza, V. Milosavljevic, V. Rajs, and M. Zivanov, "Energy harvesting

- wireless sensor node for monitoring of surface water,” in *2015 21st International Conference on Automation and Computing: Automation, Computing and Manufacturing for New Economic Growth, ICAC 2015*, 2015.
- [30] Z. Mihajlovic, V. Milosavljevic, A. Joza, V. Rajs, M. Damnjanovic, and M. Zivanov, “Surface and underground water level monitoring using wireless sensor node with energy harvesting support,” *Elektron. ir Elektrotehnika*, vol. 22, no. 5, 2016.
- [31] J. Artiola, I. L. Pepper, and M. L. Brusseau, *Environmental Monitoring and Characterization*, no. March. Elsevier Science & Technology Books, 2004.
- [32] H. Yang, Y. Qin, G. Feng, and H. Ci, “Online Monitoring of Geological Storage and Leakage Based on Wireless Sensor Networks,” *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 2, pp. 556–562, 2013.
- [33] B. Muladi, Z. Csépe, L. Mucsi, and I. Puskás, “Application of wireless sensor networks in Mecsek mountain’s caves,” in *Proceedings of the 13th National Congress of Speleology*, 2012, pp. 131–136.
- [34] Ž. Mihajlović, V. Rajs, V. Milosavljević, and M. Živanov, “Solution for Monitoring of Carbon Monoxide with Early Warning System,” in *16th International Symposium on Power Electronics - Ee 2011*, 2011, pp. 1–4.
- [35] G. Sparling and L. Schipper, “Soil quality monitoring in New Zealand: Trends and issues arising from a broad-scale survey,” *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 104, no. 3, pp. 545–552, 2004.
- [36] I. Gómez, M. B. Almendro-Candel, J. Navarro-Pedreño, and I. Melendez-Pastor, “The Use of Remote Sensing to Locate Heavy Metal as Source of Pollution,” *Adv. Environ. Res.*, vol. 7, no. January, pp. 225–233, 2011.
- [37] M. Gonzalez, J. Schandy, N. Wainstein, L. Barboni, A. Gomez, and C. Croce, “Wireless image-sensor network application for population monitoring of lepidopterous insects pest (moths) in fruit crops,” *Conf. Rec. - IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf.*, pp. 1394–1398, 2014.
- [38] E. Popovici, M. Magno, and S. Marinkovic, “Power management techniques for Wireless Sensor Networks: A review,” *5th IEEE Int. Work. Adv. Sensors Interfaces IWASI*, pp. 194–198, 2013.
- [39] C. Alippi and G. Anastasi, “An adaptive sampling algorithm for effective energy management in wireless sensor networks with energy-hungry sensors,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, no. 2, pp. 335–344, 2010.
- [40] T. Ruan, Z. Chew, and M. Zhu, “Energy-aware Approaches for Energy Harvesting Powered Wireless Sensor Nodes,” *IEEE Sens. J.*, vol. 17, no. 7, pp. 2165–2173, 2017.
- [41] F. Aderohunmu, D. Brunelli, J. Deng, and M. Purvis, “A Data Acquisition Protocol for a Reactive Wireless Sensor Network Monitoring Application,” *Sensors*, vol. 15, no. 5, pp. 10221–10254, 2015.
- [42] N. A. Pantazis, S. A. Nikolidakis, D. D. Vergados, and S. Member, “Energy-Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 15, no. 2, pp. 551–591, 2013.

- [43] C. Pu, T. Gade, S. Lim, M. Min, and W. Wang, "Lightweight Forwarding Protocols in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks," *2014 IEEE Mil. Commun. Conf.*, pp. 1053–1059, 2014.
- [44] C. Bleakley and S. Dobson, "Compression in Wireless Sensor Networks : A Survey and Comparative Evaluation," *ACM Trans. Sens. Networks*, vol. 10, no. 1, pp. 1–5, 2013.
- [45] D. Antolin, A. Bayo, N. Medrano, B. Calvo, and S. Celma, "WubiNet: A flexible WSN for applications in environmental monitoring," *2012 IEEE I2MTC - Int. Instrum. Meas. Technol. Conf. Proc.*, pp. 2608–2611, 2012.
- [46] J. Gutierrez, J. F. Villa-Medina, A. Nieto-Garibay, and M. A. Porta-Gandara, "Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 1, pp. 166–176, 2014.
- [47] F. Cao, F. Jiang, Z. Liu, B. Chen, and Z. Yang, "Application of ISFET microsensors with mobile network to build IoT for water environment monitoring," *Proc. - 2014 Int. Conf. Intell. Environ. IE 2014*, pp. 207–210, 2014.
- [48] V. Rajs, Z. Mihajlovic, V. Milosavljevic, J. Tomic, and M. Zivanov, "Methods of environmental monitoring parameters based on smart measurement systems," in *24th Telecommunications Forum, TELFOR 2016*, 2017.
- [49] Ž. Mihajlović, Z. Radmilović, V. Milosavljević, V. Rajs, and M. Živanov, "Implementation of remote environmental monitoring system using RF modules with secure communication between devices," in *2012 Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2012*, 2012.
- [50] B. Pokric *et al.*, "Augmented reality enabled iot services for environmental monitoring utilising serious gaming concept," *J. Wirel. Mob. Networks, Ubiquitous Comput. Dependable Appl.*, vol. 6, no. 1, 2015.
- [51] X. Mao, X. Miao, Y. He, X. Y. Li, and Y. Liu, "CitySee: Urban CO₂ monitoring with sensors," *Proc. - IEEE INFOCOM*, pp. 1611–1619, 2012.
- [52] O. A. Postolache, J. M. D. Pereira, and P. M. B. S. Girao, "Smart Sensors Network for Air Quality Monitoring Applications," *Ieee Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 9, pp. 3253–3262, 2009.
- [53] P. Spachos and D. Hatzinakos, "Self-Powered Wireless Sensor Network for Environmental Monitoring," *2015 IEEE Globecom Work. (GC Wkshps)*, pp. 1–6, 2015.
- [54] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, and A. Passarella, "Energy conservation in wireless sensor networks: A survey," *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 3, pp. 537–568, 2009.
- [55] M. J. Hayes *et al.*, "A Comparative Review of Wireless Sensor Network Mote Technologies A Comparative Review of Wireless Sensor Network Mote Technologies," in *The Eighth IEEE Conference on Sensors*, 2009, pp. 1439–1442.
- [56] B. Dziadak, L. Makowski, and A. Michalski, "Survey of Energy Harvesting Systems for Wireless Sensor Networks in Environmental Monitoring," *Metrol. Meas. Syst.*, vol. 23, no. 4, pp. 495–512, 2012.
- [57] T. Ngi Ing Hong, M. Driberg, and B. S. M. Singh, "Simulation and hardware

- implementation of solar energy harvester for wireless sensor networks,” *2014 IEEE Conf. Syst. Process Control (ICSPC 2014)*, no. December, pp. 84–89, 2014.
- [58] A. Kansal, J. Hsu, S. Zahedi, and M. B. Srivastava, “Power management in energy harvesting sensor networks,” *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.*, vol. 6, no. 4, p. 32–es, 2007.
- [59] A. N. Celik and N. Acikgoz, “Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models,” *Appl. Energy*, vol. 84, no. 1, pp. 1–15, 2007.
- [60] M. Villalva, J. Gazoli, and E. Filho, “Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, 2009.
- [61] B. Subudhi and R. Pradhan, “A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems,” *Sustain. Energy, IEEE Trans.*, vol. 4, no. 1, pp. 89–98, 2013.
- [62] Z. Mihajovic, M. Davidovic, L. Sponja, M. Tolic, and M. Zivanov, “MPPT-Based Solar Powered Lead Acid Charger for Telemetry Unit,” in *18. International Symposium on Power Electronics – Ee*, 2015, pp. 1–4.
- [63] B. Dyatkin, V. Presser, M. Heon, M. R. Lukatskaya, M. Beidaghi, and Y. Gogotsi, “Development of a green supercapacitor composed entirely of environmentally friendly materials,” *ChemSusChem*, vol. 6, no. 12, pp. 2269–2280, 2013.
- [64] A. B. Cultura and Z. M. Salameh, “Modeling, Evaluation and Simulation of a Supercapacitor Module for Energy Storage Application,” *Proc. Int. Conf. Comput. Inf. Syst. Ind. Appl.*, no. Cisia, pp. 876–882, 2015.
- [65] A. S. Weddell, G. V. Merrett, T. J. Kazmierski, and B. M. Al-Hashimi, “Accurate supercapacitor modeling for energy harvesting wireless sensor nodes,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 58, no. 12, pp. 911–915, 2011.
- [66] X. Li and B. Wei, “Supercapacitors based on nanostructured carbon,” *Nano Energy*, vol. 2, no. 2, pp. 159–173, 2013.
- [67] K. Z. Panatik *et al.*, “Energy Harvesting in Wireless Sensor Networks : A Survey,” in *IEEE 3rd International Symposium on Telecommunication Technologies (ISTT)*, 2016, pp. 53–58.
- [68] F. Simjee and P. H. Chou, “Wireless Sensor Node,” pp. 197–202, 2006.
- [69] M. Hassanalieregh, T. Soyata, A. Nadeau, and G. Sharma, “Solar-supercapacitor harvesting system design for energy-aware applications,” *Int. Syst. Chip Conf.*, no. 978, pp. 280–285, 2014.
- [70] C. Park, J. Liu, and P. H. Chou, “Eco: an ultra-compact low-power wireless sensor node for real-time motion monitoring,” *IPSN 2005. Fourth Int. Symp. Inf. Process. Sens. Networks, 2005.*, pp. 398–403, 2005.
- [71] F. Wu, C. Rudiger, and M. R. Yuce, “Real-time performance of a self-powered environmental IoT sensor network system,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 2, p. 282,

2017.

- [72] L. Vračar, A. Prijić, D. Nešić, S. Dević, and Z. Prijić, “Photovoltaic Energy Harvesting Wireless Sensor Node for Telemetry Applications Optimized for Low Illumination Levels,” *Electronics*, vol. 5, no. 2, p. 26, 2016.
- [73] “MSP430G2553, Mixed Signal Microcontroller | TI.com.” [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/MSP430G2553>. [Accessed: 01-Apr-2018].
- [74] “nRF24L01+ / 2.4GHz RF / Products / Home - Ultra Low Power Wireless Solutions from NORDIC SEMICONDUCTOR.” [Online]. Available: www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24L01P. [Accessed: 01-Apr-2018].
- [75] “Digi XBee and XBee-PRO Zigbee RF Modules - Digi International.” [Online]. Available: www.digi.com/products/xbee-rf-solutions/2-4-ghz-modules/xbee-zigbee. [Accessed: 01-Apr-2018].
- [76] “CC2500 Low Cost, Low-Power 2.4 GHz RF Transceiver Designed for Low-Power Wireless Apps in the 2.4 GHz ISM B | TI.com.” [Online]. Available: www.ti.com/product/CC2500. [Accessed: 01-Apr-2018].
- [77] S. S. Sonavane, V. Kumar, and B. P. Patil, “MSP430 and nRF24L01 based Wireless Sensor Network Design with Adaptive Power Control,” *Control*, vol. 8, no. 2, pp. 11–15, 2009.
- [78] NXP BV, “MPL3115A2 I 2 C precision pressure sensor with altimetry.” [Online]. Available: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPL3115A2.pdf>. [Accessed: 01-Apr-2018].
- [79] “Si7020-A20-IM Digital Relative Humidity and Temperature Sensor with I2C Interface | Silicon Labs.” [Online]. Available: <https://www.silabs.com/products/sensors/humidity/si7006-13-20-21-34/device.si7020-a20-im>. [Accessed: 01-Apr-2018].
- [80] A. Boyden, V. K. Soo, and M. Doolan, “The Environmental Impacts of Recycling Portable Lithium-Ion Batteries,” *Procedia CIRP*, vol. 48, pp. 188–193, 2016.
- [81] “DMT334R2S474M3DTA0 / Supercapacitor (EDLC) DMT Series _ Series.” [Online]. Available: <http://www.murata.com/products/productdetail?partno=DMT334R2S474M3DTA0>.
- [82] P. H. C. Chien-Ying Chen, “DuraCap: a Supercapacitor-Based, Power-Bootstrapping, Maximum Power Point Tracking Energy-Harvesting System,” *Chien-Ying Chen, Pai H. Chou*, pp. 1–26, 2010.
- [83] “DMT Series | Supercapacitors (EDLC) | Capacitor | Murata Manufacturing Co., Ltd.” [Online]. Available: <https://www.murata.com/products/capacitor/edlc/dmt>. [Accessed: 01-Apr-2018].
- [84] “BQ25504 Ultra Low Power Boost Converter with Battery Management for Energy Harvester | Nano-Power Management | TI.com.” [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/BQ25504>. [Accessed: 01-Apr-2018].
- [85] “Sistem Pemantau Kualitas Udara Tanpa Kabel (SPIKUN) - MBT LAB TEKNIK.” [Online]. Available: <http://www.mbt-labteknik.com/product/sistem-pemantau-kual>

- itas-udara-tanpa-kabel-spikun/. [Accessed: 01-Apr-2018].
- [86] “Libelium - Connecting Sensors to the Cloud.” [Online]. Available: <http://www.libelium.com/>. [Accessed: 10-Apr-2018].
- [87] “Antennas for Wireless M2M Applications.” [Online]. Available: <http://www.antenova-m2m.com/wp-content/uploads/2016/01/Rufa-A5837-A5887-PS-1-2.pdf>. [Accessed: 01-Apr-2018].
- [88] “24LC128 - Memory.” [Online]. Available: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/24LC128>. [Accessed: 01-Apr-2018].
- [89] X. Jiang, G. Zhou, Y. Liu, and Y. Wang, “Wireless sensor networks for forest environmental monitoring,” *Inf. Sci. ...*, no. Figure 2, pp. 2–5, 2010.
- [90] Ž. Mihajlović, V. Milosavljević, A. Joža, and M. Damnjanović, “Modular WSN node for environmental monitoring with energy harvesting support,” in *2017 Zooming Innovation in Consumer Electronics International Conference: Galvanize Your Creativity, ZINC 2017*, 2017.
- [91] “PIC24FJ256GB406 - Microcontrollers and Processors.” [Online]. Available: www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC24FJ256GB406. [Accessed: 01-Apr-2018].
- [92] “24AA02E48 - Memory.” [Online]. Available: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/24AA02E48>. [Accessed: 01-Apr-2018].
- [93] “TPS22929D 5.5V, 1.8A, 115mΩ Load Switch with Quick Output Discharge and Reverse Current Protection | TI.com.” [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/TPS22929D>. [Accessed: 01-Apr-2018].
- [94] “Ozone Alphasense 4-Electrode gas sensors.” [Online]. Available: <http://www.alphasense.com/index.php/products/ozone-2/>. [Accessed: 02-Apr-2018].
- [95] “MICS-2610, Gas Sensor - MetalOxide, SGX Sensortech Limited (formerly e2v).” [Online]. Available: <https://sgx.cdistore.com/ProductDetail/MICS2610-SGX-Sensortech-Limited/333414/>. [Accessed: 02-Apr-2018].
- [96] V. Jelcic, M. Magno, D. Brunelli, G. Paci, and L. Benini, “Context-adaptive multimodal wireless sensor network for energy-efficient gas monitoring,” *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 1, pp. 328–338, 2013.
- [97] “Alphasense Sensors.” [Online]. Available: <http://www.alphasense.com/index.php/air/>. [Accessed: 02-Apr-2018].
- [98] V. Milosavljevi and V. Rajs, “Solution of capacitive touch panel for robust industrial and public usage,” *XV Int. Sci. Conf. Ind. Syst.*, pp. 140–144, 2011.
- [99] “PIC12F1822 - Microcontrollers and Processors.” [Online]. Available: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC12F1822>. [Accessed: 02-Apr-2018].
- [100] “REF3020 2.048V 50ppm/Degrees C, 50uA in SOT23-3 Series (Bandgap) Voltage Reference | TI.com.” [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/REF3020>. [Accessed: 03-Apr-2018].
- [101] “SST25VF016B - Memory.” [Online]. Available: <http://www.microchip.com/www>

- products/en/SST25VF016B. [Accessed: 03-Apr-2018].
- [102] R. Shigeta *et al.*, “Ambient RD Energy Harvesting Sensor Device with Capacitor-Leakage-Aware Duty Cycle Control,” *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 8, pp. 2973–2983, 2013.
- [103] T. Paing, E. A. Falkenstein, R. Zane, and Z. Popovic, “Custom IC for Ultralow Power RF Energy Scavenging,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 6, p. 1620, 2011.
- [104] A. Cammarano, D. Spenza, and C. Petrioli, “Energy-harvesting WSNs for structural health monitoring of underground train tunnels,” *2013 IEEE Conf. Comput. Commun. Work. INFOCOM WKSHPs 2013*, pp. 75–76, 2013.
- [105] M. E. Kiziroglou *et al.*, “Design and Fabrication of Heat Storage Thermoelectric Harvesting Devices,” vol. 61, no. 1, pp. 1–9, 2014.
- [106] Q. Cheng, Z. Peng, and J. Lin, “Energy Harvesting from Human Motion for Wearable Devices,” *10th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, pp. 409–412, 2015.
- [107] C. P. Souza *et al.*, “On Harvesting Energy from Tree Trunks for Environmental Monitoring,” *Int. J. Distrib. Sens. Networks*, vol. 2016, 2016.
- [108] C. Konstantopoulos, E. Koutroulis, N. Mitianoudis, and A. Bletsas, “Converting a plant to a battery and wireless sensor with scatter radio and ultra-low cost,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 65, no. 2, pp. 388–398, 2016.
- [109] C. Lu, C.-Y. Tsui, and W.-H. Ki, “Vibration Energy Scavenging System With Maximum Power Tracking for Micropower Applications,” *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. Syst.*, vol. 19, no. 11, pp. 2109–2119, 2011.
- [110] S. Yuan, Y. Huang, J. Zhou, Q. Xu, C. Song, and P. Thompson, “Magnetic Field Energy Harvesting under Overhead Power Lines,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 11, pp. 6191–6202, 2015.
- [111] V. Leonov, “Thermoelectric energy harvesting of human body heat for wearable sensors,” *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 6, pp. 2284–2291, 2013.
- [112] C. Park and P. H. Chou, “AmbiMax: Autonomous energy harvesting platform for multi-supply wireless sensor nodes,” *2006 3rd Annu. IEEE Commun. Soc. Sens. Adhoc Commun. Networks, Secon 2006*, vol. 1, pp. 168–177, 2007.
- [113] “SCM Series - SuperCapacitors | AVX.” [Online]. Available: <http://www.avx.com/products/supercapacitors/scm-series/>. [Accessed: 13-Apr-2018].