

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Strahinja P. Janković

ENERGETSKI NEUTRALNI SOLARNO NAPAJANI BEŽIČNI SENZORSKI ČVOROVİ

Doktorska disertacija

Beograd, 2020.

UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Strahinja P. Janković

ENERGY NEUTRAL SOLAR POWERED WIRELESS SENSOR NODES

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2020.

Mentor:

dr Lazar Saranovac, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

Članovi komisije

dr Ivan Popović, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

dr Vladimir Milovanović, docent
Univerzitet u Kragujevcu – Fakultet inženjerskih nauka

dr Aleksandar Rakić, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

dr Vladimir Rajović, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

Datum odbrane: _____

Zahvalnica

Zahvaljujem se mentoru prof. dr Lazaru Saranovcu na podršci, pomoći i savetima tokom celog mog studiranja i rada na fakultetu. Takođe se zahvaljujem prof. dr Ivanu Popoviću, koji mi je u pravim trenucima pružio podršku i novi pogled na istraživanje kojim se bavim.

Zahvaljujem se kolegama sa Katedre za elektroniku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu od kojih sam imao prilike dosta stvari da naučim i koji su uvek bili raspoloženi da saslušaju, prodiskutuju i da pruže savet.

Zahvaljujem se kolegama sa seminara Primenjene fizike i elektronike u IS Petnica, kao i samom seminaru PFE i istraživačkoj stanici Petnica. Seminar PFE me je upoznao sa čarima elektronike, što je bila prekretnica u mom školovanju koja je i dovela do ovog trenutka.

Zahvalio bih se i učiteljici, nastavnicima iz osnovne škole i profesorima iz srednje škole, posebno iz fizike i matematike, što su me uvek podsticali da dam sve od sebe i što su uložili dosta svog vremena u moj napredak.

Veliku zahvalnost dugujem roditeljima Prvoslavu i Ljiljani, sestri Mariji, i široj porodici, koji su uvek verovali u mene, pomagali mi savetima i konkretnim delima, i na koje sam uvek znao da mogu da se oslonim.

Posebnu zahvalnost dugujem svojoj supruzi Miljani i deci Pavlu i Emi, koji su pored svega imali i puno razumevanja i strpljenja tokom celog procesa čiji je rezultat ova disertacija.

Sažetak

Naslov: Energetski neutralni solarno napajani bežični senzorski čvorovi

Baterijski napajani senzorski čvorovi omogućavaju prikupljanje podataka sa senzora koji su postavljeni na teško dostupnim ili udaljenim mestima. Ograničenje upotrebe baterijski napajanih senzorskih čvorova predstavlja konačan kapacitet baterije. U cilju produženja vremena rada do trenutka pražnjenja baterije koriste se algoritmi za optimizaciju potrošnje i performansi. Algoritam na osnovu zadatog kriterijuma i primenom tehnika za smanjenje potrošnje omogućava postizanje kompromisa između performansi i potrošnje, a samim tim i vremena trajanja baterije. Međutim, koliko god da je algoritam za optimizaciju efikasan, baterija će se eventualno isprazniti.

Prikupljanje energije iz okoline predstavlja potencijalno rešenje problema konačnog kapaciteta baterije. Ukoliko se koristi prikupljanje energije iz okoline, cilj algoritma optimizacije menja se u maksimizaciju performansi tako da se ne ugrozi operativnost senzorskog čvora. Ovaj koncept se u literaturi naziva koncept energetske neutralnosti. Da bi se postigla energetska neutralnost, algoritam pored informacije o trenutnom stanju napunjenosti baterije treba da ima i predviđanje o energiji koja će moći da se prikupi u budućnosti.

U okviru ove disertacije prvo su analizirane su postojeće tehnike za smanjenje potrošnje. Prikazane su tehnike koje se primenjuju prilikom razvoja i tehnike koje se primenjuju u toku rada sistema. Nedostatak postojećih tehnika za smanjenje potrošnje u toku rada je što im je primena ograničena isključivo na opseg gde ne dolazi do degradacije performansi. To je posledica nepostojanja objektivne metrike degradacije.

Predložena je nova objektivna metrika degradacije performansi sistema za rad u realnom vremenu. Metrika degradacije performansi omogućava da se funkcija degradacije pridruži svakom tasku na sistemu prema vremenskoj kritičnosti. Uvođenjem metrike degradacije omogućeno je proširenje opsega primene postojećih tehnika za smanjenje potrošnje. Na osnovu uvedene metrike degradacije predstavljena je i nova tehnika za smanjenje potrošnje koja se zasniva na kontroli utilizacije. Predložena tehnika proširuje polje sistemskih parametara, čime je omogućen fin odabir kompromisa između potrošnje i performansi. Tehnika je verifikovana u simuliranom okruženju, gde je za proizvoljno izabran skup taskova prikazano da predložena tehnika omogućava odabir rada sistema sa manjom degradacijom performansi i manjom potrošnjom u odnosu na standardne tehnike za smanjenje potrošnje.

Nakon toga su analizirane postojeće tehnike za predviđanje dostupne energije u budućnosti. U zavisnosti od toga kako predviđaju dostupnu energiju za naredne vremenske intervale, tehnike mogu da se podele na tehnike koje koriste podatke iz prethodnih vremenskih intervala i tehnike koje koriste podatke iz vremenske prognoze. Tehnike koje koriste podatke iz prethodnih vremenskih intervala su jednostavnije za implementaciju jer su podaci uvek dostupni i mogu da daju bolje rezultate za predviđanje za naredni vremenski interval, odnosno kratkoročnu vremensku prognozu. Tehnike koje su zasnovane na vremenskoj prognozi uglavnom koriste podatke o oblačnosti, kojima modulišu podatke o solarnom zračenju za potpuno vedar dan. Nedostatak ovih tehnika je što je potrebno nabaviti podatke o vremenskoj prognozi, što predstavlja dodatni utrošak energije. Prednosti su što pružaju znatno manju

grešku predviđanja za više sati u budućnosti, odnosno za srednjeročno i dugoročno predviđanje.

U okviru disertacije predložene su dve nove tehnike za predviđanje dostupne energije u budućnosti, WF-Fuzzy-Hybrid i WFET-Hybrid. Obe tehnike su zasnovane na vremenskoj prognozi ali koriste i podatke iz prethodnih intervala da bi smanjile grešku kratkoročnog predviđanja. Za računanje solarnog zračenja za potpuno vedar dan korišćen je model izvanzemaljskog zračenja, dok se iz vremenske prognoze pored oblačnosti koristi i verovatnoća padavina. Tehnika WF-Fuzzy-Hybrid koristi filter zasnovan na fazi logici da bi smanjila greške predviđanja prilikom izlaska sunca, kao i odnos izmerene i predviđene energije da bi korigovala predviđanje za naredne vremenske intervale. Tehnika WFET-Hybrid kombinuje predviđanja na osnovu vremenske prognoze i odnosa između izmerene energije i izračunate energije za potpuno vedar dan. Za kratkoročnu prognozu veći uticaj ima predviđanje na osnovu prethodnog vremenskog intervala, dok se za srednjeročnu i dugoročnu prognozu koristi samo vremenska prognoza. Predložene tehnike i odabranih 9 postojećih tehnika testirane su u simuliranom okruženju na prikupljenim podacima u periodu od godinu dana. Rezultati pokazuju da predložene tehnike imaju najmanju grešku predviđanja za kratkoročnu, srednjeročnu i dugoročnu prognozu, u poređenju sa odabranim postojećim tehnikama, što je i bio cilj. Takođe, predložena tehnika WFET-Hybrid ima najmanju srednju apsolutnu grešku predviđanja i normalizovanu srednju kvadratnu grešku u poređenju sa ostalim tehnikama, i drugu najmanju grešku srednjeg apsolutnog odstupanja. Tehnike su dodatno evaluirane i na nivou dana i meseca i pokazano je da WFET-Hybrid tehnika ima najmanju srednju apsolutnu grešku predviđanja u skoro svim sunčanim satima u toku dana, odnosno svim mesecima u godini.

Dalje su analizirani postojeći algoritmi za optimizaciju potrošnje i performansi. Izveden je opšti model algoritma za optimizaciju potrošnje i performansi. Donošenje odluka u okviru algoritma može biti zadato u vidu optimizacionog problema i u vidu skupa pravila. Prednost pristupa u vidu optimizacionog problema je što se planiranje vrši za više vremenskih intervala u budućnosti. Međutim, mana ovog pristupa je što je rešavanje problema procesorski zahtevno, što nije prilagođeno za senzorske čvorove koji su ograničenih procesorskih mogućnosti. Za razliku od pristupa u vidu optimizacionog problema, pristup u vidu skupa pravila uglavnom planiranje vrši samo za naredni interval i jednostavan je za implementaciju.

Na kraju, u okviru disertacije prikazan je algoritam za optimizaciju potrošnje i performansi solarno napajanih bežičnih senzorskih čvorova koji omogućava što veći stepen energetske neutralnog rada. Algoritam integriše predložene tehnike za smanjenje potrošnje i predviđanje dostupne energije u budućnosti. Donošenje odluka je implementirano u vidu skupa pravila. Algoritam je testiran u simuliranom okruženju i na laboratorijskom prototipu. U simuliranom okruženju poređen je uticaj tehnika za predviđanje dostupne energije u budućnosti na performanse i degradaciju, kao i po pitanju postizanja energetske neutralnog rada. Na osnovu rezultata, predložene tehnike WF-Fuzzy-Hybrid i WFET-Hybrid uvode najmanju degradaciju performansi i omogućavaju energetske neutralan rad. Laboratorijski prototip je korišćen u cilju demonstracije funkcionalnosti algoritma za optimizaciju potrošnje i performansi u realnim uslovima.

Ključne reči: energetske neutralan rad, bežični senzorski čvorovi, bežične senzorske mreže, solarna energija, optimizacija potrošnje i performansi.

Naučna oblast: Elektrotehnika i računarstvo

Uža naučna oblast: Elektronika

UDK broj: 621.3

Abstract

Title: Energy neutral solar powered wireless sensor nodes

Battery powered wireless sensor nodes enable data collection from sensors placed in inaccessible or remote locations. The use of battery powered wireless sensor nodes is limited by finite battery capacity. In order to extend operation time before battery is depleted, power and performance management algorithms are used. Based on defined optimization criteria and using consumption reduction techniques, the algorithm enables trade-off between performance and power, thus extending battery life. However, regardless of how effective management algorithm is, the battery will be depleted eventually.

Energy harvesting is a possible solution to finite battery capacity issue. When energy harvesting is used, the optimization goal switches towards maximizing performance while maintaining sensor node operational. This concept is referred to as the concept of energy neutrality. In order to achieve energy neutrality, the algorithm needs information about current battery state of charge, as well as the prediction of future available harvested energy.

In this dissertation, first the existing techniques for consumption reduction have been analyzed. Techniques have been separated into techniques used during design and techniques used during run-time. The downside of existing techniques for consumption reduction at run-time is that their use is limited exclusively to the domain where no performance degradation occurs. This is the consequence of lack of objective performance degradation metrics.

A new objective performance degradation metrics for real-time systems has been introduced. Performance degradation metrics are used to assign degradation function to each task in the system based on consequence of missing a deadline. The introduction of degradation metrics enables extension of domain of application for existing consumption reduction techniques. Based on introduced degradation metrics a new consumption reduction technique has been introduced. Introduced technique extends operating performance point parameters, thus enabling fine trade-off between power and performance. The technique has been verified in simulated environment using a selected set of tasks, where it has been shown that it can enable system operation with less performance degradation, less power consumption, or both, compared to standard consumption reduction techniques.

Next, existing techniques for prediction of future available energy have been analyzed. Depending on how prediction for the following time slots is obtained, techniques can be separated into techniques that use measurements from previous time slots and techniques that use weather forecast data. Techniques that use measurements from previous time slots have simpler implementation since previous measurements are already available and can provide better prediction results for following time slots, i.e. short-term prediction. Techniques that use weather forecast data usually use the cloud cover data, which is used to modulate the clear-sky solar radiation data. The downside of these techniques is that weather forecast data needs to be obtained somehow, which incurs additional power consumption. The advantage of these techniques is that they can provide less prediction error when predicting for time slots further in the future, i.e. the medium-term and long-term prediction.

In the dissertation two new techniques for prediction of future available energy have been presented, the WF-Fuzzy-Hybrid and WFET-Hybrid techniques. Both techniques are based on weather forecast data, but also use measurements from previous time slots in order to reduce short-term prediction error. The extraterrestrial solar radiation model has been used to calculate clear-sky radiation. In addition to the cloud cover data from weather forecast, the precipitation probability data has also been used. The WF-Fuzzy-Hybrid technique uses fuzzy logic filter in order to reduce prediction errors during sunrise and ratio of measured and predicted energy to improve prediction for the following time slots. The WFET-Hybrid technique combines predictions based on weather forecast data and ratio between measured energy and calculated energy for clear-sky day. The short-term prediction is influenced more by prediction based on measurements from previous time slot, while medium-term and long-term predictions are calculated solely based on weather forecast data. Proposed techniques, together with selected 9 existing techniques have been tested in a simulated environment on data collected over a period of a year. The results show that proposed techniques have the least prediction error for short-term, medium-term and long-term prediction, which was the goal when designing these techniques. Additionally, the presented WFET-Hybrid technique has the least mean absolute prediction error and normalized root mean square error compared to other techniques, and second-least mean absolute deviation percent error. The techniques have also been evaluated based on prediction errors on a daily and yearly scale, and the WFET-Hybrid technique has the least mean absolute prediction error in almost every sunny hours during the day and month during the year.

Existing power and performance management algorithms have been further analyzed. The basic algorithm model has been described. The decision making in algorithm can be implemented as an optimization problem, or as set of rules. The advantage of representation in the form of optimization problem is that planning is done for multiple time slots in the future. However, the downside of this representation is that solving the problem can be computationally complex, which is not fit for constrained sensor nodes. The representation in the form of set of rules usually provides plans for the following time slot only and it is easier to implement.

A power and performance management algorithm for solar powered wireless sensor nodes that enables energy neutral operation has been designed and presented in the dissertation. The algorithm integrates presented technique for consumption reduction and techniques for prediction of future available energy. The decision making is implemented as a set of rules. The algorithm has been tested in a simulated environment and on a laboratory prototype. In the simulated environment the effect of using different techniques for prediction of future available energy on power and performance has been tested, as well as on achieving energy neutrality. Based on results, presented techniques WF-Fuzzy-Hybrid and WFET-Hybrid lead to the least performance degradation and enable energy neutral operation. The laboratory prototype has been used in order to demonstrate functionality of presented power and performance management algorithm in real conditions.

Keywords: Energy neutral operation, Wireless Sensor Nodes, Wireless Sensor Network, Solar energy, Power and performance management.

Scientific field: Electrical and Computer Engineering

Scientific subfield: Electronics

UDC number: 621.3

Sadržaj

Slike	x
Tabele	xiii
1 Uvod	1
1.1 Optimizacija potrošnje u baterijski napajanim senzorskim čvorovima	7
1.1.1 Tehnike za smanjenje potrošnje prilikom razvoja	9
1.1.2 Tehnike za smanjenje potrošnje u toku rada	11
1.1.2.1 Tehnike za smanjenje potrošnje na nivou senzorskog čvora	12
1.1.2.2 Tehnike za smanjenje potrošnje na nivou mreže	15
1.2 Prikupljanje energije iz okoline (eng. <i>Energy Harvesting</i>)	18
1.2.1 Pregled dostupnih izvora za prikupljanje energije iz okoline koji se koriste u bežičnim senzorskim čvorovima	18
1.2.2 Skladištenje prikupljene energije iz okoline	21
1.2.3 Konverzija energije	23
1.2.4 Optimalna upotreba energije	23
1.3 Cilj istraživanja i polazna hipoteza	24
1.4 Rezultati i doprinos istraživanja	25
1.5 Struktura doktorske disertacije	26
2 Energetska neutralnost bežičnih senzorskih čvorova	27
2.1 Informacija o trenutno uskladištenoj energiji	27
2.2 Pregled postojećih tehnika za predviđanje dostupne energije	28
2.2.1 Tehnike koje predviđanje vrše na osnovu merenja u prethodnim vremenskim intervalima	29
2.2.2 Tehnike koje koriste vremensku prognozu	33
2.2.3 Poređenje dostupnih klasa postojećih tehnika za predviđanje	36
2.3 Pregled postojećih algoritama za raspoređivanje energije	37
2.3.1 Realizacija u vidu optimizacionog problema	37
2.3.2 Realizacija u vidu skupa pravila	39

3	Algoritam za optimizaciju potrošnje i performansi	43
3.1	Organizacija algoritma za optimizaciju potrošnje i performansi	44
3.2	Ulazni podaci u algoritam za optimizaciju potrošnje i performansi	44
3.2.1	Podaci koji se dobijaju od samog sistema	45
3.2.2	Podaci i merenja koji se dobijaju spolja	46
3.2.3	Cilj optimizacije	46
3.3	Modul za donošenje odluka	47
3.4	Modeli procesa i sistema	47
3.4.1	Model sistema	47
3.4.2	Modeli procesa	53
3.5	Postojeći algoritmi za optimizaciju potrošnje i performansi	53
4	Degradacija u sistemima za rad u realnom vremenu	56
4.1	Nova metrika degradacije performansi	56
4.1.1	Vremenski kritični taskovi (<i>hard real-time</i>)	58
4.1.2	Uslovno vremenski kritični taskovi (<i>firm real-time</i>)	58
4.1.3	Vremenski nekritični taskovi (<i>soft real-time</i>)	59
4.2	Degradacija performansi kod prioritetskog raspoređivanja	59
4.2.1	Primer – Proširenje opsega DVFS (eDVFS)	60
4.3	Nova tehnika za smanjenje potrošnje – tehnika za kontrolu utilizacije	61
4.4	Rezultati i diskusija	62
4.4.1	Primena modela degradacije na eDVFS	63
4.4.2	Evaluacija tehnike za kontrolu utilizacije	64
4.4.2.1	Fiksna radna učestanost	64
4.4.2.2	Dostupno skaliranje učestanosti i napona	66
5	Nove tehnike za predviđanje dostupne solarne energije	69
5.1	Određivanje solarne energije za potpuno vedar dan	70
5.2	Nova tehnika WF-Fuzzy-Hybrid	72
5.2.1	Računanje solarne energije za dati trenutak	72
5.2.2	Korekcija predviđene vrednosti	74
5.3	Nova tehnika WFET-Hybrid	74
5.3.1	Računanje solarne energije za dati trenutak	74
5.4	Rezultati i diskusija	75
6	Algoritam za optimizaciju potrošnje i performansi	85
6.1	Model solarno napajanog bežičnog senzorskog čvora	85

6.1.1	Novi algoritam za raspoređivanje energije	86
6.1.2	Regioni stanja napunjenosti skladišta energije	87
6.1.2.1	Normalni region	87
6.1.2.2	Konzervativni region	87
6.1.2.3	Kritični region	87
6.1.3	Određivanje vrednosti utilizacije koja treba da se podesi	87
6.2	Rezultati i diskusija	88
6.2.1	Simulacija	89
6.2.2	Laboratorijski prototip	89
7	Zaključak	97
	Bibliografija	99
	Biografija	107

Slike

1.1	Sajberfizički sistem gde povezani pametni uređaji mogu međusobno da interaguju kao i da komuniciraju putem različitih tehnologija	2
1.2	Integrisanje bežičnih senzorskih mreža u internet stvari	2
1.3	Topologije bežičnih senzorskih mreža koje se najčešće koriste: (a) zvezda; (b) hijerarhijska; (c) mrežasta.	4
1.4	Klase fizičkih veličina i karakteristike koje mogu da se mere sensorima	6
1.5	Hijerarhijska organizacija naponskih, energijskih i taktnih domena u sistemu na čipu .	11
1.6	Relacija između potrošnje i performansi aplikacije	15
1.7	Tehnike za optimizaciju potrošnje na nivou mreže kod bežičnih senzorskih čvorova .	16
1.8	Taksonomija izvora za prikupljanje energije iz okoline	19
1.9	Organizacija sistema za prikupljanje energije iz okoline u zavisnosti od toga da li se i na koji način koristi element za skladištenje energije: (a) skladištenje-korišćenje; (b) prikupljanje-korišćenje; (c) prikupljanje-skladištenje-korišćenje; (d) prikupljanje-korišćenje-skladištenje.	22
1.10	Primeri DC-DC konvertora: (a) Buck konvertor; (b) Boost konvertor; (c) Buck-Boost konvertor.	24
2.1	Zavisnost napona od vremena prilikom pražnjenja superkondenzatora i baterije konstantnom strujom	28
2.2	Pro-Energy: profili prikupljene solarne energije koriste se za predviđanje dostupne energije u budućnosti	31
2.3	Histogram relativne standardne devijacije atmosferske propustljivosti i solarne energije za dati dan	32
2.4	Vrednosti globalne, direktne i difuzne solarne radijacije za različite vremenske uslove u gradu Florianópolis u Brazilu (27° 28'S, 48° 29'W) za dane u 2002. godini sa slikama neba sa zemlje za: (a) potpuno vedar dan (11.08.); (b) pretežno sunčan dan (12.04.); (c) pretežno oblačan dan (18.08.); (d) potpuno oblačan dan (14.08.).	35
2.5	Podela dana na intervale prema trendu kretanja količine energije koja je dostupna za prikupljanje	40
2.6	Nivoi stanja napunjenosti skladišta energije od interesa za algoritam za raspoređivanje	41
2.7	Funkcije pripadnosti za prikupljenu energiju i stanje napunjenosti skladišta energije koji se koriste kao ulaz u algoritam za raspoređivanje energije zasnovan na fazi logici	42

3.1	Organizacija algoritma za optimizaciju potrošnje i performansi	45
3.2	Podržana stanja prema ACPI specifikaciji: sistema (G), smanjene potrošnje sistema (S), procesora (C), komponenti (D) i performansi (P).	49
3.3	SCMI agenti i protokoli	50
3.4	SCMI apstrakcija komponenti	51
3.5	Opis stabla uređaja - FDT opis	51
3.6	UHA komponente i signali	52
3.7	UHA scene i tranzicije	52
4.1	Model degradacije performansi kod vremenski kritičnih taskova	58
4.2	Model degradacije performansi kod uslovno vremenski kritičnih taskova	59
4.3	Model degradacije performansi kod vremenski nekritičnih taskova	59
4.4	eDVFS.	60
4.5	Scenariji izvršavanja aplikacije za različite parametre taska τ_{UC}	62
4.6	Operativne tačke sistema u polju potrošnje-performansi za $OPP(\varphi)$	64
4.7	Metrike performansi aplikacije (gore) i potrošnje (dole) u polju sistemskih parametara (Pr_{UC}, U_{UC}).	65
4.8	Operativne tačke sistema u polju potrošnje-performansi za $OPP(\varphi)$ i $eOPP(\varphi, Pr_{UC}, U_{UC})$	66
4.9	Ilustracija potencijala TOA za odabranu OPP_Z	67
5.1	Posledice po skladište energije usled predviđanja više energije nego što će stvarno biti dostupno prilikom izlaska i zalaska sunca	70
5.2	Funkcije pripadnosti za greške predviđanja vlažnosti vazduha (ΔH) i atmosferskog pritiska (ΔP)	73
5.3	Funkcije pripadnosti za korekciju predviđanja oblačnosti (ΔCC) i verovatnoće pada-vina (ΔPP)	73
5.4	Distibucija MAPE grešaka za predviđanje dostupne energije u narednom vremenskom intervalu	79
5.5	MAPE greške za predviđanje dostupne energije u narednom vremenskom intervalu po sunčanim satima od 05:00 do 19:00	80
5.6	MAE greške za predviđanje dostupne energije u narednom vremenskom intervalu po sunčanim satima od 05:00 do 19:00	82
5.7	MBE greške za predviđanje dostupne energije u narednom vremenskom intervalu po sunčanim satima od 05:00 do 19:00	82
5.8	MAPE greške odabranih tehnika za različite mesece u godini	83
5.9	MBE greške odabranih tehnika za različite mesece u godini	83
5.10	MAPE greške predviđanja odabranih tehnika za vremenske intervale od 1 sat do 24 sata u budućnosti	84
5.11	MAPE greške predviđanja odabranih tehnika za vremenske intervale od 1 sat do 4 sata u budućnosti	84

6.1	Model solarno napajanog bežičnog senzorskog čvora	86
6.2	Granične vrednosti stanja napunjenosti skladišta energije u primeru algoritma za raspoređivanje energije	88
6.3	Ilustracija određivanja dostupne energije od sumraka do svitanja	89
6.4	Poređenje tehnika za predviđanje dostupne energije u budućnosti za 22-23.06.2018. godine.	91
6.5	Poređenje tehnika za predviđanje dostupne energije u budućnosti za 27-28.08.2018. godine.	93
6.6	Poređenje tehnika za predviđanje dostupne energije u budućnosti za 18-19.11.2018. godine.	93
6.7	Šematski prikaz organizacije laboratorijskog prototipa.	94
6.8	Fotografija laboratorijskog prototipa.	94
6.9	Pozicija i izgled laboratorijskog prototipa postavljenog na lokaciji 1.	95
6.10	Mereni podaci prikupljene energije i stanja napunjenosti baterije za laboratorijski prototip postavljen na lokaciji 1.	95
6.11	Pozicija i izgled laboratorijskog prototipa postavljenog na lokaciji 2.	96
6.12	Mereni podaci prikupljene energije i stanja napunjenosti baterije za laboratorijski prototip postavljen na lokaciji 2.	96

Tabele

1.1	Pregled nekih od dostupnih platformi koje se koriste za senzorske čvorove i pojedinačnih elemenata: procesorski element, bežični interfejs i skladište energije	4
1.2	Pregled karakteristika korišćenih mikrokontrolera po pitanju potrošnje u aktivnom režimu i režimu smanjene potrošnje za platforme prikazane u tabeli 1.1	7
1.3	Pregled karakteristika korišćenih radio interfejsa po pitanju potrošnje za platforme prikazane u tabeli 1.1	8
1.4	Pregled potrošnje za neke od senzora koji mogu naći primenu u senzorskim čvorovima (zasnovano na odgovarajućim <i>datasheet</i> dokumentima)	8
1.5	Pregled karakteristika izvora energije iz okoline	20
1.6	Pregled elemenata za skladištenje energije koji se koriste u bežičnim senzorskim čvorovima	21
4.1	Primeri taskova različitih vremenskih kritičnosti	57
4.2	Podešene vrednosti za raspoređivanje seta taskova Γ	62
4.3	Osobine rada sistema za karakteristične <i>OPP</i> tačke sa slike 4.6	63
4.4	Osobine rada sistema za odabrane radne tačke <i>eOPP</i> sa slike 4.7	66
4.5	Osobine rada sistema za karakteristične <i>OPP</i> tačke sa slike 4.8	67
4.6	Osobine rada sistema za karakteristične <i>eOPP</i> u oblasti TOA izabranoj sa <i>OPP_Z</i>	68
5.1	Vrednosti korektivnih faktora r_0 , r_1 i r_k za različite toplotne pojaseve	72
5.2	Skup fazi pravila za mapiranje greške predviđanja vlažnosti vazduha ΔH i atmosferskog pritiska ΔP u korekciju predviđanja oblačnosti ΔCC i verovatnoće padavina ΔPP	74
5.3	Izabrani parametri tehnika za predviđanje	77
5.4	Greške predviđanja analiziranih tehnika za predviđanje dostupne energije za naredni vremenski interval	78
5.5	Distribucija MAPE grešaka u koracima od po 20% za predviđanje dostupne energije u narednom vremenskom intervalu	78
5.6	MAPE greške predviđanja analiziranih tehnika za vremenske intervale do 24 časa u budućnosti	80
6.1	Vrednosti parametara simuliranog solarno napajanog bežičnog senzorskog čvora	90

6.2	Evaluacija performansi algoritma za optimizaciju potrošnje i performansi simuliranog senzorskog čvora za različite tehnike za predviđanje dostupne solarne energije u budućnosti	90
-----	--	----

Glava 1

Uvod

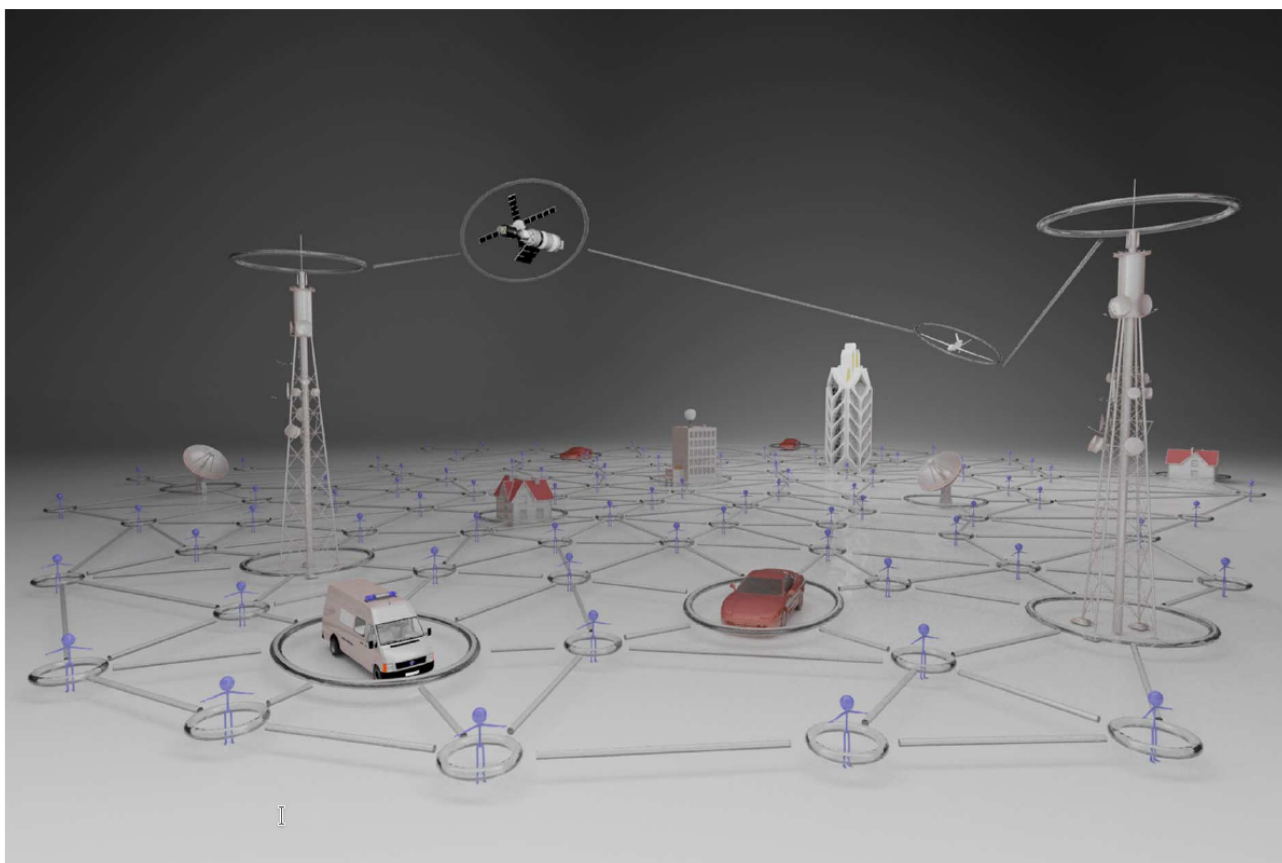
Sa modernizacijom i napretkom tehnologije postao je aktuelan koncept sajberfizičkih (eng. *cyber-physical*) sistema. Sajberfizički sistemi predstavljaju integraciju računarskih i fizičkih procesa, gde umreženi namenski računarski sistemi prate i upravljaju fizičkim procesima [1, 2]. Sastoje se iz više električnih uređaja koji međusobno razmenjuju podatke i koji mogu, na osnovu tih podataka, da preduzimaju određene akcije. Ideja je da uređaji mogu da sarađuju u rešavanju problema, upravljanju procesima, kao i da komuniciraju i razmenjuju informacije na bliskom ili udaljenom rastojanju, a sve u cilju poboljšanja kvaliteta života ljudi.

Električni uređaji koji učestvuju u radu sajberfizičkih sistema nazivaju se pametni uređaji. To su uređaji koji, pored očitivanja fizičkih veličina iz okoline senzorima i mogućnosti dejstva na okolinu aktuatorima, imaju mogućnost saradnje sa drugim uređajima i donošenja odluka. Pametni uređaji postali su prisutni u svim sferama svakodnevnog života, u domovima, saobraćaju, bolnicama, kao i u vidu nosive (eng. *wearable*) tehnologije, odnosno mobilnih telefona i pametnih satova, slika 1.1.

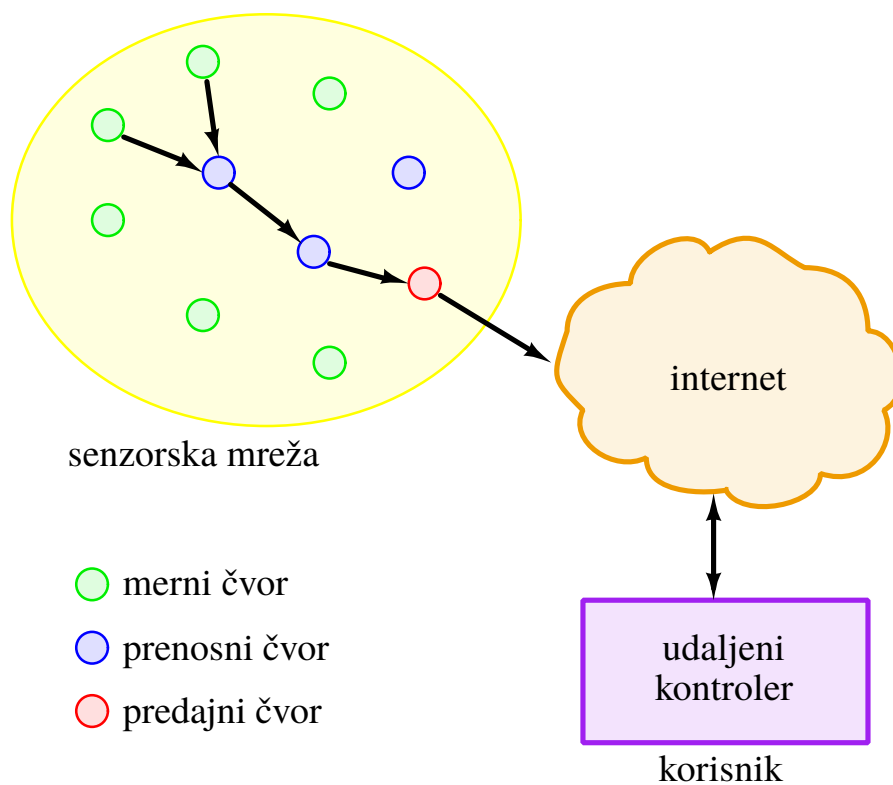
Internet stvari (eng. *Internet of Things* - IoT) predstavlja jednu od klasa sajberfizičkih sistema [2]. Fokus interneta stvari je na omogućavanju komunikacije između pametnih uređaja, odnosno "stvari" (eng. *things*), korišćenjem postojeće podrške za umrežavanje uređaja, poput interneta i telekomunikacione mreže [3]. Da bi pametni uređaji mogli međusobno da komuniciraju predviđeno je da svaki pametni uređaj ima svoju jedinstvenu adresu na osnovu koje može da se identifikuje i da mu se pristupi. Takođe, potrebna je podrška na nivou protokola. Pored standardnih protokola na aplikativnom nivou, poput HTTP (*Hyper-Text Transfer Protocol*), koriste se razni protokoli koji su prilagođeni za pametne uređaje ograničenih procesorskih mogućnosti i za veliki broj pametnih uređaja koji mogu da učestvuju u komunikaciji. Primeri takvih protokola su CoAP (*Constrained Application Protocol*) i MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) [4, 5]. Za razliku od standardnog HTTP protokola, gde klijent mora stalno da traži podatke od servera (eng. *pull*), u CoAP i MQTT je promenjena paradigma tako da klijent može da se prijavi (eng. *subscribe*) da ga server obaveštava samo kada dođe do nekog događaja (eng. *publish*). Na taj način je omogućeno da se mrežni resursi ne preopterećuju, već koriste samo kada postoji potreba. Takođe, ovakvim protokolima omogućeno je da uređaji razmenjuju podatke između sebe bez potrebe za učešćem čoveka (eng. *Machine-to-Machine* - M2M).

Posebnu ulogu u internetu stvari imaju senzorske mreže. U okviru senzorske mreže grupisano je više senzorskih čvorova koji vrše prikupljanje i obradu merenja različitih fizičkih veličina. IoT omogućava integrisanje senzorskih mreža putem interneta u jednu distribuiranu celinu i pojednostavljuje upravljanje dostupnim podacima.

Senzorske mreže mogu da se koriste za unapređenje različitih aspekata svakodnevnog života [7]: praćenje kvaliteta vazduha [8], vremenskih uslova [9], poljoprivredne proizvodnje [10], u medicinskim uređajima [11]. Takođe, senzorske mreže se koriste i u bezbednosnim aplikacijama, poput praćenja



Slika 1.1: Sajberfizički sistem gde povezani pametni uređaji mogu međusobno da interaguju kao i da komuniciraju putem različitih tehnologija (preuzeto iz [2, p. 124])



Slika 1.2: Integrisanje bežičnih senzorskih mreža u internet stvari (zasnovano na [6, p. 538])

stabilnosti mostova, detekcije pojave zemljotresa, požara i vulkanskih aktivnosti, kao i u vojnim primenama [12, 13].

Senzorski čvorovi u okviru senzorske mreže mogu imati različite uloge:

- prikupljanje podataka – merni čvor (eng. *sensing node*),
- prosleđivanje podataka – prenosni čvor (eng. *relay node*), i
- pristup internetu – pristupni čvor (eng. *gateway node*).

Merni čvorovi prikupljaju podatke sa senzora i prosleđuju ih prenosnim ili pristupnim čvorovima, u zavisnosti od topologije bežične mreže. Prenosni čvorovi, pored prikupljanja podataka sa senzora, imaju ulogu da podatke od drugih mernih čvorova proslede dalje ka pristupnom čvoru. Pristupni čvor ima pristup internetu i preko njega se obavlja komunikacija sa spoljnim svetom.

Konkretna organizacija i uloga senzorskih čvorova u okviru senzorske mreže zavisi od više parametara: broja senzorskih čvorova, površine na kojoj su postavljeni, karakteristika senzorskih čvorova i veličine koja se meri, itd. Senzorski čvorovi, takođe, mogu biti postavljeni na fiksnim lokacijama ili na mobilnim platformama [14].

Na slici 1.3 prikazane su topologije bežičnih senzorskih mreža koje se najčešće koriste. U zvezda topologiji (slika 1.3a) ne koriste se prenosni čvorovi, pošto svi merni čvorovi direktno komuniciraju sa pristupnim čvorom. Ovakva topologija je pogodna kada broj senzorskih čvorova nije veliki, kao i kada su senzorski čvorovi na malom rastojanju od pristupnog čvora. Ukoliko se povećava broj senzorskih čvorova u senzorskoj mreži, problem postaje kako da se izvede sinhronizacija između mernih i predajnog čvora tako da dolazi do što manje interferencije u komunikaciji. Sa druge strane, povećanjem rastojanja mernih čvorova od predajnog čvora problem postaje potrošnja mernih čvorova, pošto je potrebna veća predajna snaga da bi podaci stigli do predajnog čvora bez grešaka u prenosu.

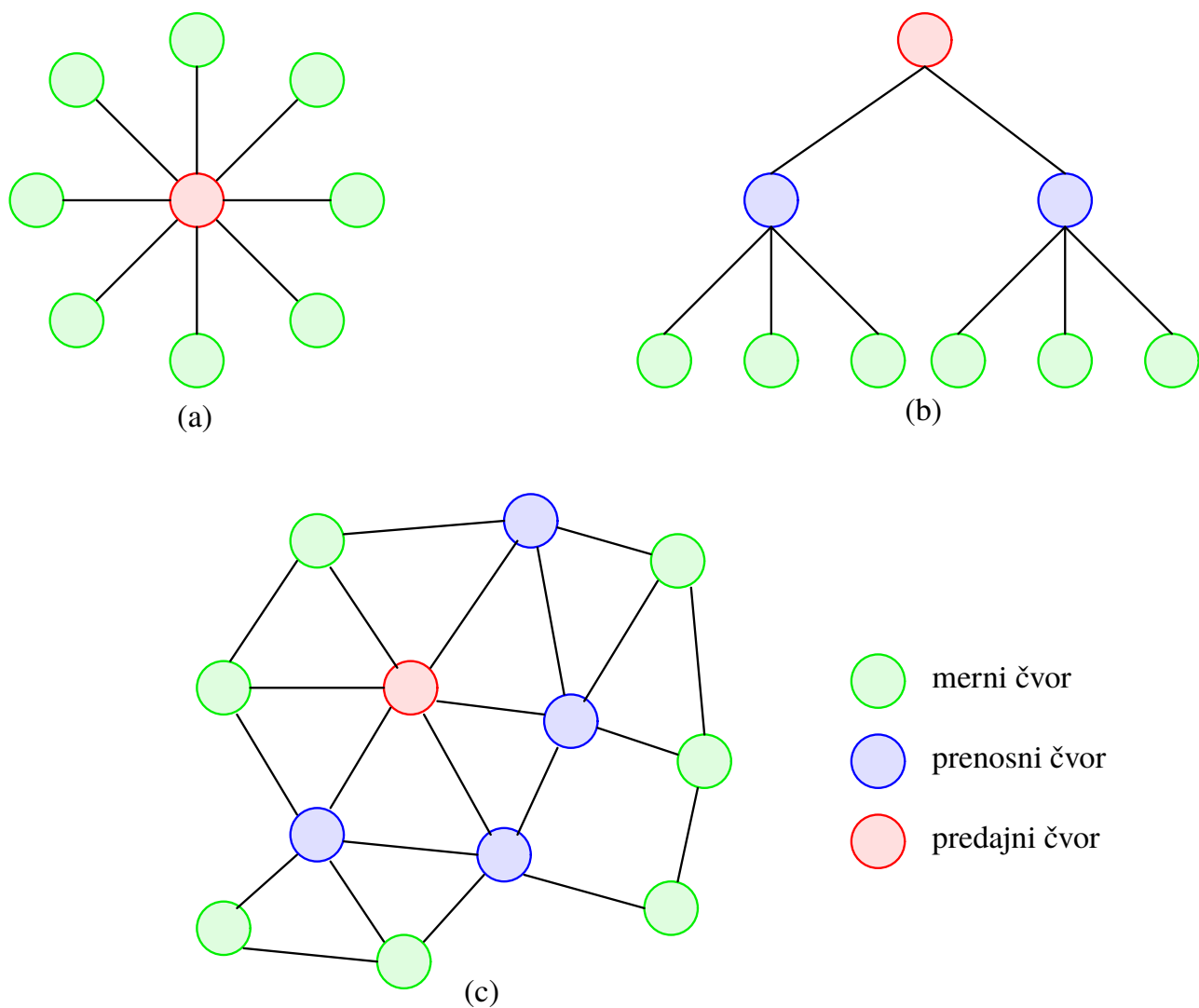
Da bi se prevazišla ograničenja zvezda topologije kada se koristi veći broj mernih čvorova, odnosno kada je površina na kojoj su postavljeni merni čvorovi velika, koriste se mrežasta (eng. *mesh*) (slika 1.3b) i hijerarhijska (slika 1.3c) topologija. U mrežastoj i hijerarhijskoj topologiji koriste se prenosni čvorovi da bi se premostilo povećano rastojanje od mernih čvorova do predajnog čvora. U hijerarhijskoj topologiji postoji jasno grupisanje mernih i prenosnih čvorova u grupe, klastere. U okviru klastera prenosni čvor i odgovarajući merni senzorski čvorovi koje taj prenosni čvor opslužuje organizovani su u zvezda topologiji. Više klastera se grupiše u klastere višeg hijerarhijskog nivoa i tako sve do predajnog čvora koji je u korenu stabla.

Za razliku od hijerarhijske topologije, u mrežastoj topologiji ne postoji predefinisana podela na klastere, već podaci sa mernog čvora mogu da dođu do predajnog čvora kroz više putanja, odnosno preko različitih prenosnih čvorova. Takođe, u nekim situacijama moguća je promena uloga čvorova u toku rada, u zavisnosti od stanja mreže i pojedinačnih čvorova [15].

Senzorski čvorovi se koriste za interakciju sa senzorima. U tabeli 1.1 dat je pregled nekoliko dostupnih platformi koje se koriste za implementaciju senzorskih čvorova. Da bi mogli da učestvuju u radu senzorske mreže i IoT kao pametni uređaji, senzorski čvorovi imaju procesorski element realizovan kao računarski sistem na čipu (en. *System on Chip* - SoC). Sistemi na čipu, mikrokontroleri, prilagođeni po performansama i ceni se najčešće sreću u realizaciji. U tabeli 1.1 su pored korišćenih mikrokontrolera navedeni i bežični interfejsi koji se koriste, kao i tehnologije za skladištenje energije.

Zadatak senzorskih čvorova jeste da

- izvrše inicijalizaciju i kalibraciju senzora pre nego što se počne sa merenjima,
- prikupljaju i obrađuju podatke sa senzora, i



Slika 1.3: Topologije bežičnih senzorskih mreža koje se najčešće koriste: (a) zvezda; (b) hijerarhijska; (c) mrežasta. (zasnovano na [16, p. 99])

Tabela 1.1: Pregled nekih od dostupnih platformi koje se koriste za senzorske čvorove i pojedinačnih elemenata: procesorski element, bežični interfejs i skladište energije

Platforma	Procesorski element	Bežični interfejs	Skladište energije
Mica2 [17]	Atmel ATmega128L	CC1000	NiMH
MicaZ [17]	Atmel ATmega128L	CC2420	NiMH
Fleck3 [18]	Atmel ATmega128L	nRF905	Baterija/Superkondenzator
TelosB [19]	MSP430F1611	CC2420	Li-polimer + Superkondenzator
Everlast [20]	PIC16LF747	nRF2401	Superkondenzator
Solar biscuit [21]	PIC18LF452	CC1000	Superkondenzator

-
- šalju podatke na dalju obradu i skladištenje putem žičnog ili bežičnog mrežnog interfejsa.

Prilikom inicijalizacije senzora postiže se stabilan rad senzora kao i podešavanje željene konfiguracije. Takođe, vrši se određivanje koeficijenata za kalibraciju senzora, odnosno koeficijenata kojima će se naknadno, prilikom merenja, vršiti kompenzacija rezultata. Koeficijenti mogu biti dostupni na više načina:

- u okviru senzora, u postojećoj memoriji iz koje se čitaju prilikom inicijalizacije,
- na osnovu ranijih merenja, sačuvani u lokalnoj memoriji procesorskog elementa,
- određeni na osnovu merenja.

Kalibracija je važna zbog validnosti rezultata merenja. Prilikom proizvodnog procesa senzora mogu da postoje varijacije, zbog čega može da se desi da isti senzori ne daju uvek identičan izlaz. Takođe, rezultat merenja određenog senzora može da zavisi od uslova u kojima se vrši merenje (npr. temperature ambijenta), usled čega je potrebno kompenzovati rezultat merenja na osnovu trenutnog stanja okoline.

Senzorski čvorovi prikupljaju merenja sa senzora određenom dinamikom. Prikupljanje može biti po potrebi ili periodično, gde i sam period može da se menja u zavisnosti od potreba aplikacije. Procesorski element skladišti rezultate merenja u lokalnoj memoriji. U zavisnosti od procesorskih mogućnosti, kao i od dostupne energije, na senzorskom čvoru može da se izvrši deo obrade podataka, poput usrednjavanja, filtriranja ili određivanja karakteristika merene veličine.

Merene i/ili obrađene vrednosti rezultata šalju se na dalju obradu i skladištenje putem mrežnog interfejsa. Mrežni interfejsi koji se koriste za komunikaciju između senzorskih čvorova mogu biti žični ili bežični. Kod žičnih interfejsa najčešće se koristi Ethernet, kao i različite Fieldbus varijante [22], mada mogu da se koriste i standardni serijski interfejsi. Ograničenje žičnih interfejsa je u samoj implementaciji, pošto je razvlačenje kabla nepraktično, posebno kada se radi o velikom broju senzorskih čvorova ili kada su senzorski čvorovi udaljeni. Kod bežičnih interfejsa u upotrebi su različiti opsezi učestanosti, sa različitim karakteristikama po pitanju maksimalnog dometa i potrošnje prilikom slanja odnosno primanja podataka [23]. Ograničenje bežičnih interfejsa predstavlja ograničen spektar učestanosti, gde može doći do interferencije ukoliko veliki broj uređaja komunicira.

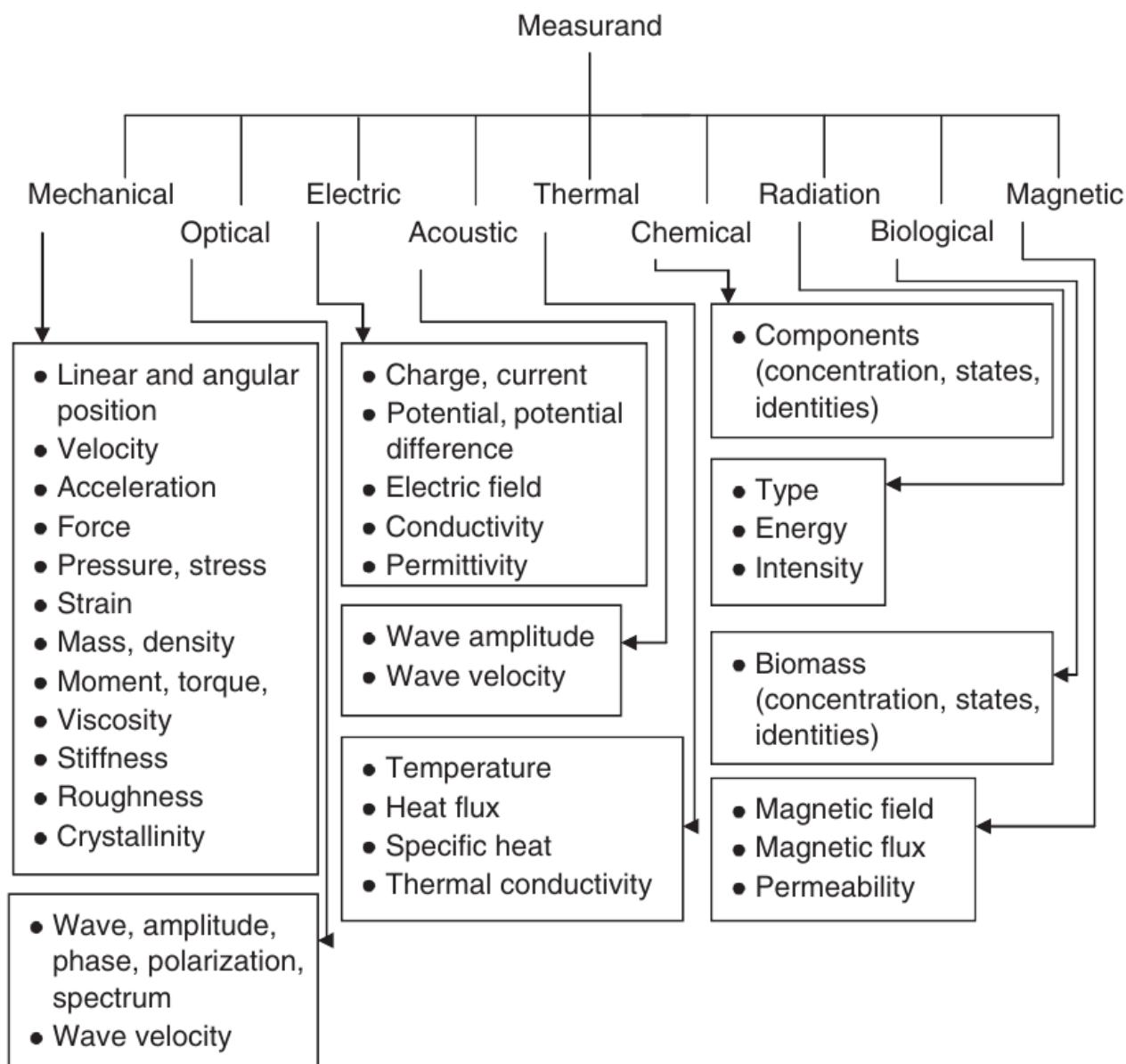
Senzori vrše konverziju određene fizičke veličine u električni signal. Na slici 1.4 dat je prikaz različitih fizičkih veličina, kao i karakteristike fizičkih veličina koje mogu da se mere.

Izlazna električna veličina senzora može biti u formi napona ili struje. Takođe, često su upotrebi dodatni digitalni interfejsi kojima se omogućava jednostavniji pristup podacima. Digitalni interfejsi koji se koriste za pristup podacima sa senzora mogu da se podele na paralelne i serijske.

Digitalni paralelni interfejsi mogu imati različite širine magistrala, u zavisnosti od broja bita potrebnih za reprezentaciju podatka, kao i potrebne brzine očitavanja. Koriste se uglavnom kada je potrebno postići veliki protok podataka.

Kada su u pitanju digitalni serijski interfejsi, oni mogu biti sinhroni i asinhroni. Kod sinhronih serijskih interfejsa pored linija za podatke postoje i linije za prenos takta. Sva komunikacija je sinhronizovana sa taktnim signalom. Primeri sinhronih interfejsa su I²C (*Inter-Integrated Circuit*) i SPI (*Serial Peripheral Interface*) magistrale. Kod asinhronih serijskih interfejsa sinhronizacija između prijemnika i predajnika obezbeđena je u okviru protokola tako što se detektuje početak i kraj poruke. Primeri asinhronih interfejsa su UART (*Universal Asynchronous Receive Transmit*), CAN (*Controller Area Network*) i 1-Wire magistrala.

Očekuje se da će do 2023. godine broj uređaja koji su povezani na internet dostići brojku od 29.3 milijardi uređaja, od čega će 50% biti IoT pametni uređaji [25]. Sa povećanjem broja IoT pametnih



Slika 1.4: Klase fizičkih veličina i karakteristike koje mogu da se mere senzorima (preuzeto iz [24, p. 123])

uređaja povećava se i količina podataka koji oni generišu. Tu do izražaja dolaze algoritmi velikih podataka (eng. *Big Data Algorithms*) [26] koji mogu da se koriste za obradu, čuvanje i prikaz tako velike količine podataka koja je dostupna. Primenom različitih algoritama mašinskog učenja moguća je kontekstualizacija, zaključivanje i donošenje odluka na osnovu tih podataka. Time je omogućen razvoj novih aplikacija koje mogu da se koriste za unapređenje svakodnevnog života [27].

Pored velike količine podataka koji će biti dostupni, energetske zahteve tako velikog broja IoT pametnih uređaja stavljaju akcenat na efikasnu upotrebu dostupne energije [28]. Efikasnost, u kontekstu optimizacije upotrebe energije, definisana je u formi kompromisa između performansi i potrošnje.

1.1 Optimizacija potrošnje u baterijski napajanim senzorskim čvorovima

Senzorski čvorovi koji su postavljeni izvan objekata, na udaljenim ili teško pristupačnim lokacijama su uglavnom baterijski napajani. Baterije imaju konačan kapacitet, zbog čega je niska potrošnja jedan od glavnih zahteva prilikom dizajna baterijski napajanih bežičnih senzorskih čvorova. Potrebno je omogućiti što dužu operativnost senzorskog čvora dok se ne isprazni baterija, pošto zamena baterija nije uvek moguća ili isplativa. Takođe, upotreba baterije većeg kapaciteta nije uvek moguća, jer povećanje kapaciteta baterije značajno povećava dimenzije i težinu senzorskog čvora, što često nije poželjno.

Da bi se stekao uvid u karakteristike dostupnih platformi za senzorske čvorove po pitanju potrošnje pojedinačnih elemenata senzorskog čvora, u daljem tekstu biće dat pregled mikrokontrolera i radio interfejsa koji se nalaze na platformama prikazanim u tabeli 1.1.

Mikrokontroleri su podesni za korišćenje u baterijski napajanim senzorskim čvorovima zbog svoje niske potrošnje. Posebno je važna potrošnja u režimu smanjene potrošnje (P_{LPM}), koja je značajno niža od potrošnje u aktivnom režimu (P_{AM}). Samim tim, prilikom razvoja softvera za mikrokontrolere teži se da se obezbedi da mikrokontroler najveći deo vremena provodi u režimu smanjene potrošnje, a da je u aktivnom režimu samo kada se desi neki događaj (eng. *Event-driven design*). U tabeli 1.2 navedene su karakteristike mikrokontrolera korišćenih na platformama prikazanim u tabeli 1.1. Vrednost f_{max} predstavlja maksimalnu radnu učestanost. Vrednosti potrošnje prikazane su za radni napon od 3.3 V, a potrošnja u aktivnom režimu (P_{AM}) data je za radnu učestanost od 8 MHz. Prikazani mikrokontroleri podržavaju više različitih režima smanjene potrošnje, sa različitim karakteristikama potrošnje i vremena potrebnog da se mikrokontroler vrati u aktivan režim. U tabeli 1.2 prikazana je potrošnja u režimu smanjene potrošnje koji donosi najveću uštedu energije, a da mikrokontroler iz njega može da se probudi po prijemu prekida.

Tabela 1.2: Pregled karakteristika korišćenih mikrokontrolera po pitanju potrošnje u aktivnom režimu i režimu smanjene potrošnje za platforme prikazane u tabeli 1.1 (zasnovano na [23] i odgovarajućim *datasheet* dokumentima)

Mikrokontroler	f_{max} [MHz]	P_{AM} [mW]	P_{LPM} [μ W]
Atmel ATmega128L	8	33	83
MSP430F1611	8	14	9
PIC16LF747	20	6	3
PIC18LF452	40	7	24

Radio interfejsi koji se koriste u bežičnim senzorskim čvorovima rade na različitim frekvencijama koje pripadaju industrijskom, naučnom i medicinskom (eng. *Industrial, Scientific & Medical* - ISM) opsegu. Mogu se svrstati u dve grupe: radio interfejsi koji rade na učestanostima do 1 GHz (*Sub-1GHz* opseg) i radio interfejsi koji rade na učestanosti od 2.4 GHz. Prednost radio interfejsa koji rade u opsegu do 1 GHz jeste što mogu da postignu veći domet, pa je i na većim rastojanjima između mernih i predajnog čvora moguće održati zvezda topologiju mreže. Zbog smanjenog dometa radio interfejsa koji rade na frekvenciji od 2.4 GHz oni se češće koriste za povezivanje u mrežastoj ili hijerarhijskoj topologiji. Pored smanjenog dometa, problem za kvalitet signala kod ovih interfejsa jeste što dosta drugih tehnologija (WiFi, Bluetooth, bežični telefoni, itd.) rade u istom frekvencijskom opsegu, pa postoji interferencija u radu. Sa druge strane, prednost radio interfejsa koji rade na učestanosti od 2.4 GHz jeste što imaju veći propusni opseg u odnosu na interfejse koji rade u opsegu do 1 GHz,

pa samim tim mogu da postignu i veće brzine prenosa podataka. Takođe, protokoli poput ZigBee i 6LoWPAN su predviđeni za rad na učestanosti od 2.4 GHz, što značajno olakšava implementaciju komunikacije i integrisanje u IoT [29].

U tabeli 1.3 prikazan je pregled karakteristika radio interfejsa koji se koriste u platformama prikazanim u tabeli 1.1. Prikazane su potrošnja radio interfejsa prilikom: primanja podataka (P_{RX}), slanja podataka pri nominalnoj snazi od 0 dBm (P_{TX}) i neaktivnog režima u kojem je minimalna potrošnja (P_{PD}). Za sve parametre uzeto je da je radni napon 3.3 V. Na osnovu tabele 1.3 može da se zaključi da je radio interfejs značajan potrošač u okviru senzorskog čvora. Potrošnja radio interfejsa prilikom primanja ili slanja podataka je u nekim slučajevima čak za red veličine veća od potrošnje samog mikrokontrolera u aktivnom režimu.

Tabela 1.3: Pregled karakteristika korišćenih radio interfejsa po pitanju potrošnje za platforme prikazane u tabeli 1.1 (zasnovano na [23] i odgovarajućim *datasheet* dokumentima)

Radio	f [MHz]	P_{RX} [mW]	P_{TX} [mW] @ 0 dBm	P_{PD} [μ W]
CC1000	315–915	50	55	3
nRF905	315–915	36	50	8
CC2420	2400	65	57	3
nRF2401	2400	72	43	1

Pored mikrokontrolera i radio interfejsa, potrebno je analizirati i uticaj samih senzora na potrošnju senzorskih čvorova. U tabeli 1.4 prikazana je potrošnja proizvoljno odabranih senzora koji mogu naći primenu u različitim aplikacijama senzorskih čvorova. Ono što je primetno jeste da postoji širok dijapazon mogućih nivoa potrošnje senzora, od reda 0.1 mW pa do reda 100 mW. To znači da je, u zavisnosti od aplikacije, moguće da senzori predstavljaju i najveći potrošač u sistemu. U tom slučaju, posebnu pažnju treba obratiti na optimizaciju potrošnje samih senzora.

Tabela 1.4: Pregled potrošnje za neke od senzora koji mogu naći primenu u senzorskim čvorovima (zasnovano na odgovarajućim *datasheet* dokumentima)

Senzor	Merena veličina	Potrošnja [mW]
BH1750FVI	osvetljenje	0.4
SMT160-30	temperatura	0.9
BMP180	atmosferski pritisak	2
DS1820	temperatura	5
MPU6500	ubrzanje/ugaona brzina	10
DHT11	temperatura/vlažnost	10
OV7670	svetlost	60
UBLOX Neo-6M	GPS pozicija	130
MQ-7	CO koncentracija	350
SDS011	PM2.5/PM10 koncentracija	350

Na osnovu tabela 1.2, 1.3 i 1.4, može da se zaključi da potrošnja radio interfejsa predstavlja veliki udeo u ukupnoj potrošnji senzorskog čvora, kao i da senzori mogu biti veliki potrošači. Naravno, da bi se uštedela energija i produžilo vreme rada sistema dok se ne isprazni baterija potrebno je

obezbediti efikasnu upotrebu energije od strane svih elemenata senzorskog čvora. To podrazumeva postizanje kompromisa između minimizovanja potrošnje i maksimizovanja performansi prema unapred zadatom kriterijumu, za šta se koriste algoritmi za optimizaciju potrošnje i performansi. Algoritam za optimizaciju primenjuje tehnike za smanjenje potrošnje u cilju postizanja kompromisa između potrošnje i performansi, prema zadatom kriterijumu optimizacije.

Tehnike koje se primenjuju za smanjenje potrošnje senzorskog čvora mogu se podeliti na tehnike koje se koriste prilikom razvoja (eng. *design time*) i tehnike koje se koriste u toku rada (eng. *runtime*).

1.1.1 Tehnike za smanjenje potrošnje prilikom razvoja

Tehnike koje se koriste za smanjenje potrošnje prilikom razvoja omogućavaju višim slojevima softvera da upravljaju stanjima sistema ili pojedinačnih komponenti u toku rada u cilju smanjenja potrošnje. Potrošnja u CMOS sistemima može da se podeli na statičku i dinamičku [30].

Dinamička potrošnja sistema realizovanog u CMOS tehnologiji zavisi najviše od radne učestanosti f i napona napajanja V_{DD} prema jednačini

$$P_D \propto C \cdot f \cdot V_{DD}^2. \quad (1.1)$$

Statička potrošnja zavisi od struje curenja I_{leak} i napona napajanja V_{DD} kao

$$P_S = I_{leak} \cdot V_{DD}. \quad (1.2)$$

Dostupne su različite tehnike za smanjenje potrošnje prilikom razvoja [23, 31] koje su zasnovane na izrazima (1.1) i (1.2).

Na osnovu izraza za dinamičku potrošnju (1.1), ukoliko se omogući promena napona i radne učestanosti u toku rada, moguće je postići kompromis između potrošnje i performansi. Podešavanjem vrednosti napona i učestanosti menja se radna tačka komponente. Smanjivanjem učestanosti i napona postiže se smanjenje potrošnje energije, po cenu performansi sistema. Povećanjem radne učestanosti i napona moguće je postići veće performanse, po cenu veće potrošnje energije. Vrednosti napona i radne učestanosti na kojoj određena komponenta radi nisu nezavisne. Za datu radnu učestanost postoji minimalni napon koje je potrebno obezbediti da bi komponenta funkcionisala. Ako je potreban rad na većoj učestanosti, neophodno je obezbediti veći napon napajanja, odnosno, ako se spusti radna učestanost onda je moguće spustiti i napon napajanja. Određeni uslovi po pitanju radne učestanosti i napona moraju biti ispunjeni da bi komponenta radila stabilno, tako da se uglavnom definišu diskretni skupovi podržanih parova (f, V) koji se nazivaju radne tačke performansi (eng. *Operating Performance Point* - OPP).

Sa druge strane, ako se očekuje da će komponenta duže vreme biti neaktivna, značajnija ušteda energije može da se postigne potpunim isključivanjem te komponente. Pod potpunim isključivanjem podrazumeva se prevođenje u neaktivno stanje, zaustavljanje takta i isključivanje napona napajanja. Prema izrazu (1.2), time se izbegavaju gubici usled struje curenja, koji su sve izraženiji sa modernim proizvodnim procesima. U isključenom stanju, gubici su svedeni na minimum, ali postoji problem zbog vremena koje je potrebno da bi se komponenta ponovo aktivirala. Vreme aktiviranja nije zanemarljivo pošto je prvo potrebno stabilizovati napon i takt, kao i postići stabilan rad komponente pre nego što komponenta može da se koristi. U poređenju sa vremenom koje je potrebno da se komponenti kojoj su smanjeni napon i učestanost vrate odgovarajuće vrednosti napona i učestanosti, vreme koje je potrebno da se komponenta ponovo aktivira nakon što je bila isključena može biti znatno veće.

Hijerarhijska organizacija domena takta i napajanja u sistemima na čipu oslanja se na prethodno navedene tehnike za optimizaciju potrošnje prilikom razvoja.

Sistem na čipu može imati više naponskih domena (eng. *voltage island*), slika 1.5. U jednom naponskom domenu podešena je određena vrednost napona, koja može da bude različita od vrednosti napona u ostalim naponskim domenima. Time se obezbeđuje mogućnost da komponente koje se nalaze u određenom naponskom domenu troše samo onoliko energije koliko je potrebno za funkcionisanje.

Naponski domen ima jedan ili više energijskih domena (eng. *power domain*). Za razliku od naponskog domena, gde je moguće podešavati vrednost napona u toku rada, u energijskom domenu je moguće odabrati samo da li postoji ili ne postoji napon. Odnosno, za svaki energijski domen je moguće isključiti ili uključiti napon u toku rada. Ukoliko se isključi napon u energijskom domenu, samim tim se isključuje napon i svim komponentama koje pripadaju tom energijskom domenu. Isključivanjem napajanja eliminiše se struja curenja za komponente koje nalaze u tom energijskom domenu, čime se eliminiše i statička potrošnja.

Energijski domen ima jedan ili više taktnih domena (eng. *clock domain*). Po taktnim domenima može da se uključuje/isključuje taktni signal. Time se eliminiše dinamička potrošnja.

Praćenjem hijerarhijske organizacije u toku rada sistema moguće je postići dodatnu uštedu isključivanjem takta i/ili napona domenu u kojem se nijedna od komponenti ne koristi, čime se obezbeđuje da se energija troši samo gde je potrebno. Isto se odnosi i na domene više hijerarhije kojima mogu da se isključe takt i/ili napon ukoliko su svi domeni niže hijerarhije koji pripadaju tom domenu isključeni.

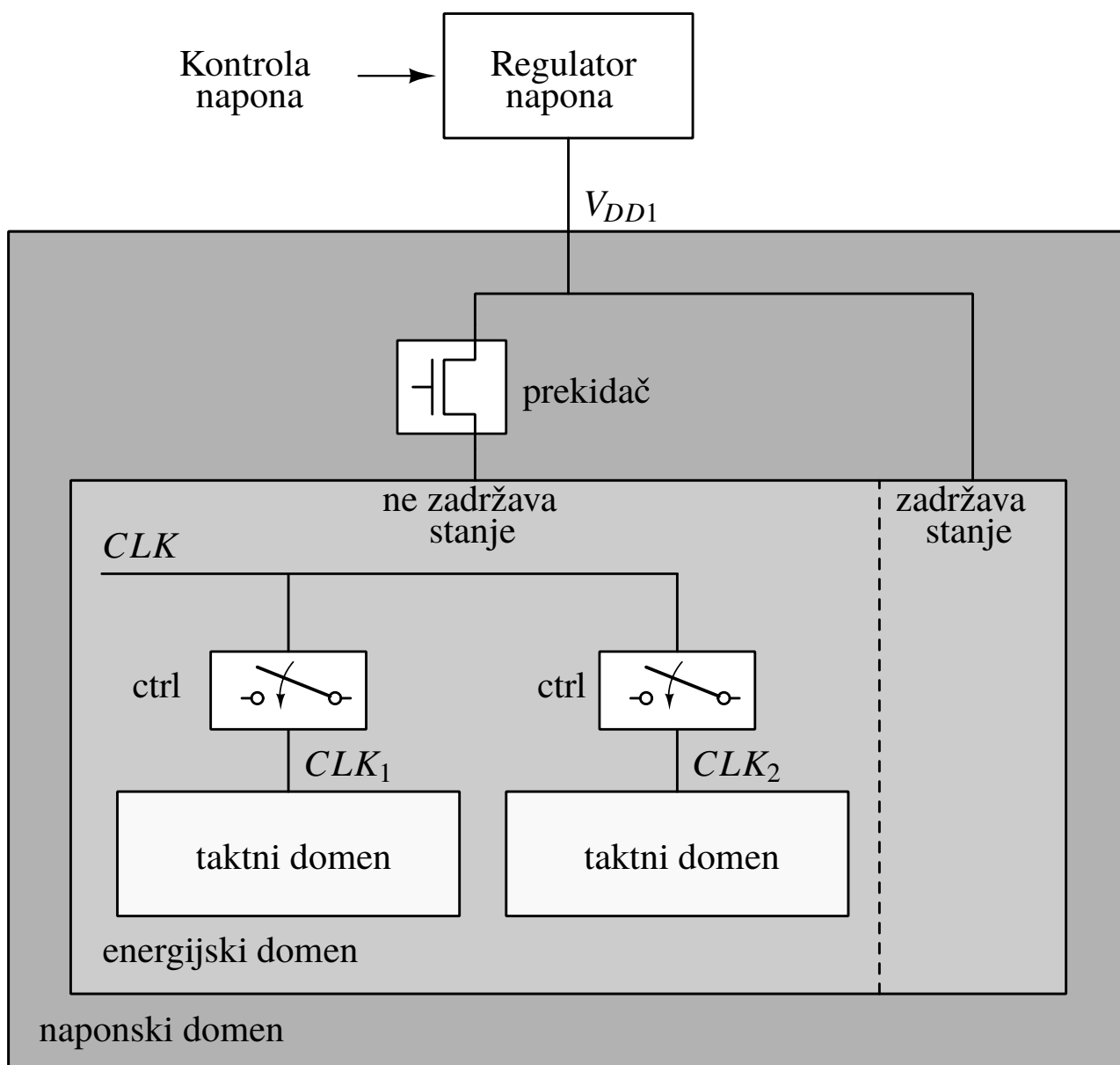
Prema izrazu (1.1), sa povećanjem radne učestanosti raste i potrošnja. Posledica toga je da performanse procesora u sistemu na čipu ne mogu neograničeno da se povećavaju povećanjem učestanosti zbog konačne disipacije koju komponenta može da trpi. Umesto povećanja učestanosti, dodavanjem procesorskih jezgara u sistem moguće je postići povećanje performansi. U tom slučaju, prostor za optimizaciju potrošnje i performansi postoji tako što se u sistemu na čipu koriste procesorska jezgra različitih karakteristika. Razlika u karakteristikama može biti od korišćenja različitih proizvodnih procesa za procesorska jezgra prilagođena za performanse i procesorska jezgra prilagođena za potrošnju, do korišćenja potpuno različitih procesorskih jezgara za različite namene.

Kombinovanje procesorskih jezgara različitih karakteristika potrošnje i performansi je izuzetno popularno u aplikacionim sistemima na čipu koji se koriste za mobilne telefone. Na primeru ARM procesorskih jezgara, tehnologija *big.LITTLE* omogućava upravljanje procesorskim jezgrima različitih karakteristika koja su grupisana u klaster na osnovu toga da li su optimizovana za performanse ili potrošnju. U jednom trenutku aktivan je samo jedan klaster, a operativni sistem ima mogućnost za prebacivanje konteksta izvršavanja sa jednog klastera na drugi.

Druga varijanta korišćenja više procesorskih jezgara, koja je takođe često zastupljena kod sistema na čipu koji koriste aplikacione procesore, jeste da se pored aplikacionog procesorskog jezgra, koje troši dosta energije, stavlja i mikrokontrolersko jezgro koje znatno manje troši i omogućava podršku za rad u realnom vremenu. U tom slučaju, kada su potrebne performanse, onda se koristi aplikaciono procesorsko jezgro, a kada sistem treba da smanji energiju koja se koristi, isključuje se aplikaciono procesorsko jezgro i ostaje da radi samo mikrokontrolersko jezgro. Na primeru AM335x SoC koji se koristi u BeagleBone Black razvojnom sistemu, u okviru sistema na čipu koriste se Cortex-A8 aplikaciono jezgro koje može da radi na učestanosti do 1 GHz, dva RISC procesorska jezgra na učestanosti od 200 MHz koja mogu da se koriste kao programabilni akceleratori i za rad u realnom vremenu, i Cortex-M3 mikrokontrolersko jezgro čija je uloga optimizacija potrošnje.

Kod mikrokontrolera, primer je NXP LPC541xx serija, gde je ARM Cortex-M0+ jezgro ukombinovano sa Cortex-M4F jezgrom. Cortex-M0+ jezgro ima manju potrošnju i performanse, pa je on namenjen za manje zahtevan procesorski posao, dok se Cortex-M4F jezgro, kao i oba jezgra istovremeno, koristi kada ima mnogo posla i kada je posao procesorski zahtevan.

Pored standardnih tehnika za smanjenje potrošnje prilikom dizajna, postoje i primeri tehnika koje vrše upravljanje dostupnim komponentama u cilju smanjenja potrošnje nezavisno od softvera,



Slika 1.5: Hijerarhijska organizacija naponskih, energijskih i taktnih domena u sistemu na čipu

poput adaptivnog skaliranja napona (eng. *Adaptive voltage scaling*) [30] i dinamičke kontrole napona praga tranzistora (eng. *Dynamic threshold voltage control*) [23, 32]. Adaptivno skaliranje napona je ekstenzija skaliranja napona i učestanosti gde postoji specijalizovana komponenta koja kontroliše podešavanja napona i učestanosti u zavisnosti od potreba pojedinih naponskih domena. Upotrebom hardverskog modula umesto softvera postiže se brži odziv i pouzdaniji rad. Dinamička kontrola praga tranzistora je tehnika kojom se podešava vrednost praga vođenja tranzistora tako da se napravi odgovarajući kompromis između struje curenja i brzine rada.

1.1.2 Tehnike za smanjenje potrošnje u toku rada

Cilj primene tehnika za smanjenje potrošnje u toku rada jeste da se omogući što duži rad senzorskog čvora do trenutka pražnjenja baterije. Na osnovu tabela 1.2, 1.3, 1.4 mogu da se donešu određeni zaključci o organizaciji rada sistema u cilju smanjenja potrošnje:

- čvor treba da provodi što više vremena u režimu smanjene potrošnje,

- komunikaciju između čvorova treba organizovati tako da radio interfejs može da bude isključen najveći deo vremena,
- senzore treba uključivati samo po potrebi.

Na tim principima su i bazirane tehnike za smanjenje potrošnje u toku rada. Tehnike su implementirane u okviru softvera procesorskog sistema i mogu da se podele na tehnike na nivou senzorskog čvora i na tehnike na nivou mreže.

1.1.2.1 Tehnike za smanjenje potrošnje na nivou senzorskog čvora

Tehnike za smanjenje potrošnje na nivou senzorskog čvora mogu da doprinesu uštedi energije na račun redukovanih performansi komponenti ili tako što isključuju komponente koje se ne koriste.

Dinamičko skaliranje učestanosti i napona Od tehnika za smanjenje potrošnje na nivou čvora ističe se dinamičko skaliranje učestanosti i napona (eng. *Dynamic Voltage and Frequency Scaling* - DVFS) [33]. DVFS omogućava uštedu energije smanjenjem radne učestanosti i radnog napona. Primena DVFS tehnike dovodi do redukovanih performansi sistema. U kontekstu sistema za rad u realnom vremenu, smanjenjem radne učestanosti procesora produžava se vreme izvršavanja taskova. Samim tim, usled ograničenog vremena za izvršavanje taskova kao i postojanja roka za izvršenje taskova, primena DVFS je ograničena na domen u kojem se svaka instanca dostupnih taskova na sistemu izvršava. Zbog vremena koje je potrebno da se stabilizuje izlaz izvora takta, nije moguća česta promena učestanosti [34].

U zavisnosti od toga kada se vrši skaliranje, algoritmi koji koriste DVFS tehniku mogu da se podele na algoritme koji skaliranje vrše u toku izvršavanja taskova (eng. *intratask* DVFS) i one koji skaliranje vrše između izvršavanja taskova (eng. *intertask* DVFS) [35].

Algoritmi koji DVFS tehniku koriste tako da se skaliranje primenjuje u toku izvršavanja instanci taska, na početku izvršavanja instance taska postavljaju nižu učestanost procesora. Kako se bliži rok za završetak izvršavanja taska, tako se povećava učestanost rada procesora, da se ne bi prekoračio rok za izvršenje taska (eng. *deadline*) [36].

Algoritmi koji DVFS tehniku koriste tako da se skaliranje primenjuje između izvršavanja taskova [37–40] učestanost rada procesora se podešava pre početka izvršavanja instance taska. Učestanost se bira u skladu sa vremenom potrebnim za izvršavanje instance taska i preostalog slobodnog vremena za izvršavanje na procesoru. Kada se podesi učestanost, ne menja se dok se ne završi izvršavanje instance taska. Pošto je u ovom slučaju skaliranje učestanosti i napona između izvršavanja instanci taskova sinhronizovano sa raspoređivanjem u operativnom sistemu, DVFS koji se primenjuje između izvršavanja taskova često se koristi kao deo algoritma za raspoređivanje ili u algoritmima za optimizaciju potrošnje i performansi.

Reprezentativni algoritam za DVFS koji se primenjuje između izvršavanja taskova je algoritam za upotrebu viška vremena (eng. *slack time reclamation*). Ovaj algoritam upravlja neaktivnim vremenom za raspoređivanje periodičnih taskova [35] ili mešavine periodičnih i aperiodičnih taskova [41]. Algoritam za upotrebu viška vremena prvo određuje statičko raspoređivanje taskova tako da sve instance taskova stignu da se izvrše u zadatom vremenu. Procena vremena izvršavanja pojedinačnih instanci taskova vrši se na osnovu određenog najgoreg vreme izvršavanja (eng. *Worst-Case Execution Time* - WCET) za svaki task. Pošto WCET predstavlja konzervativnu procenu, stvarno izvršavanje taska može da traje kraće od tog vremena. U toku rada sistema, kada se neki task izvrši, vreme koje preostane između vremena završetka i WCET predstavlja višak vremena (eng. *slack*) i može da se

iskoristi za izvršavanje drugih taskova. Preostali taskovi onda mogu da se izvršavaju na nižoj radnoj učestanosti procesora, čime se štedi energija, a da ne prekorače rok za izvršenje taska.

Dinamička optimizacija potrošnje Za razliku od DVFS tehnike, koja uštedu energije postiže redukovanjem performansi komponenti, tehnike koje spadaju u klasu dinamičke optimizacije potrošnje (eng. *Dynamic Power Management* - DPM) [42, 43] uštedu energije postižu isključivanjem komponenti koje se trenutno ne koriste. Na taj način se eliminiše statička potrošnja komponenti. Međutim, nedostatak je što je potrebno određeno vreme da bi se komponenta uključila i vratila u aktivno stanje, odnosno mogla da se koristi.

Zato mora da se vodi računa o tome kada komponenta sme da se isključi, da ne bi došlo do degradacije performansi. Konkretno, ukoliko task treba da pristupi komponenti koja je trenutno isključena, onda task mora prvo da čeka dok komponenta ne postane spremna za korišćenje, čime se javlja kašnjenje u izvršavanju i rizik da task probije rok za izvršavanje. Može da se definiše granično vreme (eng. *Break-even time* - T_{BE}) [42] kao minimalno vreme koje komponenta treba da bude neaktivna da bi se kompenzovalo vreme koje je potrebno da se komponenta isključi i uključi i potrošnja do koje dolazi prilikom isključenja i uključivanja komponente

$$T_{BE} = \begin{cases} T_{TR} + T_{TR} \frac{P_{TR} - P_{ON}}{P_{ON} - P_{OFF}}, & \text{if } P_{TR} > P_{ON} \\ T_{TR}, & \text{if } P_{TR} \leq P_{ON} \end{cases} \quad (1.3)$$

U izrazu (1.3) član T_{TR} predstavlja ukupno vreme tranzicija, koje uključuje vreme koje je potrebno da se komponenta isključi i uključi

$$T_{TR} = T_{ON,OFF} + T_{OFF,ON}, \quad (1.4)$$

a P_{TR} predstavlja ukupnu potrošnju u toku tranzicija

$$P_{TR} = \frac{T_{ON,OFF}P_{ON,OFF} + T_{OFF,ON}P_{OFF,ON}}{T_{TR}}. \quad (1.5)$$

S obzirom da vreme kada će komponenta ponovo biti u upotrebi nije unapred poznato, kao i da li će to vreme biti veće od T_{BE} , razvijeni su različiti pristupi za odlučivanje o primeni tehnika DPM. Najčešće korišćena metoda je prosta tehnika čekanja (eng. *timeout*), koja je zbog svoje jednostavnosti u upotrebi u svim standardnim operativnim sistemima. Kod tehnike čekanja uvodi se pretpostavka da ako je komponenta neaktivna određeno vreme T_T ($T_T \geq T_{BE}$), da će biti neaktivna još najmanje toliko vremena. Postupak rada tehnike je sledeći:

1. dok se komponenta koristi (aktivna je), čeka se da komponenta prestane da se koristi (postane neaktivna);
2. kada komponenta prestane da se koristi, kreće se sa merenjem vremena do isteka intervala T_T ;
3. ukoliko komponenta postane aktivna pre isteka vremena, zaustavlja se merenje vremena i vraća se na korak 1;
4. ukoliko komponenta ne bude aktivna do isteka vremena, pokreće se isključivanje komponente;
5. kada se komponenta ponovo uključi, vraća se na korak 1.

Nedostatak tehnike čekanja je što se troši energija dok se čeka istek vremenskog intervala. Takođe, prilikom prvog pristupa nakon isključenja komponente mora da se čeka dok komponenta ne postane

ponovo aktivna. Da bi se izbegli ovi problemi, razvijena su unapređenja u vidu prediktivnog isključenja (eng. *predictive shutdown*) i prediktivnog ponovnog uključenja (eng. *predictive wakeup*) [44].

Prediktivno isključenje koristi prethodne intervale aktivnosti komponente da bi predvidelo da li će sledeći interval neaktivnosti biti kraći ili duži od T_{BE} . Ukoliko se predviđa da će sledeći interval neaktivnosti biti duži od T_{BE} onda se komponenta odmah isključuje. Na taj način se eliminiše vreme čekanja. Međutim, u slučaju greške predviđanja gubi se energija. Ukoliko se predviđa da će interval biti duži od T_{BE} , a nije, onda mora da se sačeka da se komponenta prvo isključi do kraja pa onda ponovo uključi. Samim tim, task koji čeka da pristupi toj komponenti može da probije rok za izvršenje, čime se degradiraju performanse. Sa druge strane, ukoliko se predviđa da interval neaktivnosti neće biti duži od T_{BE} , a on jeste, onda se dobijaju performanse na nivou klasične tehnike čekanja.

Prediktivno ponovno uključenje koristi prethodne intervale aktivnosti da odredi kada treba da se pokrene uključenje komponente tako da bude spremna za rad kada stigne sledeći zahtev. U slučaju greške predikcije gde je predviđeno da će komponenta biti upotrebljena ranije nego što će stvarno biti, gubi se energija dok je komponenta u aktivnom režimu i čeka kada će biti upotrebljena. Ukoliko se predvidi uključenje kasnije nego što treba, onda mora da se čeka da se komponenta uključi pre nego što može da se koristi.

U DPM tehnike spada i isključivanje taktova i napona u skladu sa hijerarhijskom organizacijom u hardveru. U okviru softvera mogu da se kreiraju strukture u okviru kojih se prati stanje i korišćenje komponenti, takta i napona prema hijerarhijskoj organizaciji u hardveru. Na taj način, ukoliko su sve komponente koje pripadaju određenom taktom domenu isključene, odnosno ukoliko broj korisnika određenog taktnog signala postane jednak nuli, moguće je isključiti taj takti domen radi uštede energije. Takođe, ukoliko su svi taktovi koji pripadaju određenom energijskom domenu isključeni, moguće je isključiti taj energijski domen. Kod ove tehnike moguće je, takođe, primeniti principe prediktivnog isključenja i prediktivnog ponovnog uključenja koje se koriste kod tehnike čekanja, u cilju smanjenja vremena čekanja da komponente u okviru odgovarajućih domena budu uključene.

Nedostatak svih prikazanih tehnika za smanjenje potrošnje na nivou čvora je to što im je primena ograničena isključivo na domen u kojem ne dolazi do degradacije performansi. Na primer, u kontekstu sistema za rad u realnom vremenu, smatra se da je validan domen primene samo onaj u kojem se sve instance taskova izvršavaju u predviđenom vremenskom roku. To je posledica nepostojanja objektivne metrike za kvantifikaciju degradacije.

U teoriji sistema u realnom vremenu identifikovano je nekoliko tipova taskova po kritičnosti roka za izvršenje, što daje prostor za uvođenje metrike performansi. Taskovi mogu biti vremenski nekritični (eng. *soft*), uslovno vremenski kritični (eng. *firm*) i vremenski kritični (eng. *hard*). Kontrolisana degradacija performansi je moguća s obzirom da propuštanje roka za izvršavanje od strane vremenski nekritičnih i uslovno vremenski kritičnih taskova nije direktno povezano sa otkazom aplikacije.

Dodatno, identifikovano je nekoliko klasa aplikacija [45–49] gde degradacija performansi može da se toleriše. U aproksimativnom računarstvu (eng. *Approximate Computing*) [45] neke instance taska ili delovi taska mogu da se preskoče bez ugrožavanja funkcionalnosti sistema. Time se postiže ubrzanje rada i smanjenje potrošnje prilikom izvršavanja, uz minimalno smanjenje performansi [46]. Neprecizno računanje (eng. *Imprecise computation*) [47,48] deli taskove u obavezne i opcione delove. Obavezni delovi taska moraju da se izvrše svaki put, dok opcioni delovi mogu da se preskoče. Time je garantovano da će se rezultat izvršavanja uvek dobiti, dok je omogućeno da se napravi kompromis između potrošnje i preciznosti rezultata. U multimedijalnim aplikacijama [49] neki frejmovi mogu da se preskoče bez uticaja na sveukupni kvalitet rada sistema. Međutim, svim ovim klasama nedostaje sistematična i objektivna kvantifikacija degradacije performansi i mogućnost za odabir proizvoljnog stepena kompromisa između potrošnje i performansi.

Sa druge strane, postoje različiti načini za kvantifikovanje performansi aplikacije. Pošto je degra-

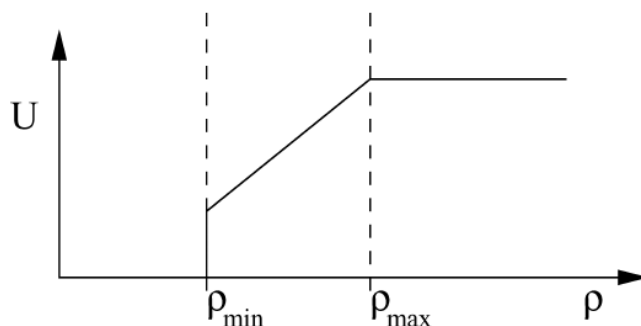
dacija performansi obrnuto proporcionalna performansama aplikacije, onda bi na osnovu te metrike moglo da se dođe do kvantifikacije degradacije performansi.

Kvantifikovanje nivoa performansi može da se izvrši na osnovu subjektivnog osećaja korisnika, pomoću anketa [50]. Jedan problem kod ovog pristupa je pouzdanost podataka, čiji značaj može da se umanjuje velikom bazom korisnika i naknadnom obradom podataka. Drugi problem, mnogo važniji za samu primenu, je to što je ovaj pristup nepraktičan jer procenu performansi nije moguće odrediti u toku rada.

Mnogo praktičnije je kvantifikovanje performansi aplikacije na osnovu objektivne metrike. Korišćenjem objektivne metrike moguća je procena performansi u toku rada, što je preduslov za upotrebu u složenijim algoritmima za optimizaciju.

Objektivna metrika za kvantifikovanje performansi koja se često koristi je kvalitet usluge (eng. *Quality of Service* - QoS). Uglavnom se koristi da bi se definisao minimalan kvalitet usluge koji komponenta treba da pruži. Samim tim, sve dosadašnje primene su u domenu performansi gde je kvalitet usluge iznad definisanog minimuma.

U radu [51] predstavljena je metrika performansi kao funkcija potrošnje sistema, slika 1.6. Prema slici, funkcija zavisnosti performansi od potrošnje može da se podeli na tri regiona. Da bi sistem mogao da funkcioniše, potrebna je minimalna potrošnja ρ_{min} i tada su performanse P_{min} . U regionu između ρ_{min} i ρ_{max} performanse se skaliraju sa potrošnjom. Kada se dostigne potrošnja ρ_{max} performanse dostižu nivo P_{max} i dalje povećanje potrošnje ne doprinosi povećanju performansi. Ovakva metrika za kvantifikaciju performansi može da se iskoristi za jednostavne aplikacije.

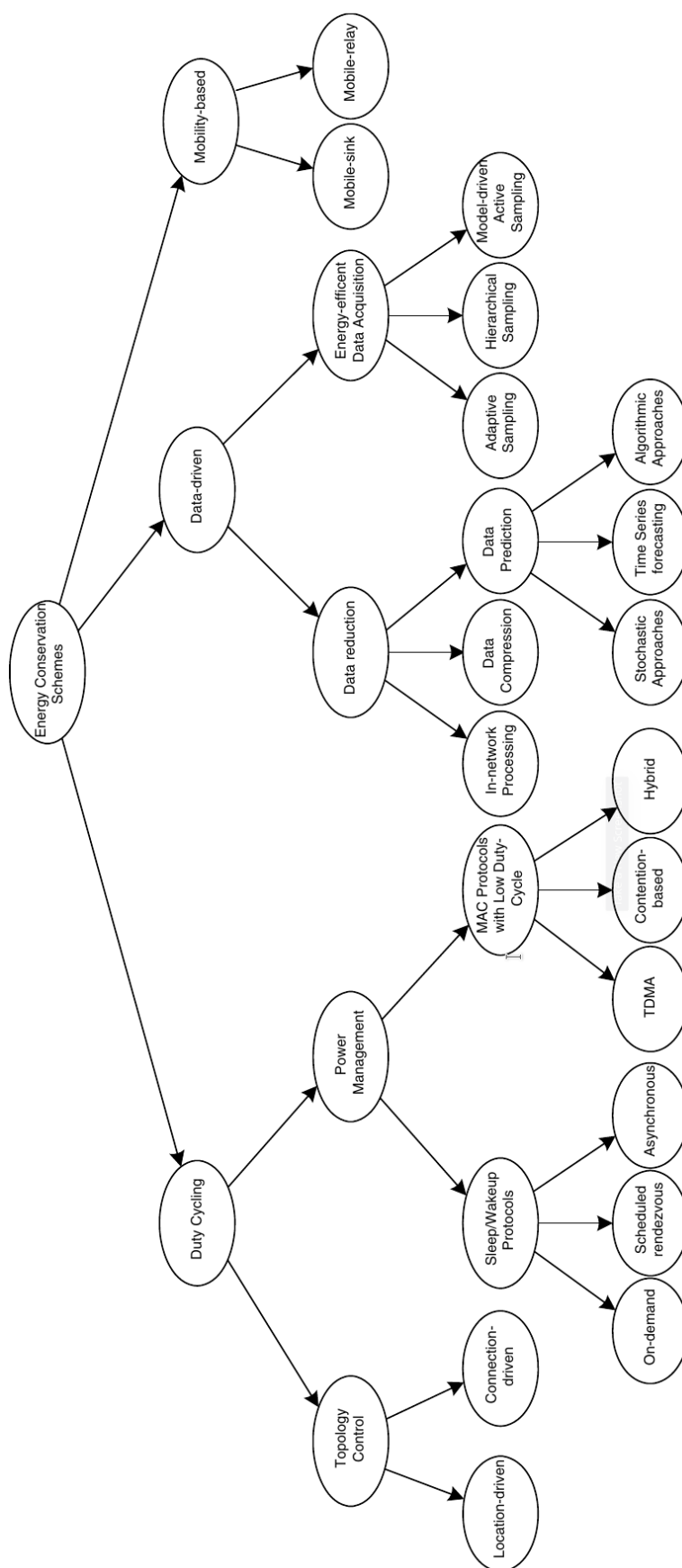


Slika 1.6: Relacija između potrošnje i performansi aplikacije (preuzeto iz [51, p. 17])

1.1.2.2 Tehnike za smanjenje potrošnje na nivou mreže

Tehnike za smanjenje potrošnje na nivou mreže zasnovane su na energetske efikasnim protokolima za rutiranje i MAC (eng. *Media Access Control*) sloju, klasterovanju ili upravljanju podacima [6,52,53], slika 1.7.

MAC protokoli Na osnovu tabele 1.3 radio interfejs je značajan potrošač u senzorskom čvoru. S obzirom da se komunikacija između bežičnih senzorskih čvorova ne vrši kontinualno već po potrebi, onda radio interfejs može da se prevede u režim smanjene potrošnje kada se ne koristi. Time se postiže značajna ušteda energije, ali se javlja problem sa sinhronizacijom između predajnika i prijemnika. Potrebno je obezbediti da merni čvor ili prenosni čvor znaju da treba da pošalju ili prime podatke u određenom trenutku. Da bi se rešio taj problem, koriste se različiti protokoli na MAC sloju, koji mogu da se podele na sinhronu, pseudo-sinhronu i asinhronu [54].



Slika 1.7: Tehnike za optimizaciju potrošnje na nivou mreže kod bežičnih senzorskih čvorova (preuzeto iz [6, p. 540])

Sinhroni MAC protokoli podrazumevaju da se merni čvor periodično budi i vrši komunikaciju [55]. Ako treba da primi ili pošalje podatke, onda to radi u tom intervalu. Nedostatak ovakvog pristupa jeste što vremenske reference na prijemu i predajniku trebaju da budu adekvatno sinhronizovane. Prednost je što raspored komunikacije prijemu (prenosni ili pristupni čvor) može centralizovano da odredi, čime se eliminiše problem kolizije.

Kod pseudo-sinhronih MAC protokola postoje dve varijante: inicirane od strane predajnika i od strane prijema [56–58]. U oba slučaja se i predajnik i prijemu periodično bude. Ako predajnik inicira komunikaciju, onda on nakon buđenja šalje preambulu i čeka da se javi odgovarajući prijemu. Ukoliko se prijemu ne javi u predefinisanim intervalu, predajnik se vraća u režim smanjene potrošnje neko vreme, pa ponovo pokreće komunikaciju. Ukoliko komunikaciju inicira prijemu, onda on po buđenju šalje naznaku (eng. *beacon*) da je spreman da primi podatke. Zatim čeka određeni vremenski interval da krenu da pristižu podaci od predajnika, nakon čega se ponovo vraća u režim smanjene potrošnje.

Asinhroni MAC protokoli se zasnivaju na postojanju dodatnog RF interfejsa manje snage i potrošnje. Uloga tog RF interfejsa jeste da detektuje početak komunikacije i probudi mikrokontroler. Mikrokontroler nakon toga uključuje glavni radio interfejs, da bi komunikacija mogla da se izvede [54]. Primenom dodatnog RF interfejsa male snage omogućava se da glavni radio interfejs bude u režimu smanjene potrošnje kad god se ne koristi, bez potrebe za dodatnom sinhronizacijom i komunikacijom između predajnika i prijema, čime se postiže maksimalna ušteda energije.

LEACH Kod senzorskih mreža organizovanih u vidu mrežaste ili hijerarhijske topologije postoji disbalans u opterećenju i potrošnji pojedinačnih čvorova. Naime, zbog toga što vrše i funkciju prikupljanja podataka i prenosa podataka od mernih čvorova ka predajnom čvoru, prenosni čvorovi imaju znatno veću potrošnju energije u odnosu na merne čvorove. Samim tim, baterija prenosnih čvorova se brže prazni od baterija mernih čvorova. Kada se baterija isprazni, taj prenosni čvor više ne može da prenosi podatke do pristupnog čvora. To predstavlja problem jer onda prestaju da pristižu i podaci od svih mernih senzorskih čvorova koje je opsluživao taj prenosni čvor.

Da bi se ublažio efekat disbalansa u potrošnji između mernih i prenosnih čvorova, razvijen je LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) algoritam [15], kao i različite modifikacije LEACH algoritma [59]. LEACH algoritam podrazumeva da svi čvorovi mogu da funkcionišu kao prenosni čvorovi. U toku rada mreže čvorovi naizmenično preuzimaju ulogu prenosnog čvora, tako da se ravnomerno troši energija svih čvorova. Na taj način može da se produži trajanje senzorske mreže. Pored dinamičkog izbora centra klastera, LEACH algoritam koristi i kompresiju podataka pre slanja radi dodatne uštede energije.

Upravljanje podacima Podaci koje merni senzorski čvorovi prikupljaju sa senzora dostavljaju se pristupnom čvoru. U zavisnosti od karakteristika merene veličine, kao i od dostupne energije i potrošnje radio interfejsa, razvijene su različite tehnike kojima se upravlja podacima u cilju smanjenje potrošnje [60–62].

Radio interfejs je veliki potrošač energije i potrebno je smanjiti vreme aktivnog rada.

Kompresija podataka Jedna tehnika čiji je cilj da se smanji trajanje slanja podataka od mernog ka pristupnom čvoru je kompresija podataka. Kompresijom se smanjuje količina podataka koja se šalje, uz određene gubitke po pitanju kvaliteta podataka.

Agregacija podataka Agregacija podataka omogućava da se smanji broj perioda komunikacije tako što se mereni podaci sa istog područja agregiraju i dalje šalju kao izmerena veličina. Na taj način ukoliko više senzorskih čvorova na istom području ima senzore koji mere istu veličinu, komunikacija ne mora u svakom trenutku da se odvija sa svim mernim čvorovima.

Ukoliko senzori predstavljaju značajan potrošač u sistemu, onda se koriste odgovarajuće tehnike radi uštede energije.

Adaptivno uzorkovanje Adaptivno uzorkovanje omogućava da se u toku rada menja učestanost očitavanja senzora. Ukoliko merena veličina ima spori trend promene, onda se periodi očitavanja senzora proređuju, dok se u trenucima kada su promene dinamičnije onda se češće vrši očitavanje.

Predviđanje merene vrednosti Dodatno, moguće je da u okviru senzorskih čvorova bude modelovano ponašanje fizičke veličine koja se meri. Na taj način moguće je predvideti vrednosti veličine koja se meri. Korišćenjem predviđanja moguće je skroz eliminisati periodično očitavanje senzora, već samo u određenim trenucima očitati senzor radi provere kvaliteta predviđanja i, ukoliko dođe do značajnih odstupanja, ažurirati model.

Višestepeno merenje Ukoliko ima više senzora različite rezolucije, očitavaju se niske pa ako dođe do promene, onda se uključuju veći potrošači.

1.2 Prikupljanje energije iz okoline (eng. *Energy Harvesting*)

Primenom tehnika za smanjenje potrošnje, kao i povećanjem kapaciteta baterija moguće je produžiti period funkcionisanja senzorskog čvora do trenutka pražnjenja baterije. Međutim, koliko god da su tehnike za smanjenje potrošnje efikasne, usled konačnog kapaciteta baterije, u nekom trenutku baterija će se isprazniti. To predstavlja problem zato što zamena baterije može biti teško izvodljiva ili čak i nemoguća, u zavisnosti od broja postavljenih senzorskih čvorova ili lokacije gde su ti čvorovi postavljeni.

Prikupljanje energije iz okoline (eng. *Energy harvesting*) predstavlja potencijalno rešenje za problem konačnog kapaciteta baterija. Dostupni su različiti izvori energije: solarna energija, energija vetra, RF zračenja, mehaničkih pokreta, toplote (slika 1.8).

1.2.1 Pregled dostupnih izvora za prikupljanje energije iz okoline koji se koriste u bežičnim senzorskim čvorovima

Solarna energija Dostupna je svugde u prirodi i samim tim ima veliki potencijal za korišćenje. Kod bežičnih senzorskih čvorova solarni paneli se koriste za konverziju solarne u električnu energiju. Efikasnost konverzije sunčeve u električnu energiju solarnih panela je 15-25% [63]. Količina energije koja može da se dobije zavisi od

- površine solarnog panela,
- količine solarne radijacije koja pada na panel,

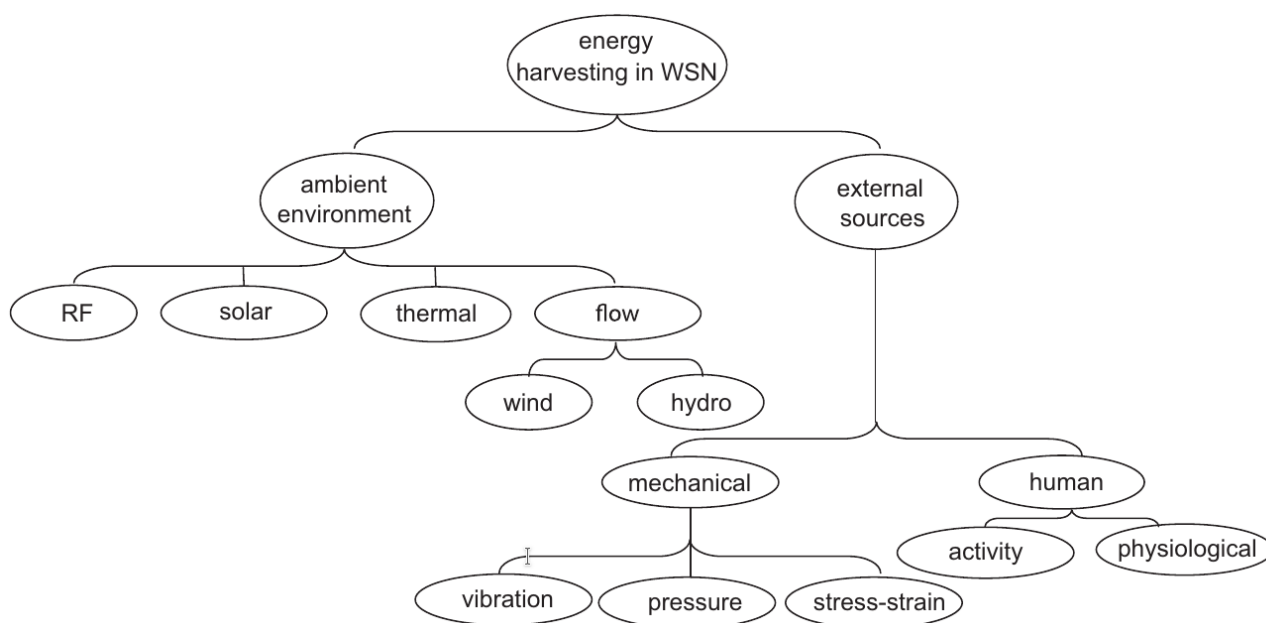
- lokacije na kojoj je panel postavljen (geografska pozicija, ugao u odnosu na zemljinu površinu i strana sveta ka kojoj je okrenut)
- temperature okoline

Solarna energija iskazuje periodičnost na osnovu solarnog dnevnog ciklusa, pa je samim tim pogodna za predviđanje. Nedostatak je što solarnog zračenja nema tokom noći, pa je potrebno obezbediti da se energija skladišti tokom sunčanih sati da bi mogla da se koristi preko noći.

Na istom principu konverzije energije osvetljenja u električnu energiju pomoću solarnih panela postoje i implementacije bežičnih senzorskih mreža koje se koriste u unutrašnjosti objekata. S obzirom da je količina energije koja se dobija od veštačkog osvetljenja znatno manja od energije koja može da se dobije od sunca, primena takvih sistema je ograničena. Međutim, ipak se nalazi primena u bolnicama ili industrijskim postrojenjima koja su dobro osvetljena, gde inače ima više svetlosti nego u standardnim enterijerima [63].

Energija vetra Dostupnu energiju vetra je, za razliku od solarne energije, teže predvideti. Za konverziju energije vetra u električnu energiju koriste se vetroturbine. Količina energije koja može da se dobije proporcionalna je brzini vetra i veličini pera na rotoru vetroturbine. To ujedno predstavlja i ograničenje u primeni energije vetra za bežične senzorske čvorove, pošto su dimenzije vetroturbine značajno veće od dimenzija ostatka senzorskog čvora. Mana je pokretni mehanički deo, koji predstavlja mogućnost za kvar.

Energija RF zračenja Zasniva se na konverziji zračenja radio talasa u električnu energiju. Radio talasi su dostupni sa različitih izvora zračenja: signali mobilne mreže, radio i televizijskih stanica. Međutim, najveću primenu je našla u RFID (*Radio-Frequency Identification*) i NFC (*Near-Field Communication*) komunikaciji. Pošto su RFID sistemi prilično zastupljeni u sajberfizičkim sistemima, veoma je aktuelno pasivno korišćenje RF energije. RFID kartice za pristup i identifikaciju, razmenu podataka, beskontaktnog plaćanja. Intenzitet prikupljene energije je relativno mali, tako da sistemi koji prikupljaju RF energiju uglavnom ne skladište tu energiju, već je odmah koriste.



Slika 1.8: Taksonomija izvora za prikupljanje energije iz okoline (preuzeto iz [63, p. 1044])

Energija mehaničkih pokreta Energija mehaničkih pokreta, poput vibracija, pritiska i istezanja može da se konvertuje u električnu energiju pomoću elektromagnetnog, elektrostatičkog ili piezoelektričnog principa. Kod elektromagnetnog principa, usled vibracija dolazi do pomeranja magneta u magnetnom polju, čime se proizvodi električna energija. Elektrostatički princip je zasnovan na kondenzatorskim pločama koje se usled pomeraja približavaju i odaljavaju, čime dolazi do promene električnog polja i kretanja naelektrisanja. Piezoelektrični princip na osnovu vibracija generiše energiju.

Izvori energije mehaničkih pokreta dodatno mogu da se podele na ambijentalne i vezane za ljudsko delovanje. Ambijentalni izvori nastaju kao posledica rada mašina ili strukturnih elemenata. Primena senzorskih mreža koje se napajaju sa ambijentalnih izvora energije mehaničkih pokreta uglavnom je usmerena ka praćenju stabilnosti u radu. Prikupljanje energije vibracija na osnovu ljudskog delovanja koristi to što je ljudski pokret voljan i ima određeni intenzitet, pa rezultat tog delovanja konvertuje u energiju. Razvijene su različite primene [64,65] od korišćenja kretanja kao i disanja. Mana izvora koji prikupljaju energiju mehaničkih pokreta je što postoje pokretni delovi, koji predstavljaju mogućnosti za kvar.

Toplotna energija Prikupljanje toplotne energije zasnovano je na Seeback principu [66]. Ukoliko postoji razlika u toploti između dve poluprovodničke strukture dolazi do pojave elektromotorne sile. Ta elektromotorna sila je većeg intenziteta što je veća razlika u temperaturi. Dosta se koristi u zgradama, industriji, ali i u ljudskom delovanju, gde je kao rezultat mnogih akcija nusproizvod toplota. Prednost je što nema pokretnih delova, ali je mana mala efikasnost.

Analiza dostupnih izvora Svi izvori energije iz okoline mogu da se okarakterišu na osnovu predvidljivosti i kontrolabilnosti, tabela 1.5. Na primer, solarna energija može da se predvidi, na osnovu dnevnog solarnog ciklusa, ali ne može da se kontroliše. Takođe, u tabeli 1.5 navedene su i mogućnosti za prikupljanje energije svakog od izvora, u vidu prosečne snage po jedinici mere, gde se vidi da solarna energije ima najveći potencijal. U daljem razmatranju fokus je na solarnoj energiji.

Tabela 1.5: Pregled karakteristika izvora energije iz okoline [23, 57, 63, 67]

Izvor	Predvidljivost	Kontrolabilnost	Gustina energije
solarna energija - napolju	da	ne	15 mW/cm ² (vedar dan)
	da	ne	0.15 mW/cm ² (oblačan dan)
solarna energija - unutra	da	ne	6 μW/cm ²
energija vetra	da	ne	65.2 μW/cm ³ (5 m/s)
mehanička (piezoelektrična konverzija)	ne	da	330 μW/cm ² (koraci)
mehanička (elektromagnetna konverzija)	ne	da	0.2 mW/cm ² (ambijentalno)
RF energija	da	da	0.08 nW-1 μW/cm ³
toplotna energija	ne	da	40 μW/cm ² (10° C gradijent)

1.2.2 Skladištenje prikupljene energije iz okoline

Energija koja se prikupi iz okoline služi za napajanje senzorskog čvora. Ukoliko postoji višak prikupljene energije, trebalo bi ga uskladištiti da bi mogao da se koristi kada količina prikupljene energije nije dovoljna za napajanje senzorskog čvora. Za skladištenje energije u bežičnim senzorskim čvorovima najčešće se koristi neka vrsta baterije, superkondenzator ili i jedno i drugo.

Karakteristike skladišta energije obuhvataju sledeće parametre:

Nominalni napon predstavlja napon elementa za skladištenje kada je napunjen. U zavisnosti od ciljne primene, potrebna je različita vrednost napona. Takođe, uglavnom je moguće serijsko povezivanje elemenata za skladištenje u cilju povećanja nominalnog napona.

Broj ciklusa pražnjenja se odnosi na broj pražnjenja od 100% do 0% koje element za skladištenje može da izdrži. Što se više puta skladište isprazni i napuni, dolazi do degradacije kapaciteta zbog interne hemijske strukture.

Gustina energije se odnosi na količinu energije koju element može da uskladišti po jedinici mere zapremine. Što je veća gustina energije koju element može da uskladišti, to manja veličina može da se koristi.

Brzina samopražnjenja pokazuje koliko brzo element za skladištenje gubi uskladištenu energiju kada se ne koristi. Što je manja vrednost, to element za skladištenje duže može da se koristi.

U zavisnosti od tehnologije izrade baterije, razlikuju se različite realizacije. Baterije izrađene u nikel-kadmijum (NiCD) i nikel-metal-hidrid (NiMH) tehnologiji su inicijalno dosta korišćene. Glavni nedostatak ovih baterija jeste memorijski efekat, odnosno drastičan gubitak kapaciteta ukoliko se redovno ne sprovode ciklusi potpunog pražnjenja i punjenja baterije. U skorije vreme sve više su zastupljene litijum-jonske (Li-Ion) i litijum-polimer (Li-Po) baterije. Pogodne su zbog velike gustine energije, kao i zbog nepostojanja memorijskog efekta. Međutim, velika mana im je osetljivost na preterano pražnjenje. Ukoliko dođe do toga da se baterija isprazni na 0% postoji rizik da se ošteti. Takođe, prilikom pražnjenja i punjenja potrebno je voditi računa o temperaturi baterije pošto povećanje temperature može da dovede do oštećenja baterije. Za punjenje baterija potrebno je koristiti specijalizovane punjače, sa različitim režimima rada i zaštitom za prepunjavanje i pregrevanje.

Sa druge strane, superkondenzatori su aktuelni za primenu u senzorskim čvorovima. Prednost im je što mogu da izdrže veoma veliki broj ciklusa pražnjenja, ne pate od memorijskog efekta, niti na njih utiče pražnjenje do 0% kapaciteta. Jedina mana je izražena brzina samopražnjenja.

U tabeli 1.6 prikazane su karakteristike dostupnih elemenata za skladištenje energije.

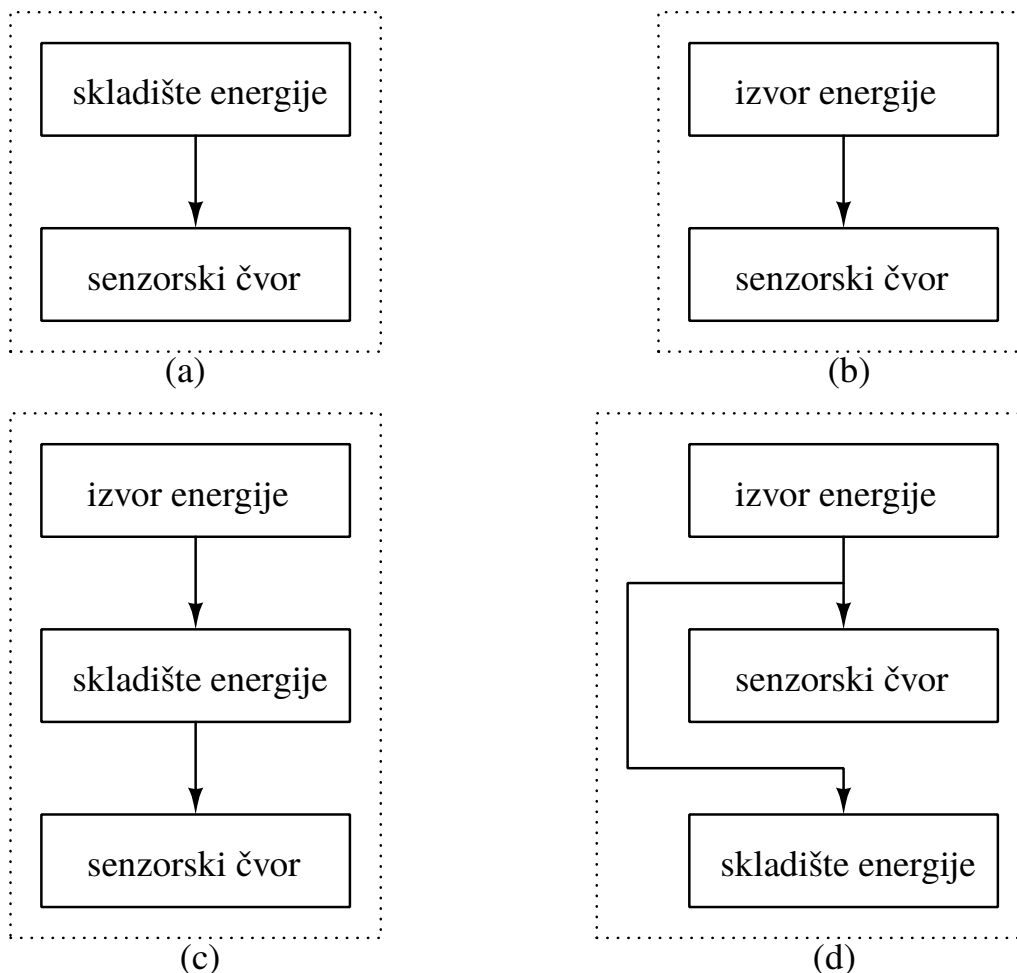
Tabela 1.6: Pregled elemenata za skladištenje energije koji se koriste u bežičnim senzorskim čvorovima [52, 56]

Parametar	NiCD	NiMH	Li-jon	Li-polimer	Superkondenzator
Nominalni napon [V]	1.2	1.2	3.6	3.6	2.7
Broj ciklusa pražnjenja	1500	900	1300	500–1000	$> 10^6$
Gustina energije [Wh/kg]	42	100	165	156	2–6
Brzina samopražnjenja [%/mesecu]	10	18	5	1-2%	5.9%/dan

U zavisnosti od organizacije sistema za prikupljanje, skladištenje i korišćenje energije, razlikuju se četiri varijante organizacije sistema [68]

- skladištenje-korišćenje (eng. *Store-Use* - SU),
- prikupljanje-korišćenje (eng. *Harvest-Use* - HU),
- prikupljanje-skladištenje-korišćenje (eng. *Harvest-Store-Use* - HSU),
- prikupljanje-korišćenje-skladištenje (eng. *Harvest-Use-Store* - HUS).

Šematski prikazi navedenih organizacija dati su na slici 1.9.



Slika 1.9: Organizacija sistema za prikupljanje energije iz okoline u zavisnosti od toga da li se i na koji način koristi element za skladištenje energije: (a) skladištenje-korišćenje; (b) prikupljanje-korišćenje; (c) prikupljanje-skladištenje-korišćenje; (d) prikupljanje-korišćenje-skladištenje.

Osnovna varijanta skladištenje-korišćenje, SU, (slika 1.9a) predstavlja organizaciju koja je zastupljena kod baterijski napajanih sistema koji nemaju mogućnost prikupljanja energije iz okoline. Dakle energija koja je dostupna za rad je energije koja se nalazi u skladištu. Kada se isprazni skladište energije, sistem prestaje sa radom.

Kod varijante prikupljanje-korišćenje, HU, (slika 1.9b), energija koja se prikuplja koristi se isključivo za napajanje senzorskog čvora, odnosno ne postoji mogućnost skladištenja. Samim tim, kada prestane prikupljanje energije, ili trenutno prikupljanje nije dovoljno za funkcionisanje senzorskog čvora, senzorski čvor prestaje da radi. Ovakva organizacija je pogodna za prikupljanje RF energije i energije mehaničkih pokreta, gde je količina prikupljene energije mala i bilo kakva konverzija bi dovela do nepotrebnih gubitaka.

Ukoliko je sistem organizovan u vidu prikupljanje-skladištenje-korišćenje, HSU, (slika 1.9c), onda postoji skladište energije. Skladište može biti organizovano u vidu jednog stepena, gde se koristi baterija ili superkondenzator, ili u vidu dva stepena, gde se uglavnom koriste i baterija i superkondenzator [69]. Uloga superkondenzatora jeste da kompenzuje iznenadne zahteve za energijom od strane potrošača, dok baterija služi kao postojeće skladište. U sistemu su prisutni gubici usled konverzije energije, ali sistem može da se napaja i kada nema generisanja energije.

Varijanta prikupljanje-korišćenje-skladištenje, HUS, (slika 1.9d), sastoji se iz istih elemenata kao i HSU. Za razliku od HSU, koje prvo skladišti energiju, kod HUS se energija koja se prikuplja se prvo koristi za napajanje senzorskog čvora, a višak se čuva u skladištu [70]. Na taj način, prilikom prikupljanja energije maksimalne su performanse, a kada nema mogućnosti za prikupljanje energije koristi se uskladištena energija. Prednost HSU varijante jeste što omogućava algoritmu koji upravlja sistemom da odredi koliki udeo prikupljene energije će se trošiti a koliki prikupljati, kao i što nema gubitaka na konverziju energije od izvora do potrošača kada se prikuplja energija.

1.2.3 Konverzija energije

Potrebno je napomenuti da zbog različitih nivoa napona na izvoru, skladištu i potrošaču, potrebno je primeniti konverziju energije. U zavisnosti od stepena i tipa konverzije mogu se koristiti linearni regulator ili DC-DC konvertor.

Linearni regulator samo smanjuje napon, bez značajnog uticaja na struju. Efikasnost je određena prvenstveno odnosom između izlaznog i ulaznog napona.

Sa druge strane, DC-DC konvertori vrše konverziju energije. Smanjenjem napona od ulaza ka izlazu povećava se struja na izlazu, i obratno. Koriste se različite varijante DC-DC konvertora: Buck, Boost, Buck-Boost, kao i Čuk, SEPIC [52].

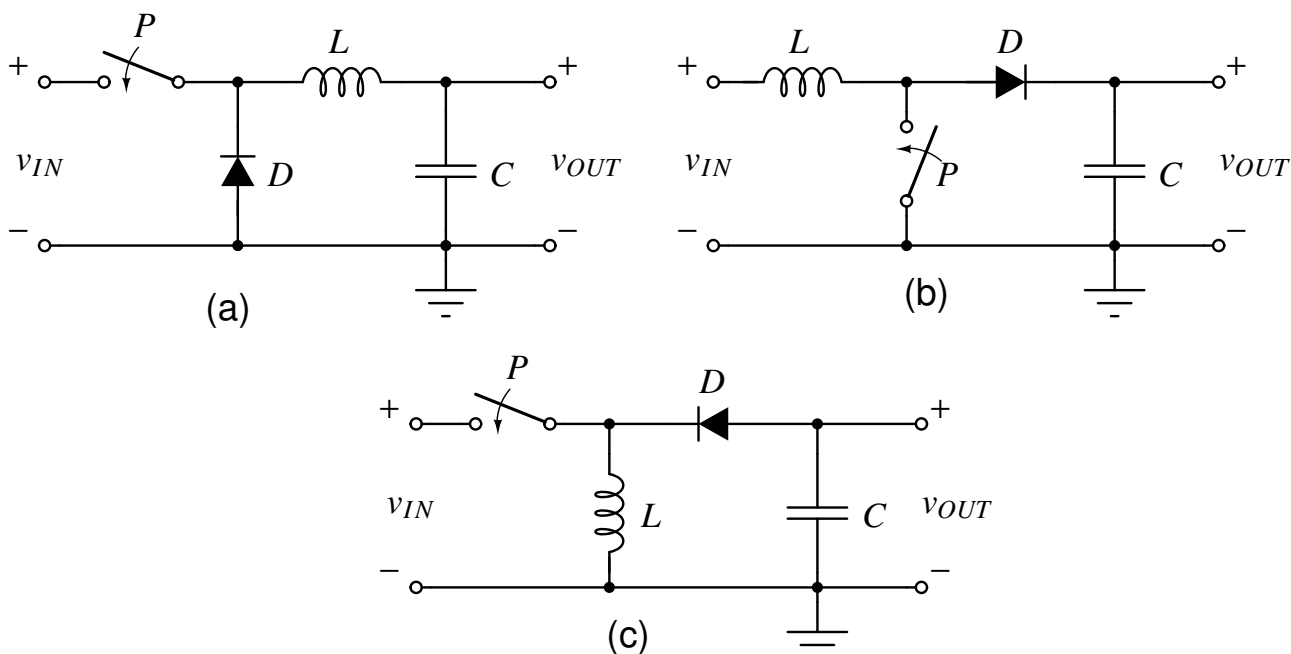
Buck služi isključivo za spuštanje napona i ima veliku efikasnost. Boost služi isključivo za podizanje napona i često se koristi u sistemima koji prikupljaju energiju iz okoline pošto dosta izvora daje nizak napon. Buck-boost može da radi i podizanje i spuštanje napona u zavisnosti od podešenog izlaznog napona, ali to dolazi po cenu manje efikasnosti.

1.2.4 Optimalna upotreba energije

U baterijski napajanim sistemima zasnovanim na organizaciji SU, optimizacija upotrebe energije se vrši radi produženja operativnosti senzorskog čvora do trenutka pražnjenja baterije, pri čemu je potrebno da se održi određeni nivo performansi. Kada je određen minimalan nivo performansi određeno je i maksimalno vreme operativnosti senzorskog čvora.

U sistemima koji su organizovani u vidu HU, optimizacija upotrebe energije se vrši radi ispunjenja željenog posla dok ima energije koja je prikupljena.

Za razliku od SU i HU sistema, gde je cilj optimizacije striktno određen količinom posla koji treba da se uradi, u sistemima koji koriste skladište energije (HSU ili HUS), cilj optimizacije potrošnje energije se postavlja kao optimalno raspoređivanje dostupne energije tako da se što više posla uradi, a da se pritom ne ugrozi operativnost sistema. Ovaj koncept se u literaturi naziva energetska neutralnost [51].



Slika 1.10: Primeri DC-DC konvertora: (a) Buck konvertor; (b) Boost konvertor; (c) Buck-Boost konvertor.

1.3 Cilj istraživanja i polazna hipoteza

Cilj ove disertacije je bio da se istraži mogućnost i predloži novi algoritam za optimizaciju potrošnje energije i performansi kod solarno napajanih bežičnih senzorskih čvorova koji obezbeđuje što veći stepen energetski neutralnog rada. Algoritam se sastoji iz tehnike za predviđanje solarne radijacije i algoritma za raspoređivanje dostupne energije koji uključuje i tehnike za smanjenje potrošnje. Potrebno je da tehnika za predviđanje ima odgovarajuće karakteristike i za kratkoročno kao i za dugoročno predviđanje dostupnosti sunčeve energije. Kada je u pitanju algoritam za raspoređivanje dostupne energije, potrebno je da može da obezbedi što veći stepen energetski neutralnog rada.

Polazne hipoteze su:

- Predviđanje solarne radijacije na osnovu podataka iz prethodnih vremenskih intervala pruža dobre rezultate za kratkoročno predviđanje, dok predviđanje na osnovu vremenske prognoze pruže dobre rezultate za srednjeročno i dugoročno predviđanje. Očekujemo da hibridni pristup, gde bi se kombinovala oba pristupa može da pruži dobre rezultate za kratkoročno, srednjeročno i za dugoročno predviđanje.
- Kvalitet predviđanja solarne radijacije kod predviđanja zasnovanog na vremenskoj prognozi zavisi od modela solarne radijacije koji se koristi za računanje solarne radijacije za vedar dan, pa je odabirom adekvatnog modela moguće unaprediti rezultate.
- Algoritam za raspoređivanje dostupne energije treba da uzima u obzir i trenutno dostupnu energiju kao i predviđenu vrednost energije koja će biti dostupna u budućnosti, kao i da primenom tehnika za smanjenje potrošnje utiče na performanse sistema.
- Moguće je opisati numerički degradaciju performansi sistema i razviti nove tehnike za smanjenje potrošnje koje omogućavaju kompromis između smanjenja potrošnje i degradacije performansi sistema, čime može da se postigne dodatna ušteda energije.

1.4 Rezultati i doprinos istraživanja

Glavni naučni doprinos ove disertacije je novi algoritam za optimizaciju potrošnje energije i performansi solarno napajanih bežičnih senzorskih čvorova koji omogućava što veći stepen energetske neutralnog rada. U okviru disertacije posebno su predstavljena dva aspekta algoritma: nova tehnika za predviđanje solarne energije i nova tehnika za kontrolu utilizacije zasnovana na uvedenoj metrici degradacije.

Doprinosi ove disertacije su:

- Pregled, sistematizacija i analiza postojećih tehnika za predviđanje dostupne energije i tehnika za smanjenje potrošnje energije.
- Nova tehnika za predviđanje dostupne solarne energije u budućnosti koja nudi kvalitetnu kratkoročno, srednjoročno i dugoročno predviđanje.
- Nova tehnika za smanjenje potrošnje koja omogućava selektivnu i kontrolisanu degradaciju performansi sistema za rad u realnom vremenu.
- Novi algoritam za optimizaciju potrošnje energije i performansi solarno napajanih bežičnih senzorskih čvorova koji integriše predložene tehnike i omogućava što veći stepen energetske neutralnog rada.

Rezultati istraživanja prikazani u doktorskoj disertaciji objavljeni su u sledećim publikacijama:

Kategorija M20 – Radovi objavljeni u naučnim časopisima međunarodnog značaja:

1. **S. Janković** and L. Saranovac, "Prediction of Harvested Energy for Wireless Sensor Node," *ELEKTRONIKA IIR ELEKTROTEHNIKA*, vol. 26, no. 1, pp. 23–31, Feb. 2020. doi: 10.5755/j01.eie.26.1.23807 (M23, IF 2018: 0.684)

Kategorija M30 – Zbornici međunarodnih skupova:

1. **S. Janković** and L. Saranovac, "Improving Energy Usage in Energy Harvesting Wireless Sensor Nodes Using Weather Forecast," in *Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*, 2017 25th, pp. 550–553, ISBN 978-1-5386-3072-3 (M33)
2. **S. Janković** and L. Saranovac, "High-level Power Modeling of CC430 SoC", *IcETRAN-2017*, 2017, Kladovo, Serbia, ELI3.2, ISBN 978-86-7466-692-0 (M33)
3. I. Popović, **S. Janković** and L. Saranovac, "Online power-aware scheduling strategy based on workload power profile measurement," 2017 Zooming Innovation in Consumer Electronics International Conference (ZINC), Novi Sad, Serbia, 2017, pp. 45–46, doi: 10.1109/ZINC.2017.7968659 (M33)

Kategorija M50 – Časopisi nacionalnog značaja:

1. **S. Janković**, D. El Mezeni and L. Saranovac, "Improving Energy Usage in Energy Harvesting Wireless Sensor Nodes Using Weather Forecast," *Telfor Journal*, Vol. 10, No. 1, 2018, pp. 38–43, ISSN 2334-9905, doi: 10.5937/telfor1801038J (M52)

Kategorija M80 – Tehnička i razvojna rešenja:

1. **S. Janković**, I. Popović, D. El Mezeni, I. Radovanović i L. Saranovac, "Simulator solarno napajanog bežičnog senzorskog čvora orijentisan na optimizaciju potrošnje i performansi", 2019, Beograd, Srbija (M85)
2. I. Popović i **S. Janković**, "Metoda za optimizaciju izvršavanja programskog posla na namenskoj platformi za rad u realnom vremenu", 2017, Beograd, Srbija (M85)
3. **S. Janković**, I. Popović, D. El Mezeni, I. Radovanović i L. Saranovac, "Metoda za procenu degradacije performansi aplikacije kod namenskih računarskih sistema", 2017, Beograd, Srbija (M85)

1.5 Struktura doktorske disertacije

U okviru disertacije postoji 7 glava.

U drugoj glavi detaljno se analizira koncept energetske neutralnosti. U okviru ove glave dat je pregled osnovnih elemenata koji su neophodni u cilju postizanja energetske neutralnosti: informacija o trenutno uskladištenoj energiji, informacija o energiji koja će biti dostupna u budućnosti i algoritam za raspoređivanje energije. Prikazani su postojeći pristupi za svaki od elemenata i analizirane su prednosti i mane.

U glavi 3 predstavljen je opšti model algoritma za optimizaciju potrošnje i performansi. Analizirane su realizacije algoritma za optimizaciju potrošnje i performansi u različitim sistemima. Pošto algoritam za optimizaciju potrošnje i performansi obuhvata tehnike za smanjenje potrošnje, i algoritam za raspoređivanje energije, i tehnike za predviđanje dostupne energije, prikazana je interakcija svih tih elemenata u okviru modela.

Glava 4 bavi se prikazom predložene metode za opis degradacije u sistemima za rad u realnom vremenu. Predložena je objektivna metrika kojom može da se opiše degradacija performansi pojedinačnih delova aplikacije kao i celokupne aplikacije. Pored metrike prikazana je i nova tehnika za smanjenje potrošnje koja koristi te podatke. Tehnika je verifikovana u simuliranim uslovima i prikazani su rezultati.

U petoj glavi prikazane su predložene tehnike za predviđanje solarne energije koja će biti dostupna u budućnosti. Osnova tehnika zasniva se na korišćenju i vremenske prognoze i podataka iz prethodnih vremenskih intervala, da bi se postigla što manja greška predviđanja. Tehnike su poređene u simuliranom okruženju sa reprezentativnim (*state-of-the-art*) tehnikama na podacima prikupljenim u periodu od godinu dana.

U glavi 6 prikazan je algoritam za optimizaciju potrošnje i performansi, odnosno njegov deo, algoritam za raspoređivanje energije. Algoritam je zasnovan na skupu pravila i koristi podatke o trenutnom stanju napunjenosti skladišta energije, kao i podatke od tehnika za predviđanje energije koja će biti dostupna u budućnosti. U okviru ove glave evaluirana je energetska neutralnost celog algoritma. Algoritam je testiran u simuliranim uslovima na prikupljenim podacima u periodu od godinu dana. Takođe je testiran na realizovanom laboratorijskom prototipu solarno napajanog bežičnog senzorskog čvora.

U glavi 7 dat je zaključak disertacije i izložene su mogućnosti za dalje pravce istraživanja.

Glava 2

Energetska neutralnost bežičnih senzorskih čvorova

Energetska neutralnost se definiše kod sistema koji imaju mogućnost prikupljanja energije iz okoline. Zasnovana je na optimalnom iskorišćenju dostupne energije tako da se postignu maksimalne performanse a da se pritom ne ugrozi operativnost sistema.

Za ostvarivanje energetske neutralnosti kod senzorskih čvorova koji imaju mogućnost prikupljanja energije iz okoline, potrebni su:

- informacija o trenutno uskladištenoj energiji u skladištu energije,
- informacija o energiji koja će biti dostupna u budućnosti, i
- algoritam koji će na osnovu prethodne dve informacije vršiti raspoređivanje energije u cilju postizanja što većeg stepena energetske neutralnosti.

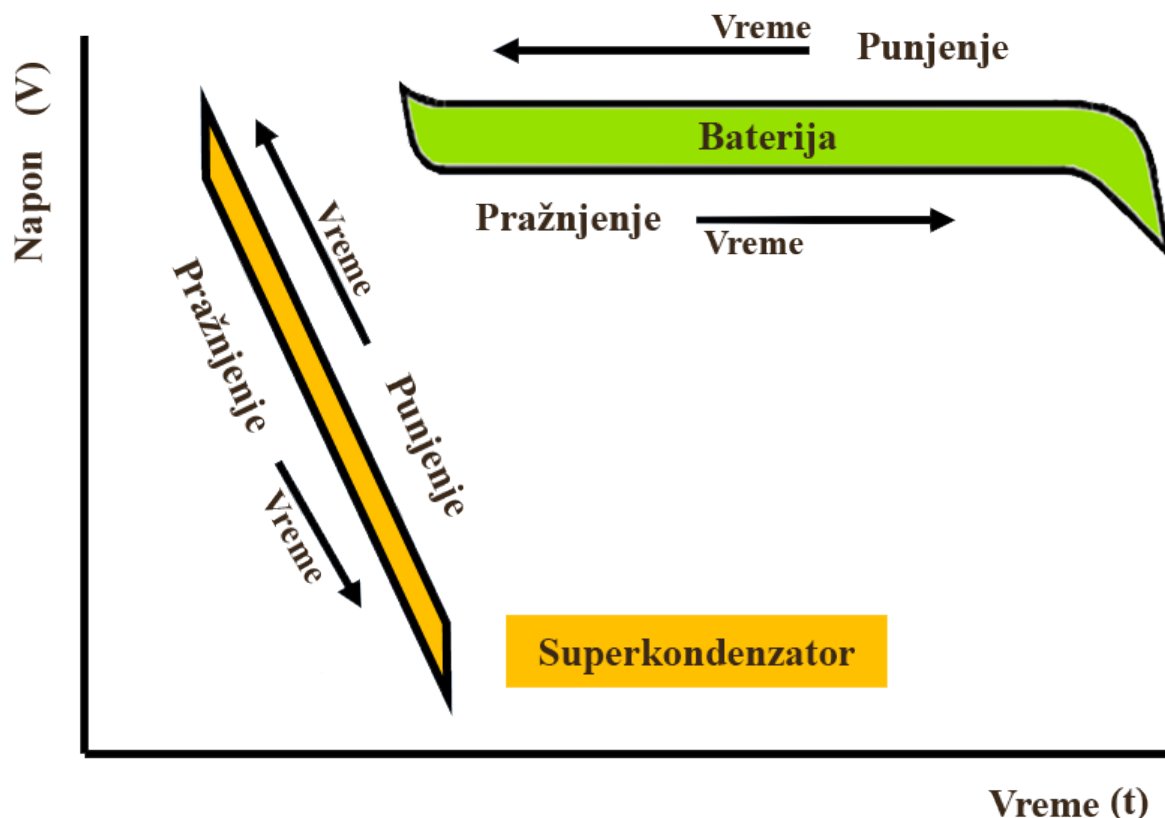
2.1 Informacija o trenutno uskladištenoj energiji

Informacija o trenutno uskladištenoj energiji može se dobiti na različite načine, u zavisnosti od tipa skladišta koje se koristi. Predstavlja se u vidu stanja napunjenosti skladišta energije (eng. *State of Charge* - SoC) koje može biti u opsegu od 0% (ispražnjeno skladište energije) do 100% (potpuno napunjeno skladište energije).

Ukoliko se koristi superkondenzator, trenutno stanje napunjenosti skladišta energije može se odrediti na osnovu trenutnog napona superkondenzatora, pošto postoji linearna veza između napona i uskladištene energije (slika 2.1). Međutim, to nije precizno, zbog izraženog efekta samopražnjenja kod superkondenzatora [71].

Za razliku od superkondenzatora, baterije imaju nelinearnu vezu između stanja napunjenosti i napona. Zato je vrlo teško na osnovu trenutne vrednosti napona zaključiti trenutno stanje napunjenosti. Postoje mogućnosti za određene primene da se izvrše merenja i onda estimira, ali je neprecizno. Sa slike 2.1 vidi se da je napon na bateriji skoro konstantan tokom većeg dela pražnjenja i tek kada se dođe do kraja kapaciteta onda dolazi do naglog pada napona. Takođe, vrednost napona na bateriji zavisi i od jačine struje kojom se prazni baterija.

Zato se za određivanje stanja napunjenosti skladišta energije koriste posebna integrisana kola za merenje protoka naelektrisanja (eng. *Coulomb counter* odnosno *Battery Fuel Gauge*). Često su integrisana u okviru kola za distribuciju napajanja (eng. *Power Management IC* - PMIC), ali mogu



Slika 2.1: Zavisnost napona od vremena prilikom pražnjenja superkondenzatora i baterije konstantnom strujom

da se koriste i nezavisno. Kolo za merenje protoka naelektrisanja meri pad napona na šantu koji je postavljen na red sa baterijom, na osnovu čega mogu da odrede jačinu struje. Svaki put kada protekne određena količina naelektrisanja generiše se događaj i dostupna je informacija o smeru u kojem se desio protok (punjenje ili pražnjenje baterije). Na osnovu tih informacija, aplikacija može da vodi računa o tome kakvo je stanje napunjenosti. Nedostatak ovog pristupa je što se greška akumulira sa vremenom, pa je potrebno s vremena na vreme izvršiti kalibraciju.

2.2 Pregled postojećih tehnika za predviđanje dostupne energije

Tačni podaci o energiji koja će biti dostupna u budućnosti ne mogu biti poznati, ali ih je moguće predvideti korišćenjem različitih tehnika za predviđanje dostupne energije. Uloga tehnike za predviđanje energije jeste da na osnovu određenih parametara, za određeni vremenski interval u budućnosti, predvidi vrednost energije koju će biti moguće prikupiti.

Postojeće tehnike za predviđanje dostupne solarne energije mogu da se podele u dve grupe: tehnike koje na osnovu podataka iz prethodnih vremenskih intervala daju predviđanje za naredne vremenske intervale (eng. *Past Predicts the Future* - PPF) i tehnike koje koriste podatke iz vremenske prognoze. U zavisnosti od konfiguracije i karakteristika senzorskog čvora, kao i mogućnosti za prikupljanje i skladištenje energije, zavisi i koliki interval prognoze je potreban. Standardni intervali prognoze koji se razmatraju su od narednog vremenskog intervala, odnosno pola sata do sat vremena u budućnosti, što je kratkoročna prognoza, pa do par dana u budućnosti, što je dugoročna prognoza.

2.2.1 Tehnike koje predviđanje vrše na osnovu merenja u prethodnim vremenskim intervalima

Tehnike koje predviđanje vrše na osnovu merenja u prethodnim vremenskim intervalima baziraju se na sunčevom dnevnom ciklusu. Sunce izlazi, dostiže zenit i zalazi u sličnim vremenima u uzastopnim danima. Takođe, sunčeva energija u uzastopnim vedrim danima ima sličan profil u toku dana.

Dani su podeljeni u vremenske intervale trajanja od 30 do 60 minuta. Solarna energija koja će biti dostupna u budućnosti računa se na osnovu energije izmerene u istom vremenskom intervalu u prethodnim danima i/ili u prethodnim vremenskim intervalima trenutnog dana.

Exponentially Weighted Moving Average (EWMA) [51] tehnika koristi podatak o izmerenoj solarnoj energiji u trenutnom vremenskom intervalu da odredi predviđanje za isti interval u narednom danu koristeći

$$\hat{E}_{d+1}^t = \alpha \hat{E}_d^t + (1 - \alpha) E_d^t, \quad (2.1)$$

gde su E_d^t i $\hat{E}_d^t$ izmerena odnosno predviđena solarna energija, respektivno, u vremenskom intervalu t dana d , i $\alpha < 1$ je težinski faktor. Vrednost faktora α određuje koliko prethodno izmerene vrednosti utiču na predviđanje novih vrednosti. Rezultati u pogledu greške predviđanja su zadovoljavajući kada su vremenske prilike u uzastopnim danima slične, ali greška se značajno povećava ako se vremenske prilike menjaju. To je posledica toga što EWMA nema mogućnost prilagođavanja trenutnim vremenskim prilikama.

Noh et al. [72] su predstavili ASEA (*Advanced Solar Energy Allocation*) tehniku koja je proširenje EWMA tehnike. ASEA uzima u obzir i odnos između izmerene vrednosti solarne energije i predviđene energije dobijene pomoću EWMA za prethodni vremenski interval da bi kompenzovali greške u toku dana

$$\varphi = \frac{E_d^{t-1}}{\tilde{E}_d^{t-1}}. \quad (2.2)$$

U izrazu (2.2) vrednost $\tilde{E}_d^{t-1}$ je predviđena energija pomoću EWMA za prethodni vremenski interval. Korišćenjem odnosa φ tehnika ASEA može da detektuje iznenadne promene u toku dana i da koriguje predviđanje u zavisnosti od trenutnih vremenskih uslova. Predviđanje dostupne energije za proizvoljni vremenski interval k u budućnosti računa se kao

$$\hat{E}_d^{t+k} = \left(\varphi + k \frac{1 - \varphi}{N} \right) \tilde{E}_d^{t+k}, \quad 0 \leq k \leq N. \quad (2.3)$$

Weather-Conditioned Moving Average (WCMA) [73] primenjuje jednačinu za eksponencijalno opadanje na drugi način. Za razliku od EWMA, koji daje predviđanje dostupne energije za isti vremenski interval u narednom danu, WCMA daje predviđanje za naredni vremenski interval u trenutnom danu. Predviđanje se računa kao

$$\hat{E}_d^{t+1} = \alpha E_d^t + GAP_K (1 - \alpha) M_D^{t+1}, \quad (2.4)$$

gde je α težinski faktor, a M_D^{t+1} usrednjena vrednost izmerene solarne energije u vremenskom intervalu $t + 1$ za prethodnih D dana

$$M_D^{t+1} = \frac{\sum_{i=d-1}^{d-D} E_i^{t+1}}{D}. \quad (2.5)$$

WCMA uvodi faktor GAP_K koji služi da bi se uporedilo prethodnih K vremenskih intervala u trenutnom danu sa istim vremenskim intervalima u prethodnim danima. Time se dobija odnos vremenskih prilika između trenutnog i prethodnih dana, pa predviđanje može da se ažurira ukoliko dođe do promena vremenskih prilika u toku dana. Za računanje faktora GAP_k potrebno je odrediti vektor

$\mathbf{V} = [v_1, v_2, \dots, v_K]$, gde v_i predstavlja odnos izmerene energije u intervalu $t - i$ i usrednjene izmerene energije u intervalu $t - i$ za prethodnih D dana M_D^{t-i} , odnosno

$$v_i = \frac{E_d^{t-i}}{M_D^{t-i}}. \quad (2.6)$$

Vrednost v_i veća od jedan znači da je trenutni dan sunčaniji od proseka, a manja od jedan znači da je trenutni dan oblačniji od proseka. Da bi se dala veća važnost skorijim intervalima, definiše se vektor $\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_K]$, gde je

$$p_i = \frac{K - i}{K}. \quad (2.7)$$

Na osnovu izraza (2.6) i (2.7) faktor GAP_K se računa kao

$$GAP_K = \frac{\mathbf{V} \cdot \mathbf{P}}{\sum \mathbf{P}}. \quad (2.8)$$

WCMA tehnika daje bolje rezultate od EWMA po pitanju greške predviđanja, ali je ograničena samo na predviđanje solarne energije za naredni vremenski interval, odnosno na kratkoročno predviđanje. To je mana jer dosta algoritama za raspoređivanje energije očekuje i podatke za više vremenskih intervala u budućnosti.

U radu [74] predložena je mogućnost primene WCMA za više vremenskih intervala u budućnosti, gde se uzima

$$\hat{E}_d^{t+i} = \begin{cases} \alpha E_d^t + GAP_K(1 - \alpha)M_D^{t+i}, & \text{za } i = 1, \\ M_D^{t+i}, & \text{za } 1 < i < N. \end{cases} \quad (2.9)$$

Dakle, za predviđanje dostupne energije u narednom vremenskom intervalu koristi se WCMA izraz, dok se za vremenske intervale dalje u budućnosti koristi samo usrednjena energija M_D^{t+i} .

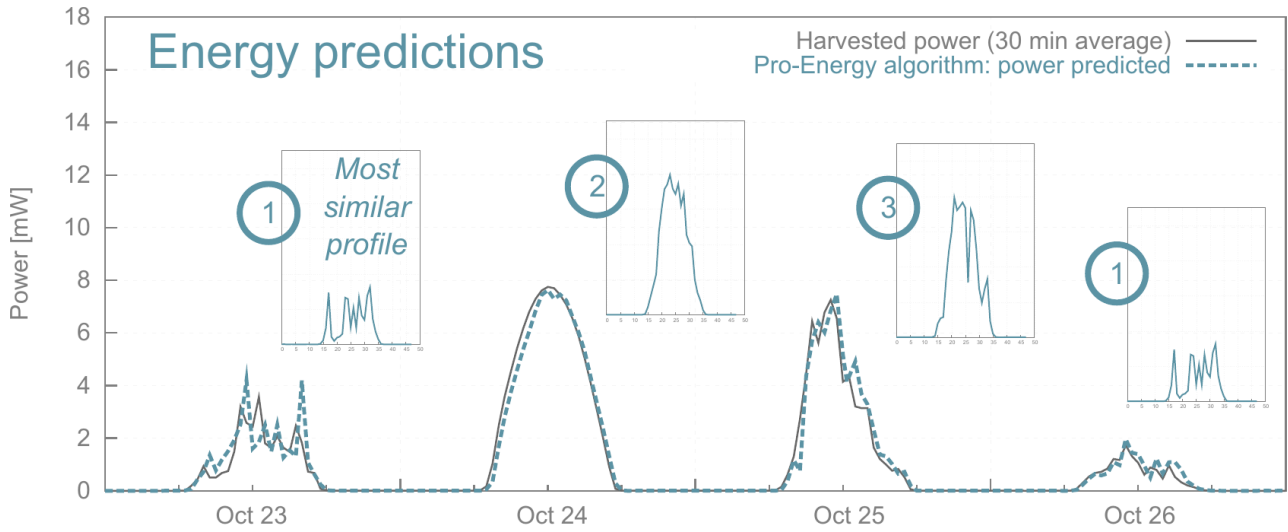
Profile energy prediction model (Pro-Energy) [75] uvodi proširenje ideje WCMA. Umesto da se koristi poslednjih D dana za generisanje predviđanja, Pro-Energy pravi bazu od D reprezentativnih profila prikupljene solarne energije. Prilikom predviđanja u bazi se traži snimljeni profil koji je najbliži trenutnom danu i taj profil se koristi (slika 2.2). Sličnost je definisana kao relacija koja je obrnuto proporcionalna srednjoj apsolutnoj grešci (eng. *Mean absolute error* - MAE) između merenja iz trenutnog dana i sačuvanog profila posmatrano na periodu od K prethodnih vremenskih intervala. Prozor je ograničen samo na K vremenskih intervala da bi se omogućilo da se predviđanje prilagodi ukoliko dođe do promene vremenskih uslova u toku dana.

Da bi sačuvani vremenski intervali bili što reprezentativniji, na kraju dana baza se ažurira na dva načina.

1. Ukoliko u bazi postoji profil koji je duže od A dana u bazi, umesto njega se u bazu smešta profil trenutnog dana. Na taj način se baza održava svežom, sa relevantnim profilima.
2. Ukoliko u bazi postoje profili koji su veoma slični, odnosno srednja apsolutna greška im je manja od određene granice, umesto profila koji je sličniji profilu trenutnog dana u bazu se smešta profil od trenutnog dana. Time se podstiče raznovrsnost profila u bazi.

Pošto je prostor za skladištenje prethodnih profila ograničen, novi profili mogu da se dobiju kombinovanjem P najbližijih profila u težinski profil WP korišćenjem

$$WP^{t+1} = \frac{1}{P-1} \sum_{j=1}^P \omega_j \cdot E_{d-j}^{t+1}, \quad (2.10)$$



Slika 2.2: Pro-Energy: profili prikupljene solarne energije koriste se za predviđanje dostupne energije u budućnosti (preuzeto iz [75, p. 77])

gde je

$$\omega_j = 1 - \frac{MAE_K(E_{d-j}, E_d)}{\sum_{j=1}^P MAE_K(E_{d-j}, E_d)}, \quad (2.11)$$

i

$$MAE_K(E_{d-j}, E_d) = \sum_{i=t-K}^t \frac{1}{K} |E_{d-j} - E_d|. \quad (2.12)$$

Predviđanje za sledeći vremenski interval računa se pomoću

$$\hat{E}_d^{t+1} = \alpha E_d^t + (1 - \alpha) WP^{t+1}. \quad (2.13)$$

Pro-Energy daje bolje rezultate predviđanja u poređenju sa EWMA i WCMA za kratkoročno predviđanje (sledeći vremenski interval) [75]. Prednost Pro-Energy u odnosu na EWMA i WCMA je što pored kratkoročnog predviđanja (sledeći interval) može da se koristi i za srednjeročno predviđanje, odnosno nekoliko časova unapred. Ukoliko se vrši predviđanje za nekoliko vremenskih intervala u budućnosti, uvodi se faktor γ koji se računa kao

$$\gamma_i = \begin{cases} \alpha \cdot \left(1 - \frac{i-1}{G}\right), & \text{za } i \leq G \\ 0, & \text{za } i > G \end{cases} \quad \forall i, 1 \leq i \leq F. \quad (2.14)$$

U izrazu (2.14) α je težinski faktor definisan u izrazu (2.13), i je i -ti vremenski interval u odnosu na trenutni za koji se vrši predviđanje od ukupno F vremenskih intervala za koje se vrši predviđanje, a G je broj vremenskih intervala u budućnosti za koje se smatra da postoji korelacija sa trenutnim intervalom. Prognoza za vremenski interval $t + i$ računa se kao

$$\hat{E}_d^{t+i} = \gamma_i E_d^t + (1 - \gamma_i) WP^{t+i}. \quad (2.15)$$

Muhammad et al. [76] predstavili su unapređenu Pro-Energy tehniku (eng. *Improved Pro-Energy* - IPro-Energy), koja uvodi dodatni "smarting" faktor S za kompenzovanje iznenadne promene u vremenskim prilikama u toku dana. "Smarting" faktor se računa kao

$$S = r \cdot \left(\frac{E_d^t - E_d^{t-1}}{\left((E_d^t + E_d^{t-1}) / 2 \right)} \right) \cdot E_d^{t-1}, \quad (2.16)$$

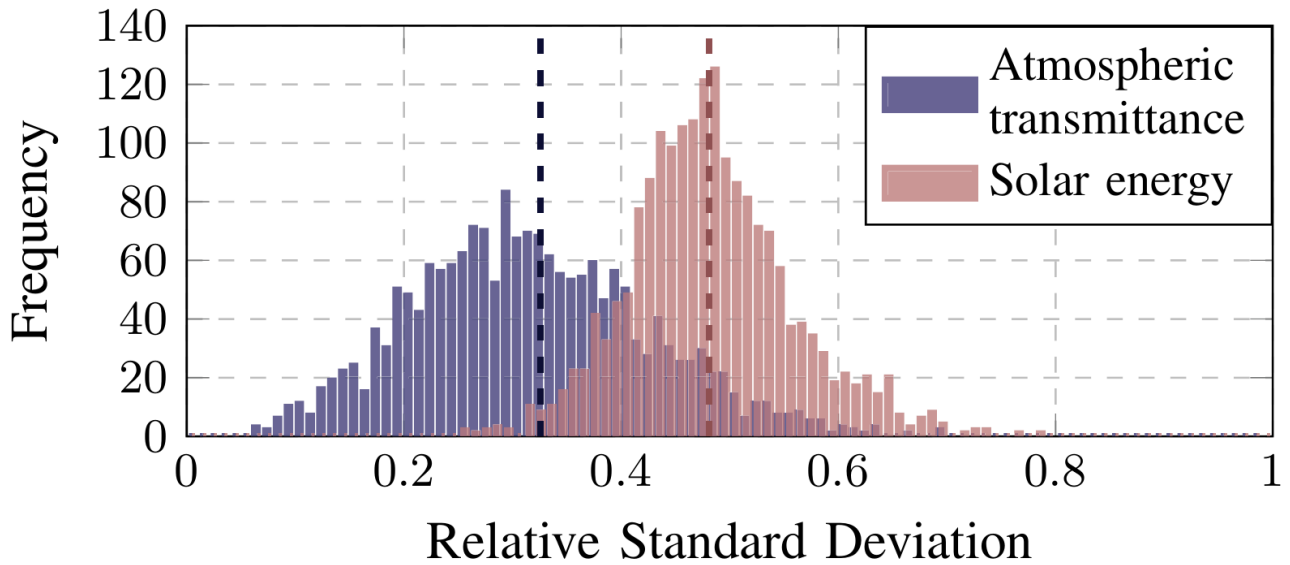
gde je r faktor koji određuje koliko iznenadne promene u vremenskim uslovima između prethodnog i trenutnog vremenskog intervala utiču na predviđanje za naredni vremenski interval. Umesto korišćenja različitih težinskih faktora za naredni vremenski interval i više vremenskih intervala u budućnosti (faktori α i γ kod Pro-Energy), autori su koristili samo jedan težinski faktor W_f . Predviđanje za vremenski interval $t + i$ se računa kao

$$\hat{E}_d^{t+i} = W_f E_d^t + (1 - W_f) W P^{t+i} + S. \quad (2.17)$$

Drašković et al. [77] predstavili su četiri nove tehnike za predviđanje solarne energije koja će biti dostupna u budućnosti koje su zasnovane na propustljivosti atmosfere (eng. *atmospheric transmittance*). Propustljivost atmosfere S_d^t predstavlja odnos između prikupljene energije na površini Zemlje E_d^t i energije koju bi prikupio solarni panel površine 1 m^2 postavljen izvan atmosfere $E_{ET_d}^t$, za dan d i vremenski interval t . Računa se kao

$$S_d^t = \frac{E_d^t}{E_{ET_d}^t}. \quad (2.18)$$

Autori su za računanje $E_{ET_d}^t$ koristili model izvanzemaljskog sunčevog zračenja (eng. *extraterrestrial solar irradiance model*) [78]. Korišćenjem propustljivosti atmosfere umesto solarne energije eliminiše se varijacija usled dnevnog solarnog ciklusa na rezultate, čime se smanjuje varijansa grešaka predviđanja [77] (slika 2.3).



Slika 2.3: Histogram relativne standardne devijacije atmosferske propustljivosti i solarne energije za dati dan (preuzeto iz [77, p. 429])

Od predstavljene četiri tehnike, tehnike EWMA-T, WCMA-T i Pro-Energy-T predstavljaju modifikaciju respektivnih tehnika EWMA, WCMA i Pro-Energy, tako da se umesto merene i predviđene solarne energije koristi merena i predviđena propustljivost atmosfere. Četvrta tehnika, Delta-T, oslanja se na pretpostavku da je odnos između uzastopnih vremenskih intervala sličan za prethodnih D dana, pa se predviđanje atmosferske propustljivosti za naredni vremenski interval računa kao

$$\hat{S}_d^t = S_d^{t-1} \cdot \frac{\sum_{i=d-1}^{d-D} S_i^t}{\sum_{i=d-1}^{d-D} S_i^{t-1}} \quad (2.19)$$

Rezultati pokazuju da sve četiri tehnike daju bolje rezultate po pitanju greške predviđanja u poređenju sa EWMA, WCMA i Pro-Energy, i za kratkoročnu prognozu kao i za srednjeročnu (nekoliko sati unapred).

U svim do sada predstavljanim tehnikama korišćeni su vremenski intervali fiksnog trajanja. Varijacije WCMA i Pro-Energy u kojima se koriste vremenski intervali promenljivog trajanja prikazane su u [74, 79]. Primena vremenskih intervala promenljivog trajanja omogućava smanjenje neophodne memorije za čuvanje podataka u poređenju sa fiksnim trajanjem vremenskih intervala, pošto se čuva informacija samo o karakterističnim intervalima. Međutim, ovaj pristup je primenljiv samo na PPF tehnike, pa nije dalje razmatran.

2.2.2 Tehnike koje koriste vremensku prognozu

Podaci vremenske prognoze dostupni su sa različitih izvora. Pored referentnih nacionalnih hidro-meteoroloških zavoda, postoji dosta veb-sajtova koji agregiraju podatke ili daju sopstvenu vremensku prognozu. Takođe, takvi sajtovi omogućavaju i programerski pristup (eng. *Application Programming Interface* - API) radi lakšeg automatizovanog pristupa i baratanja podacima.

Vremenska prognoza, pored standardnih podataka o temperaturi, vazдушnom pritisku, vlažnosti vazduha, itd, nudi još dosta raznovrsnih parametara. Podaci vremenske prognoze su dostupni uglavnom sa intervalom od sat vremena za najmanje 24 časa unapred. Zato su trajanja vremenskih intervala kod tehnika zasnovanih na vremenskoj prognozi postavljena na 60 minuta.

Parametar koji se najčešće koristi u tehnikama koje se zasnivaju na vremenskoj prognozi jeste oblačnost (eng. *cloudiness*, *cloud cover*). Oblačnost se iskazuje u oktama ili procentima, gde veće vrednosti označavaju više oblaka na nebu. Okta je mera koja predstavlja koliko osmina neba je pokriveno oblacima [80]. Dakle, za potpuno vedar dan oblačnost je 0 (u oktama) odnosno 0%, dok je za potpuno oblačan dan oblačnost 8 (u oktama), odnosno 100%.

Solarna energija za dan d i vremenski interval t se određuje tako što se podatak o solarnoj energiji za potpuno vedar dan (eng. *cloudless sky solar irradiance*) $E_{CS_d}^t$ moduliše podatkom o oblačnosti CC_d^t kao

$$E_d^t = G(CC_d^t) \cdot E_{CS_d}^t. \quad (2.20)$$

Tehnike koje koriste vremensku prognozu za predviđanje solarne energije koja će biti dostupna u budućnosti razlikuju se u načinu definisanja funkcije G , kao i u načinu određivanja solarne energije za potpuno vedar dan.

Sharma et al. [81] su predstavili tehniku *Cloudy* koja koristi parametar oblačnosti iz vremenske prognoze za predviđanje solarne energije koja će biti dostupna u budućnosti. Autori su solarnu energiju za potpuno vedar dan računali pomoću kvadratne funkcije kao

$$E_{CS_d}^t = a \cdot (t + b)^2 + c, \quad (2.21)$$

gde su a , b i c parametri koji su eksperimentalno određeni za svaki mesec u godini. Očekivana solarna energija se računa kao

$$\hat{E}_d^t = (1 - CC_d^t) \cdot E_{CS_d}^t. \quad (2.22)$$

Autori su pokazali da predviđanje solarne energije na osnovu vremenske prognoze daje bolje rezultate za srednjoročno i dugoročno predviđanje u odnosu na PPF tehnike.

Cloudy tehnika je primenjena u radovima [82] i [83]. Posmatran je problem raspoređivanja programskih poslova i potvrđeno je da primena vremenske prognoze za predviđanje solarne energije koja će biti dostupna u budućnosti omogućava da se više posla uradi u odnosu na tehnike koje se zasnivaju na prethodnim merenjima. Li et al. [83] su dodatno proširili funkciju G iz izraza (2.22) indeksom zagađenja PM2.5 česticama, označen kao $PM_{2.5_d}^t$ za vremenski interval t u danu d . Očekivanu solarnu energiju računali su kao

$$\hat{E}_d^t = (1 - CC_d^t - PM_{2.5_d}^t/500) \cdot E_{CS_d}^t. \quad (2.23)$$

Autori rada [83] su razmatrali i upotrebu rekonfigurabilnog hardvera, gde je takođe potvrđeno da predviđanje solarne energije na osnovu vremenske prognoze može da omogući više urađenog posla od PPF tehnika.

Za razliku od *Cloudy* tehnike, koja predviđanje energije koja će biti dostupna u budućnosti vrši isključivo na osnovu vremenske prognoze, više hibridnih tehnika je razvijeno koji podatke od vremenske prognoze kombinuju sa PPF pristupom da bi dobili manju grešku predviđanja, posebno za kratkoročnu prognozu.

Renner et al. [84] predstavili su tehniku u kojoj su kombinovali EWMA pristup sa predviđanjem osunčanosti na osnovu vremenske prognoze oblačnosti. Za svaki vremenski interval računali su odnos izmerene solarne energije i predviđene osunčanosti

$$\mu_d^t = \frac{E_d^t}{G(CC_d^t)} \quad (2.24)$$

Za predviđanje osunčanosti koristili modele od Kimball i Laevastu [85], koji su prikazani izrazima (2.25) i (2.26), respektivno.

$$G = 1 - 0.71 \cdot CC \quad (2.25)$$

$$G = 1 - 0.6 \cdot CC^3 \quad (2.26)$$

Računanje predviđene solarne energije za naredne vremenske intervale u budućnosti se vrši kao

$$\hat{E}_d^{t+i} = G(CC_d^{t+i}) \cdot \bar{\mu}_d^t, \quad (2.27)$$

gde je $\bar{\mu}_d^t$ vrednost odnosa iz izraza (2.24) koja se računa prema EWMA formuli.

Sharma et al. [86] su koristili rezultate predviđanja WCMA i *Cloudy* tehnike da bi napravili hibridnu tehniku Forecast-WCMA. Predviđanje za naredni vremenski interval predstavlja linearnu kombinaciju predviđanja korišćenih tehnika, gde tehnika koja ima manju grešku u prethodnom vremenskom intervalu ima veći uticaj na predviđanje za naredni vremenski interval. Očekivana solarna energija se računa kao

$$\hat{E}_d^t = \beta \hat{E}_{forecast_d}^t + (1 - \beta) \hat{E}_{WCMA_d}^t. \quad (2.28)$$

Koeficijent β se računa na osnovu sledećeg izraza

$$\beta = \frac{e_{WCMA_d}^{t-1}}{e_{forecast_d}^{t-1} - e_{WCMA_d}^{t-1}}, \quad (2.29)$$

gde su $e_{WCMA_d}^{t-1}$ i $e_{forecast_d}^{t-1}$ apsolutne greške predviđanja WCMA i *Cloudy* tehnike, respektivno.

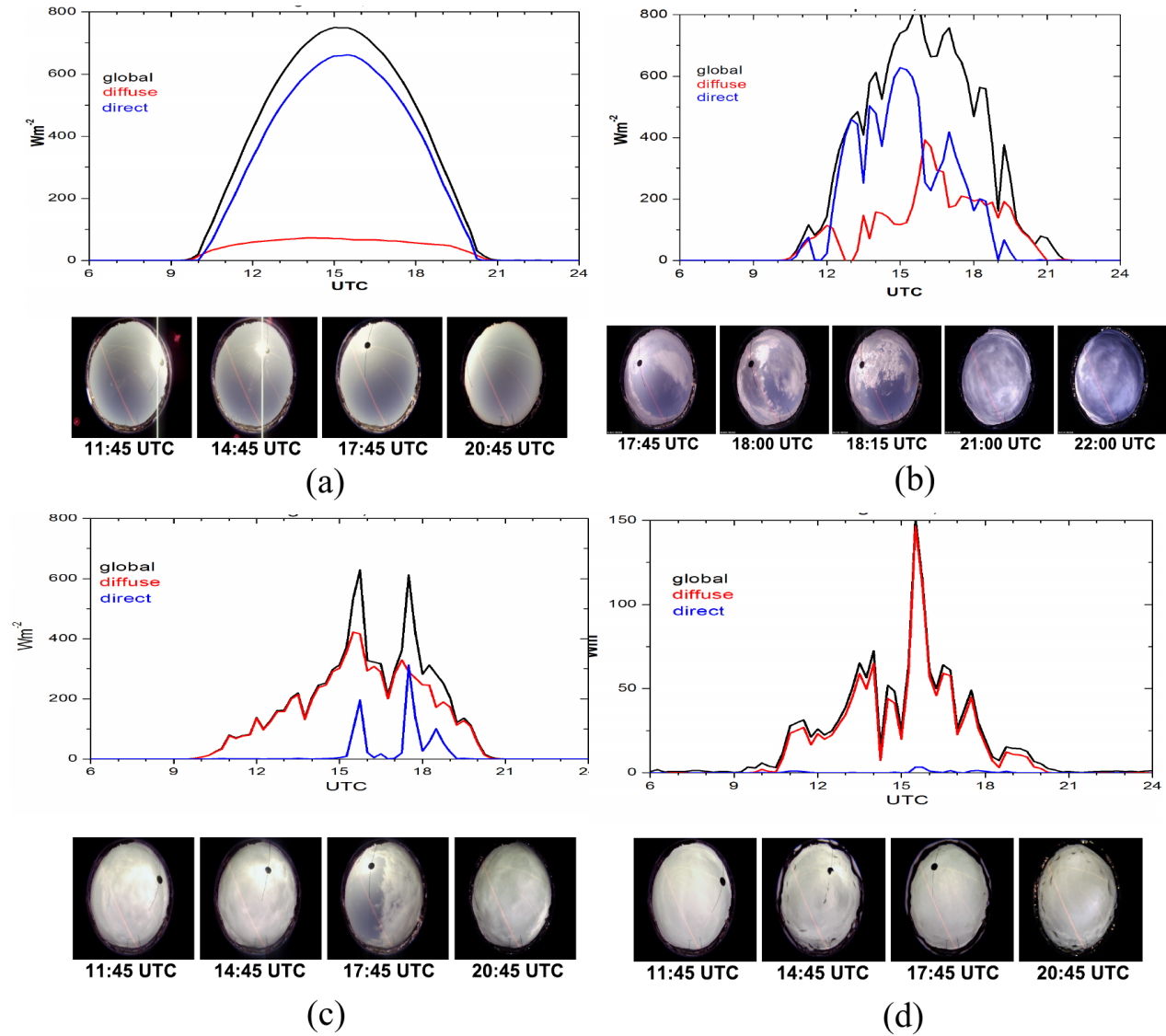
Nedostatak do sada prikazanih tehnika zasnovanih na vremenskoj prognozi je što koriste samo globalnu solarnu radijaciju, a ne i pojedinačne komponente. Naime, globalna solarna radijacija može da se podeli na dve komponente: direktnu i difuznu [87].

Direktna komponenta solarne radijacije se odnosi na deo zračenja koji dopire direktno od sunca, bez rasipanja u atmosferi. Doprinos direktne radijacije globalnoj solarnoj radijaciji najizraženiji je kada je vedro vreme, odnosno kada nema oblaka (slika 2.4a-b).

Difuzna komponenta solarne radijacije se odnosi na deo zračenja koji dopire nakon rasipanja pri prolasku kroz atmosferu. Prisutna je pri svim vremenskim uslovima, ali je njen doprinos ukupnoj solarnoj radijaciji izraženiji kada je oblačno vreme (slika 2.4c-d).

Na slikama 2.4a-d prikazani su profili globalne, direktne i difuzne solarne radijacije za različite vremenske uslove u gradu Florianópolis u Brazilu za dane u 2002. godini sa slikama neba sa zemlje. Na slici 2.4a koja predstavlja potpuno vedar dan dominira uticaj direktne solarne radijacije na globalnu

radijaciju. Kada se radi o pretežno sunčanom (slika 2.4b) i pretežno oblačnom (slika 2.4c) danu, menja se udeo direktne i difuzne solarne radijacije na globalnu radijaciju u zavisnosti od toga da li ima oblaka na nebu. Za potpuno oblačan dan (slika 2.4d) skoro sva globalna solarna radijacija potiče od difuzne radijacije.



Slika 2.4: Vrednosti globalne, direktne i difuzne solarne radijacije za različite vremenske uslove u gradu Florianópolis u Brazilu ($27^{\circ} 28' S$, $48^{\circ} 29' W$) za dane u 2002. godini sa slikama neba sa zemlje za: (a) potpuno vedar dan (11.08.); (b) pretežno sunčan dan (12.04.); (c) pretežno oblačan dan (18.08.); (d) potpuno oblačan dan (14.08.). (preuzeto iz [88, p. 90,93])

U radu [89] korišćena je baza podataka PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System*) [90] da bi se dobili podaci o osunčanosti za potpuno vedar dan. PVGIS baza nudi različite podatke o solarnoj osunčanosti i komponentama solarne osunčanosti za ceo svet. Istorijski podaci su dostupni na nivou sata, dok su prosečne vrednosti dostupne na nivou meseca ili godine. Takođe je dostupan i onlajn kalkulator kojim je moguće za različite konfiguracije panela odrediti optimalne uslove za postavljanje i očekivane doprinose.

Autori rada [89] su računali očekivanu solarnu radijaciju kao

$$\tilde{G}_d^t = (1 - CC_d^t) G_{bd}^t + G_{dd}^t, \quad (2.30)$$

gde je G_{bd}^t direktna komponenta solarne radijacije a G_{dd}^t difuzna komponentna solarne radijacije koje su dobijene iz PVGIS baze podataka.

Očekivana solarna energija $\tilde{E}_d^t$ računata je na osnovu očekivane solarne radijacije za vremenski interval t , dobijene iz izraza (2.30), i karakteristika solarnog panela, konkretno površine i efikasnosti panela. Predviđanje solarne energije za naredni vremenski interval računato je kao

$$\hat{E}_d^t = (1 + \alpha) \cdot \tilde{E}_d^t, \quad (2.31)$$

gde je faktor

$$\alpha = \frac{E_d^{t-1} - \tilde{E}_d^{t-1}}{\tilde{E}_d^{t-1}}, \quad \alpha \in [-0.3, 0.05]. \quad (2.32)$$

Faktor α se koristi za korekciju predviđanja na osnovu greške predviđanja u prethodnom vremenskom intervalu. Korekcija u izrazu (2.32) je ograničena tako da se smanji mogućnost da se predvidi da će biti dostupno više energije nego što će stvarno biti dostupno. Međutim, taj uslov često dovodi do predviđanja manje dostupne energije nego što bi stvarno bilo dostupno.

Za razliku od prethodno navedenih tehnika koje su zasnovane na izrazu (2.20), autori rada [91] koristili su tehnike mašinskog učenja na podacima iz vremenske prognoze da bi odredili solarnu radijaciju za vremenske intervale do 3 sata u budućnosti. Korišćeno je više parametara iz vremenske prognoze: temperatura, tačka rose, brzina vetra, oblačnost, padavine, vlažnost, kao i informacija o trenutnom danu u godini. U radu je prikazana detaljna analiza uticaja različitih parametara na predviđanje solarnog zračenja. Prikazane su tehnike zasnovane na linearnoj regresiji i metodi potpornih vektora (eng. *Support Vector Machine* - SVM), kao i varijanta SVM gde je na ulazne podatke primenjena redukcija dimenzija pomoću analize glavnih komponenti (eng. *Principal Component Analysis* - PCA). Tehnike su poređene međusobno, kao i sa *Cloudy* i EWMA tehnikama i pokazano je da tehnika koja primenjuje SVM na podatke redukovanih dimenzija daje najbolje rezultate. Međutim, ovakav pristup je računarski kompleksan i nije prilagođen za baterijski napajane senzorske čvorove koji imaju ograničene procesorske mogućnosti.

2.2.3 Poređenje dostupnih klasa postojećih tehnika za predviđanje

Prikazane su dve najčešće korišćene klase tehnika za predviđanje energije koja će biti dostupna u budućnosti. Sve tehnike dele dan u određeni broj vremenskih intervala.

Tehnike koje koriste podatke iz prethodnih vremenskih intervala su uglavnom jednostavne za implementaciju. Potrebna su samo merenja prikupljene energije iz prethodnih intervala, koja su već dostupna, i određena količina memorije u kojoj će se čuvati prethodna merenja. Mogu da daju rezultate koji imaju malu grešku predviđanja za kratkoročnu prognozu, odnosno narednih nekoliko vremenskih intervala. Međutim, greška predviđanja značajno raste za srednjeročnu i dugoročnu prognozu.

Tehnike koje koriste podatke iz vremenske prognoze, izuzev *Cloudy* tehnike, mogu sve da se klasifikuju kao hibridne tehnike, jer pored podataka o vremenskoj prognozi koriste i podatke iz prethodnih vremenskih intervala. Prednost hibridne prirode ovih tehnika je što kombinuju malu grešku predviđanja za kratkoročnu prognozu koje pružaju PPF tehnike, i malu grešku predviđanja za srednjeročnu i dugoročnu prognozu koju pružaju podaci iz vremenske prognoze. Nedostatak tehnika koje koriste vremensku prognozu je što je potrebno uložiti dodatan rad u dohvaćanje podataka vremenske prognoze.

Međutim, postoje načini i da se gubici usled dohvaćanja vremenske prognoze svedu na minimum [84]. Vremensku prognozu nije neophodno dohvatati prilikom vršenja predviđanja za svaki vremenski interval, već je moguće samo nekoliko puta u toku dana dohvatiti. Zatim, podatke o vremenskoj

prognozi je moguće integrisati u protokol za komunikaciju, pa kada se vrši redovna komunikacija sa predajnim čvorom, da se tada usput prime i podaci o vremenskoj prognozi.

2.3 Pregled postojećih algoritama za raspoređivanje energije

Uloga algoritma za raspoređivanje energije jeste da odredi kako će funkcionisati sistem i pojedinačne komponente sistema tako da se optimizuje rad sistema po određenom kriterijumu. Kada su u pitanju solarno napajani bežični senzorski čvorovi, glavni kriterijum jeste da se postigne što veći stepen energetske neutralnog rada, odnosno da se maksimizuje urađeni posao, a da se pritom ne ugrozi funkcionalnost čvora.

Ulazi u algoritam mogu biti različiti parametri izvršavanja sistema, poput trenutne potrošnje, opterećenja, karakteristika izvršavanja taskova i slično. Za kriterijum energetske neutralnosti parametar koji se najčešće koristi je trenutno stanje napunjenosti skladišta energije, odnosno trend promene stanja napunjenosti skladišta energije. Ovaj parametar omogućava da se na osnovu poznatog rasporeda energije u prethodnom vremenskom intervalu i posledica tog rasporeda odredi raspored za sledeći vremenski interval prema zadatom kriterijumu. Ukoliko je potrebna mogućnost da se odredi raspored za vremenske intervale dalje u budućnosti, onda je neophodna i informacija o energiji koja će biti dostupna u budućnosti.

Različiti algoritmi su razvijeni [54, 92, 93] koji koriste podatke o trenutno dostupnoj energiji u bateriji i energiji koja će biti dostupna u budućnosti da podese performanse sistema tako da se postigne maksimalno iskorišćenje dostupne energije. Mogu da se podele na pristupe koji problem raspoređivanja predstavljaju kao:

- optimizacioni problem i rešavaju ga putem linearnog programiranja, i
- skup pravila na osnovu kojih se određuje raspoređena energija.

2.3.1 Realizacija u vidu optimizacionog problema

U radovima koji su problem raspoređivanja dostupne energije posmatrali kao optimizacioni problem formulisana je kriterijumska funkcija i vrši se minizovanje ili maksimizovanje te funkcije. Pretraga rešenja predstavljena je u vidu linearnog programiranja. Kod linearnog programiranja definiše se cilj optimizacije i ograničenja pod kojima se vrši optimizacija, nakon čega je moguće primeniti standardne algoritme za rešavanje.

U radovima koji će biti opisani navedeni su ciljevi optimizacije, dok su ograničenja pod kojima se vrši optimizacija vrlo slična za sve realizacije:

1. Osnovno ograničenje koje se koristi proističe iz uslova energetske neutralnog rada. To podrazumeva da je stanje napunjenosti skladišta energije nakon N vremenskih intervala slično ili jednako stanju napunjenosti u početnom vremenskom intervalu. Ako je E_{ES}^t stanje napunjenosti u vremenskom intervalu t , ovaj uslov se može zapisati kao

$$E_{ES}^{t+N} = E_{ES}^t + \epsilon, \quad (2.33)$$

gde je ϵ vrednost tolerancije. Za N se uglavnom uzima 24 časa.

2. Za svaki vremenski interval $t + k$, $k \in [1, N]$ može da se predvidi trenutno stanje napunjenosti skladišta energije na osnovu energije koja će se trošiti E_c^{t+i} , $i \in [0, k - 1]$ i predviđene energije

koja će se prikupiti $\hat{E}_h^{t+i}$, $i \in [0, k-1]$ kao

$$E_{ES}^{t+k} = E_{ES}^t - \sum_{i=0}^{k-1} E_c^{t+i} + \sum_{i=0}^{k-1} \hat{E}_h^{t+i}. \quad (2.34)$$

U okviru vrednosti energije koja će se trošiti po vremenskim intervalima i predviđene energije koja će se prikupiti uračunati su i gubici zbog konverzija energije prilikom prikupljanja, skladištenja i korišćenja.

3. Napunjenost skladišta u svakom trenutku mora da bude manja ili jednaka maksimalnom kapacitetu skladišta E_{ESmax}

$$E_{ES}^{t+i} \leq E_{ESmax}, \forall i \in [1, N] \quad (2.35)$$

4. Pored navedenih ograničenja važe standardni uslovi da sistem radi u definisanom opsegu potrošnje energije, izraz (2.36), ili performansi, najčešće predstavljenom u vidu utilizacije, izraz (2.37).

$$E_{min} \leq E_c^{t+i} \leq E_{max}, \quad \forall i \in [1, N] \quad (2.36)$$

$$D_{min} \leq D^{t+i} \leq D_{max}, \quad \forall i \in [1, N] \quad (2.37)$$

Kansal et al. [51] su algoritam za raspoređivanje energije postavili kao optimizacioni problem sa ciljem da se postigne maksimalna utilizacija

$$\max \sum_{i=1}^N D^{t+i} \quad (2.38)$$

Koristili su predviđanje dostupne energije za 24 časa unapred, da bi za taj period odredili optimalno raspoređivanje energije. Zbog postojanja grešaka u prognozi uveli su dodatni korak koji koriguje utilizaciju na osnovu ponašanja u prethodnom intervalu. Ukoliko se potroši više energije nego što je bilo predviđeno, koriguje se utilizacija za naredne intervale tako da se nadoknade gubici. Slično, ako se potroši manje nego što je predviđeno, utilizacija se koriguje tako da se izbegne prepunjavanje skladišta energije.

Autori rada [51] su predložili i pojednostavljeni iterativni algoritam za koji nije potrebno rešavanje u vidu linearnog programiranja. Prema tom algoritmu, podelili su dan na sunčane i mračne intervale. U inicijalnom koraku, utilizacija u svim sunčanim intervalima se podešava na D_{max} a u svim mračnim intervalima na D_{min} . Zatim, ukoliko se ispostavi da postoji višak energije u skladištu, onda se utilizacija u mračnim intervalima povećava. Na isti način, ukoliko se ispostavi da postoji manjak energije, onda se utilizacija u sunčanim intervalima smanjuje.

Noh et al. [72] su definisali cilj optimizacije tako da se minimizuje varijansa energije koja se troši u okviru svakog vremenskog intervala

$$\min \text{var} \{E_c^{t+k}\}_{1 \leq k < N} \quad (2.39)$$

Time može da se postigne stabilan rad senzorskog čvora u svakom trenutku.

Moser et al. [94] su primenili sličan pristup na raspoređivanje taskova u sistemu gde postoji prikupljanje energije iz okoline. Kao cilj optimizacije postavili su da se task koji vrši očitavanje merenja sa senzora izvršava što češće, čime se obezbeđuje što veća utilizacija.

Mana predstavljanja algoritma za raspoređivanje energije u vidu problema linearnog programiranja je što je rešavanje takvih problem računarski kompleksno. Samim tim, pošto je procesorski element na bežičnim senzorskim čvorovima ograničenih mogućnosti, ovi algoritmi nisu prilagođeni za primenu na bežičnim senzorskim čvorovima.

Renner et al. [70] su takođe algoritam za raspoređivanje energije predstavili u vidu optimizacionog problema koji se iterativno rešava. Cilj algoritma je da se podesi potrošnja senzorskog čvora na osnovu predviđanja energije koja će biti dostupna u budućnosti, tako da se superkondenzator koji se koristi kao skladište energije ne isprazni. Optimizacija se sprovodi u sledećim koracima

1. Pretpostavi se prosečna potrošnja u periodu za koji se vrši optimizacija. Korišćenjem predviđanja energije koja će biti dostupna u budućnosti i pretpostavljene prosečne potrošnje odrede se vrednosti napona na superkondenzatoru u svim intervalima u tom periodu.
2. Izračunate vrednosti napona na superkondenzatoru se proveravaju da li ispunjavaju dva uslova
 - napon na superkondenzatoru nikada ne sme da bude ispod minimalne vrednosti neophodne za rad sistema
 - napon na superkondenzatoru treba da teži da makar jednom u toku dana dostigne maksimalnu vrednost

Ukoliko su uslovi ispunjeni, onda se pretpostavljena potrošnja uzima za donju granicu u pretrazi. Ukoliko neki od uslova nije ispunjen, pretpostavljena potrošnja se uzima za gornju granicu u pretrazi.

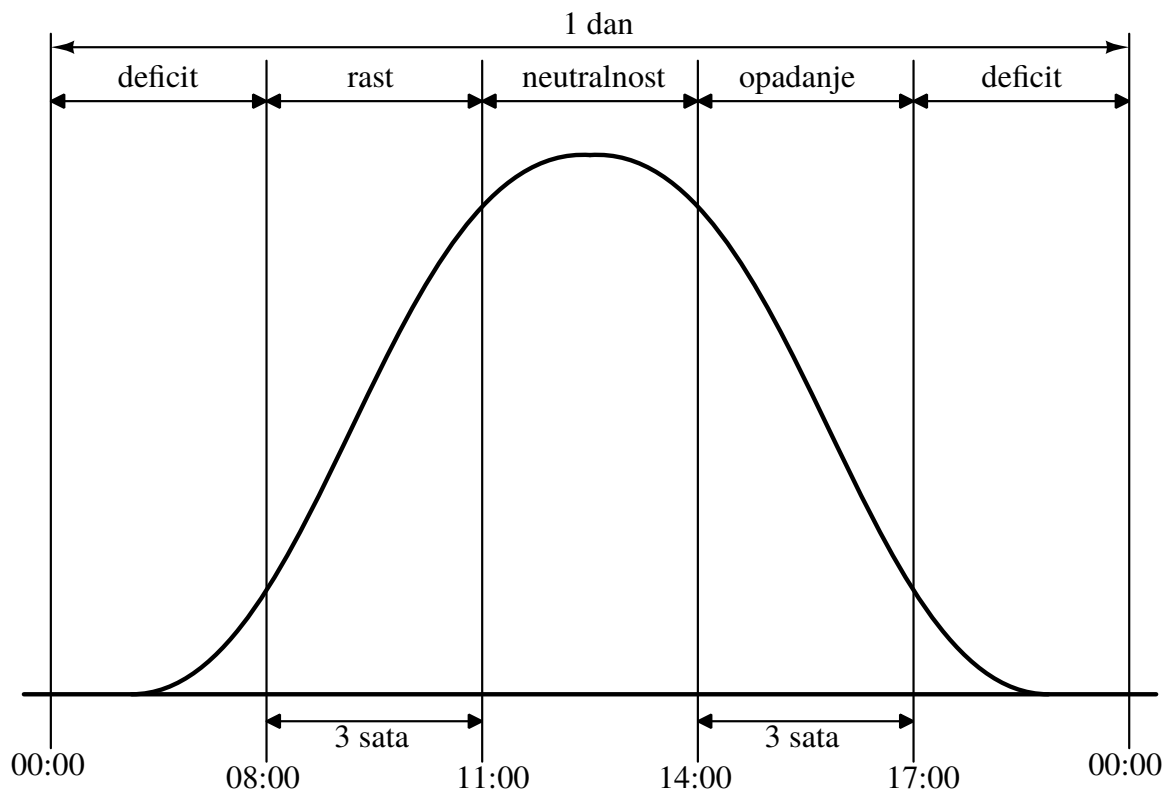
3. Vršiti se binarna pretraga za optimalnu prosečnu potrošnju u periodu u kojem se vrši optimizacija. Za svaku vrednost koja se odabere prolazi se kroz korake 1 i 2, da bi se proverilo da li ispunjava uslove. Kada se nađe optimalna vrednost potrošnje, prema njoj se podešava utilizacija sistema. Ova potrošnja se koristi kao polazna u sledećoj iteraciji.

2.3.2 Realizacija u vidu skupa pravila

Za razliku od algoritama za raspoređivanje energije predstavljenih u vidu optimizacionog problema, realizacija u vidu skupa pravila je mnogo jednostavnija za implementaciju. Algoritmi su dati u vidu skupa pravila ponašanja u zavisnosti od stanja napunjenosti skladišta energije i/ili energije koja će biti dostupna u budućnosti.

Kwon et al. [95] predstavili su algoritam za raspoređivanje energije koji dinamički podešava učestanost prenosa podataka, pri čemu teži da postigne što veći stepen energetske neutralnog rada. Da bi to postigli, dan su podelili na četiri intervala (slika 2.5) prema tome kakav je trend promene solarne energije koja će moći da se prikupi u narednih par sati. U skladu sa intervalom, odlučuje se i kako će da se podesi učestanost slanja. Intervali su:

- interval rasta - interval dana u kojem količina solarne energije raste u narednim satima; odnosi se na jutro i tada je moguće povećavati učestanost slanja na osnovu odnosa između očekivane i trenutne vrednosti utilizacije
- neutralni interval - interval dana u kojem je količina solarne energije slična u narednim satima i veća od energije koju troši senzorski čvor; oko podneva i tada se održava vrednost utilizacije
- interval opadanja - interval dana u kojem količina solarne energije opada u narednim satima; i dalje je ima više nego što treba, ali nemarnim korišćenjem može da nastane problem; odnosi se na predveče i tada se smanjuje vrednost utilizacije
- deficitarni interval - interval dana u kojem je količina solarne energije nedovoljna za rad čvora, gde mora da se vodi računa o količini energije koja se troši; odnosi se na noć i učestanost slanja se prilagođava tako da se skladište energije ne isprazni do narednog intervala.



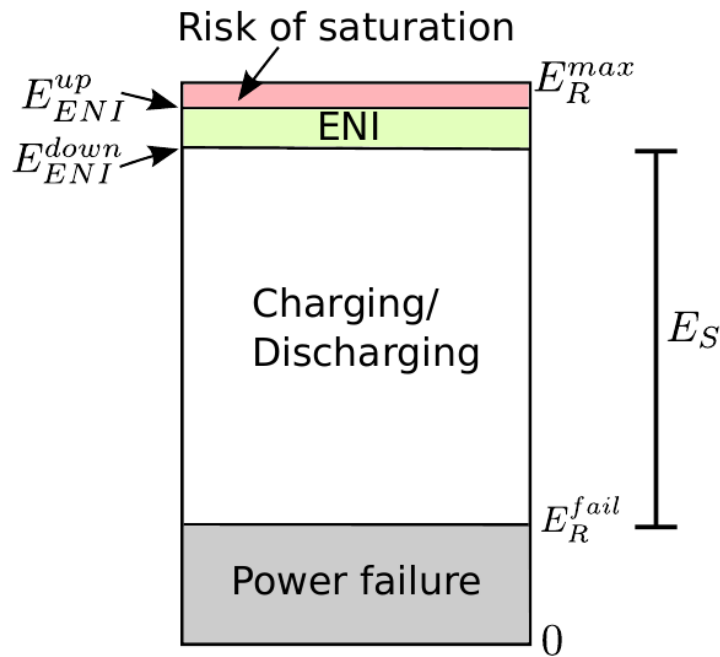
Slika 2.5: Podela dana na intervale prema trendu kretanja količine energije koja je dostupna za prikupljanje (zasnovano na [95, p. 7])

Aoudia et al. [54] su kao ulaz u algoritam koristili stanje napunjenosti baterije i promene u stanju napunjenosti baterije u prethodnom vremenskom intervalu. Promena stanja napunjenosti baterije u prethodnom intervalu ΔE_{ES} može biti okarakterisana kao

- pražnjenje, ukoliko se smanjila količina uskladištene energije, $\Delta E_{ES} < 0$
- stagnacija, ukoliko se nije promenila količina uskladištene energije, $\Delta E_{ES} = 0$
- punjenje, ukoliko se povećala količina uskladištene energije, $\Delta E_{ES} > 0$

Stanje napunjenosti baterije je podeljeno na četiri zone (slika 2.6).

- Zona ispražnjenosti - zona u kojoj senzorski čvor ne funkcioniše i nikada ne bi trebalo da se nađe u toj zoni.
- Zona punjenja - u ovoj zoni potrebno je obezbediti da se baterija napuni dok ima energije koja može da se prikupi da bi mogla da se koristi kada je nema; sa povećanjem dostupne energije performanse se proporcionalno skaliraju, ali tako da ima dovoljno energije za dopunu; ako stagnira smanjuju se performanse a ako se smanjuje smanjuju se performanse.
- Zona energetski neutralnog rada - Cilj algoritma je da obezbedi da sistem radi u ovoj zoni; ako se povećava energije povećavaju se performanse, ako stagnira energija stagniraju performanse, a ako opada energija smanjuju se performanse.
- Zona prepunjenosti - u kojoj postoji rizik da se disipira energija jer je baterija skoro puna; prilikom povećanja energije i stagnacije povećavaju performanse, dok se prilikom smanjenja energije ništa ne radi.



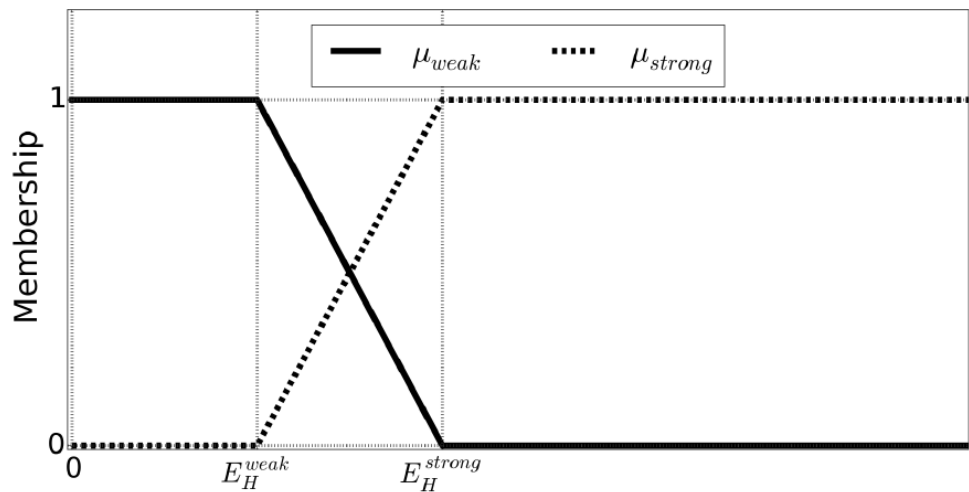
Slika 2.6: Nivoi stanja napunjenosti skladišta energije od interesa za algoritam za raspoređivanje [54, p. 7])

Rodway et al. [92] su implementirali algoritam u vidu fazi pravila. Razmatrali su varijante u kojima se koristi samo informacija o stanju napunjenosti baterije i u kojima se pored stanja napunjenosti baterije koristi i predviđanje osunčanosti na osnovu podataka o vazдушnom pritisku. U radu je pokazano da algoritam koji koristi informaciju o predviđenoj energiji može da da bolje rezultate od onog koji ne koristi.

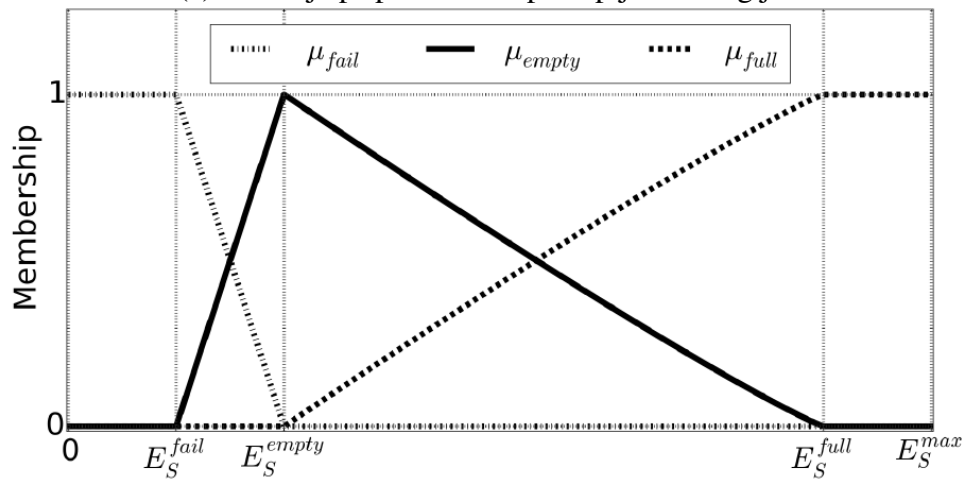
Aoudia et al. [93] su predstavili algoritam za raspoređivanje energije zasnovan na fazi logici. Kao ulazni parametri u algoritma koriste se stanje napunjenosti skladišta energije i predviđanje energije koja će biti dostupna u budućnosti. Funkcije pripadnosti za ulazne parametre prikazane su na slici 2.7.

Skup pravila za odlučivanje organizovan je na sledeći način

- ukoliko je u skladištu energije ostalo vrlo malo energije (zona *FAIL* na slici 2.7a), bez obzira na predviđanje dostupne energije podešavaju se minimalne performanse;
- ukoliko u skladištu energije ima dovoljno energije (zona *EMPTY* na slici 2.7a), onda se u zavisnosti od predviđanja dostupne energije određuju performanse na sledeći način
 - ukoliko je dostupno malo energije (doprinos *WEAK* na slici 2.7b) podešavaju se minimalne performanse;
 - ukoliko je dostupno dosta energije (doprinos *STRONG* na slici 2.7b) performanse se određuju tako da se deo energije koja će biti dostupna iskoristi za dopunjavanje skladišta energije;
- ukoliko je skladište energije skoro puno (zona *FULL* na slici 2.7a), onda se u zavisnosti od predviđanja dostupne energije određuju performanse na sledeći način
 - ukoliko je dostupno malo energije (doprinos *WEAK* na slici 2.7b) ne menjaju se performanse;



(a) Funkcija pripadnosti za prikupljenu energiju



(b) Funkcija pripadnosti za stanje napunjenosti skladište energije

Slika 2.7: Funkcije pripadnosti za prikupljenu energiju i stanje napunjenosti skladišta energije koji se koriste kao ulaz u algoritam za raspoređivanje energije zasnovan na fazi logici [93, p. 7])

- ukoliko je dostupno dosta energije (doprinos *STRONG* na slici 2.7b) performanse se postavljaju na maksimalnu vrednost koja omogućava da se stanje u skladištu energije ne promeni.

Prednost algoritama zasnovanih na skupu pravila je što su jednostavni za implementaciju i jednostavno je ažurirati pravila u toku rada. Mana je što ih je teže upotrebiti za više od jednog intervala unapred.

Glava 3

Algoritam za optimizaciju potrošnje i performansi

Prilikom dizajna modernih namenskih računarskih sistema, sa svakom novom generacijom teži se da uređaji budu kompaktniji. Međutim, smanjenje dimenzija uređaja predstavlja problem iz dva razloga:

- Termalni zahtevi - sa smanjenjem dimenzija uređaja električne komponente su gušće pakovane, što otežava odvođenje toplote koja se disipira tokom rada; ovaj problem je dodatno izražen pošto se aktivno hlađenje sistema sve ređe koristi zbog manjka prostora u kućištu, pokretnih delova i buke.
- Energijski zahtevi - smanjenjem veličine uređaja smanjuje se i veličina baterije; samim tim smanjuje se i kapacitet baterije.

U oba slučaja, primenom tehnika za smanjenje potrošnje moguće je postići da sistem radi u okviru zadatih termalnih i energijskih zahteva po cenu smanjenih performansi. U zavisnosti od toga kako su performanse sistema definisane, smanjenje performansi može biti u vidu produženog trajanja posla, preskočenih instanci taskova, manje izvršenih merenja ili obrađenih rezultata, ili kao trošenje dodatnog vremena čekajući da operacija može da se izvrši.

Potrebno je razlikovati tehnike za smanjenje potrošnje, koje nude ŠTA da se uradi, od algoritama za optimizaciju potrošnje i performansi, koji kažu KADA i KAKO da se uradi. Tehnike za smanjenje potrošnje nude mogućnost da se utiče na potrošnju određene komponente ili grupe komponenti. Međutim, u okviru tehnika nije sadržan proces odlučivanja. Odlučivanje o tome koja tehnika će se koristiti, u kom trenutku i na koji način, implementirano je u okviru algoritma za optimizaciju potrošnje i performansi. Sam algoritam za optimizaciju potrošnje i performansi primenjuje tehnike za smanjenje potrošnje da bi postigao kompromis između uštede energije i povećanja performansi.

Na primer, tehnika čekanja opisana u glavi 1 je tehnika za smanjenje potrošnje. Tehnika čekanja prati koliko traje neaktivnost komponente i nakon isteka određenog perioda isključuje tu komponentu, čime se štedi energija. Međutim, da li će se tehnika primenjivati ili ne, zavisi od odluke koju donosi algoritam za optimizaciju potrošnje i performansi. Ukoliko je potrebno održati nivo performansi, onda nije poželjno da se komponente stalno isključuju, zato što se gubi vreme na čekanje da se komponente ponovo uključe. U tom slučaju algoritam, u cilju povećanja performansi, može da odluči da se ne koristi ta tehnika.

Drugi primer je tehnika za dinamičko skaliranje učestanosti i napona (DVFS). DVFS je tehnika koja omogućava uštedu energije smanjenjem performansi, odnosno smanjenjem radne učestanosti

procesora. Ali odluku o odabiru konkretne radne učestanosti i napona koji će se podesiti donosi algoritam za optimizaciju potrošnje i performansi, na osnovu trenutnog stanja sistema i zadatog kriterijuma optimizacije.

3.1 Organizacija algoritma za optimizaciju potrošnje i performansi

Opšta organizacija okruženja u kojem se primenjuje algoritam za optimizaciju potrošnje i performansi prikazana je na slici 3.1. Sa slike 3.1 algoritam za optimizaciju potrošnje i performansi se sastoji iz sledećih elemenata:

- algoritma za raspoređivanje energije, koji uključuje:
 - tehnike za smanjenje potrošnje,
 - modul za odlučivanje; može ih biti više u zavisnosti od vrsta komponenti u sistemu i tehnika za smanjenje potrošnje koje mogu da se primene,
- modela sistema kojem se želi optimizovati potrošnja i performanse, kao i modela različitih procesa, čiji rezultati mogu da se koriste kao ulaz u algoritam za raspoređivanje energije, odnosno modul za odlučivanje.

Algoritam za raspoređivanje energije i tehnike za smanjenje potrošnje detaljno su opisani u glavama 1 i 2, respektivno.

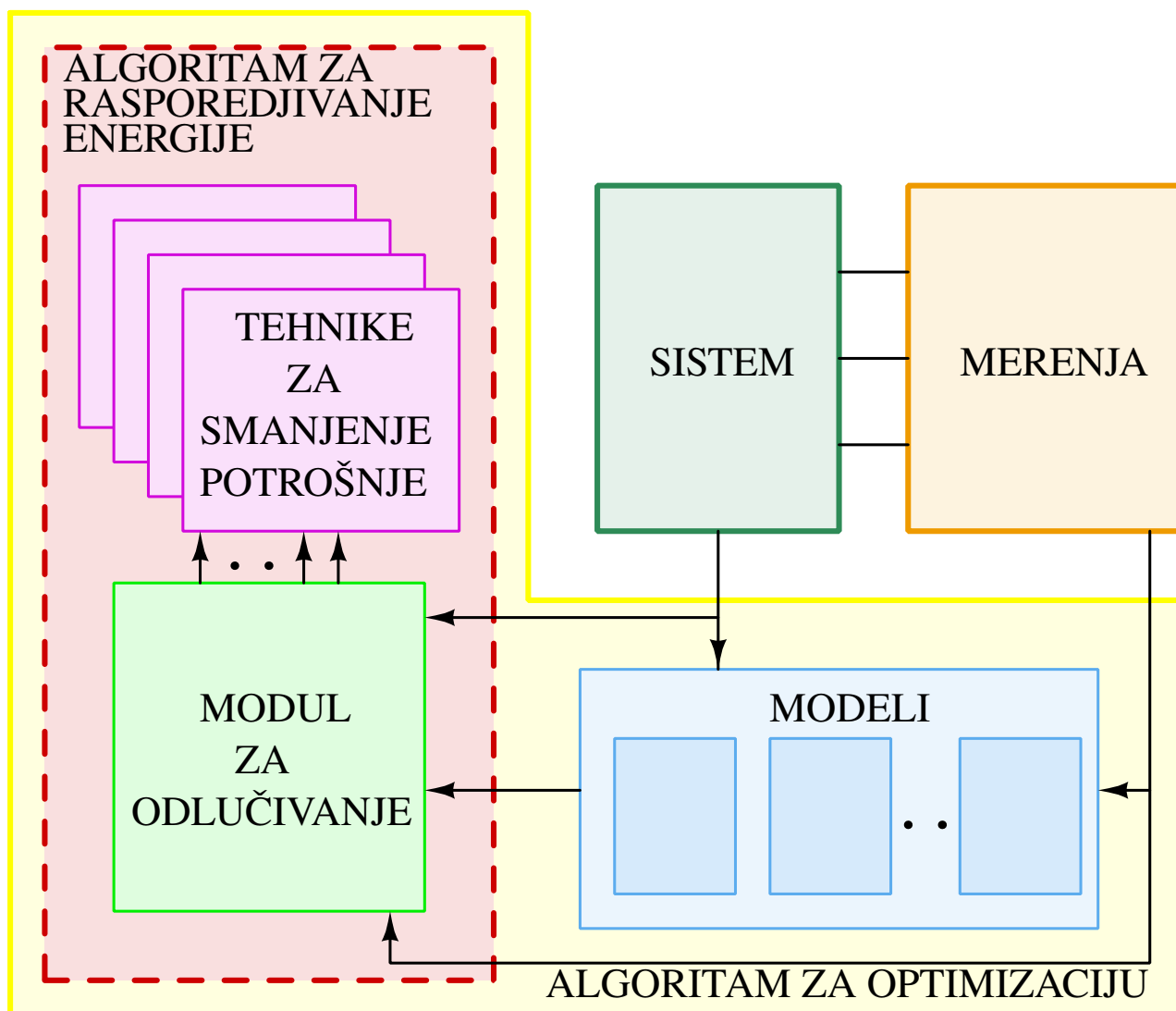
U ovoj glavi biće detaljnije opisani podaci koji se koriste kao ulaz u algoritam, kao i načini modelovanja sistema.

3.2 Ulazni podaci u algoritam za optimizaciju potrošnje i performansi

Algoritam za optimizaciju potrošnje i performansi koristi ulazne podatke na osnovu kojih donosi odluke. Ulazni podaci mogu da se podele u tri kategorije:

- podaci od samog sistema kojem se optimizuju potrošnja i performanse - to su uglavnom podaci koji se odnose na rad sistema, poput raspoređivanja taskova, performansi i degradacije prilikom izvršavanja;
- podaci i merenja koji se dobijaju spolja, bilo merenjem na hardveru ili putem nekog dodatnog interfejsa - podaci o potrošnji, stanju napunjenosti baterije, energiji koja se prikuplja sa izvora energije iz okoline, raznim parametrima koji mogu da se mere iz okoline koji mogu da utiču na rad sistema, poput temperature okoline;
- podaci dobijeni iz modela koji su sadržani u okviru algoritma - obrađeni podaci iz prethodne dve tačke provučeni kroz odgovarajuće modele, koji na taj način mogu praktičnije da se upotrebe u samom algoritmu.

Pored ovih parametara, važan ulaz u algoritam za optimizaciju je i sam cilj optimizacije.



Slika 3.1: Organizacija algoritma za optimizaciju potrošnje i performansi

3.2.1 Podaci koji se dobijaju od samog sistema

Podaci koji se dobijaju od samog sistema predstavljaju parametre rada sistema. Ti parametri mogu biti statički, zadati prilikom dizajna aplikacije, kao i dinamički, dobijeni očitavanjem u toku rada.

U statičke parametre spadaju broj i prioriteti taskova, očekivano najgore vreme izvršavanja (WCET), period izvršavanja periodičnih taskova, itd.

Dinamički parametri obuhvataju kompletne informacije o raspoređivanju taskova, poput vremena pojave instanci taskova, broja izvršenih instanci taskova u određenom periodu, broja preskočenih instanci taskova, itd. To su podaci na osnovu kojih je moguće steći sliku o tome šta sistem trenutno radi i oceniti performanse sistema.

Za merenje ovih parametara potrebno je instrumentirati operativni sistem. To se najčešće postiže proširenjem kontrolnog bloka taska (eng. *Task Control Block* - TCB), ali i dodavanjem funkcionalnosti u raspoređivač [96]. Na taj način se prilikom promene konteksta mogu dobiti informacije o taskovima koji su se izvršavali, kao i o tome da li su ispoštovani rokovi. Takođe, može biti implementirano u vidu servisa operativnog sistema, koji periodično očitava i usrednjava podatke. Ovi parametri su bitni posebno ako odluke algoritma utiču na način raspoređivanja taskova.

3.2.2 Podaci i merenja koji se dobijaju spolja

Za podatke i merenja koji se dobijaju spolja potreban je ili način za merenje ili dodatni interfejs kojim se mogu dobiti. To može biti analogno-digitalni konvertor, ali i posebna komponenta.

Najvažniji parametri za optimizaciju potrošnje su prosečna i trenutna potrošnja (odnosno struja i napon) sistema kao i pojedinačnih delova sistema, stanje napunjenosti skladišta energije, količina energije koje se prikuplja sa izvora iz okoline. Idealan slučaj je kada su dostupna merenja potrošnje, napona i struje za sve grane napajanja, kao i za sve ostale parametre koji su važni za optimizaciju potrošnje i performansi. Tada su uvek dostupna aktuelna merenja na osnovu kojih je moguće adaptirati funkcionalnost.

Pored parametara potrošnje, u ovu grupu spadaju i podaci koji se mogu dobiti od drugih izvora iz same senzorske mreže, kao i sa interneta. Za primenu u bežičnim senzorskim mrežama korisni podaci mogu da uključuju merenja sa drugih čvorova, upozorenja, predviđanja i slično.

Sva merenja su neophodna i kao ulaz u algoritam na osnovu kojih se donosi odluka, i kao povratna informacija za primenjene tehnike u cilju evaluacije efekta nakon primene.

Nažalost, često nije moguće meriti sve ove parametre. Merenje u granama napajanja uglavnom uključuje dodavanje šantova. Merenjem pada napona na šantu moguće je odrediti jačinu struje, što u kombinaciji sa merenjem napona grane napajanja daje potrošnju po toj grani u svakom trenutku.

Nedostatak korišćenja šanta je što se na šantu disipira energija, kao i što postoji opteretni napon (eng. *burden voltage*) [97]. Postoje tehnike kojima je moguće eliminisati uticaj opteretnog napona, ali sve tehnike povećavaju broj komponenti koje se koriste, kao i ukupnu potrošnju. Takođe, analogno-digitalni konvertori kojima se meri pad napona na šantu dodatno troše energiju.

Samim tim, potpuno merenje svih parametara rada sistema uglavnom se obezbeđuje prilikom razvoja. Za finalni proizvod se koristi modelovanje potrošnje [98], ili se ostavlja podskup merenja koji je neophodan za optimalan rad.

3.2.3 Cilj optimizacije

U zavisnosti od karakteristika sistema, razlikuje se i cilj optimizacije. Pored klasičnih ciljeva optimizacije, kao što je produženi rad na baterijskom napajanju ili smanjenje potrošnje kod uređaja napajanih sa mreže, cilj optimizacije može uzimati i druge kriterijume.

U zavisnosti od toga kakvo je napajanje sistema, sa mreže, baterijsko ili baterijsko uz prikupljanje energije iz okoline, razlikuju se glavni ciljevi optimizacije potrošnje i performansi, kao i neophodna merenja. U svakoj varijanti potrebni su podaci o trenutnoj potrošnji.

Ukoliko se sistem napaja sa mreže, cilj optimizacije potrošnje može biti da se smanji račun za struju, uz održavanje željenog nivoa performansi. Takođe, cilj može da bude da se ne pređe određena vrednost prosečne potrošnje zbog temperaturnih ograničenja. U tom slučaju, ulaz u algoritam predstavlja i trenutna temperatura.

Za baterijski napajani sistem, cilj optimizacije jeste da baterija potraje što duže, uz zadovoljenje određenih performansi. Kada su performanse poznate, onda je moguće odrediti podešavanja tako da baterija što duže potraje. Kao ulaz u algoritam potrebno je i stanje napunjenosti baterije.

Kod baterijski napajanih sistema koji prikupljaju energiju iz okoline, glavni cilj optimizacije jeste energetske neutralan rad. U ovom slučaju, neophodno je konstatno praćenje parametara i donošenje odluka na osnovu tih parametara. Pored stanja napunjenosti baterije, potrebno je i predviđanje količine energije koja će biti dostupna u budućnosti.

Naravno, pored osnovnog cilja, moguće je da u okviru algoritma budu definisani i sporedni ciljevi. U tom slučaju, konačni cilj optimizacije predstavlja relaciju između svih definisanih ciljeva.

3.3 Modul za donošenje odluka

Modul za donošenje odluka predstavlja centralni deo algoritma za optimizaciju potrošnje i performansi. U zavisnosti od definisanog cilja optimizacije i neophodnih merenja, modul donosi odluku na koji način će se primeniti dostupne tehnike za smanjenje potrošnje radi postizanja kompromisa između potrošnje i performansi.

Kao što je pokazano u glavi 2, sam modul za donošenje odluka može biti zadat analitički, u vidu optimizacionog problema, ili u vidu skupa pravila.

Implementacija modula za donošenje odluka u vidu optimizacionog problema moguća je samo kod sistema koji imaju dovoljno procesorske snage, da bi mogli da reše optimizacioni problem. Pored procesorske snage, važno je da problem može da se predstavi u vidu skupa jednostavnih uslova koje rešenje treba da ispuni. Primeri modula za donošenje odluka zadatih u vidu optimizacionog problema koji su analizirani u glavi 2 zasnovani su na optimizaciji utilizacije sistema tako da se postigne energetski neutralni rad uz što veću utilizaciju. U tom slučaju, nije potreban model sistema, već samo znanje o vrednosti potrošnji za maksimalnu i minimalnu utilizaciju i na osnovu određenih kriterijuma, poput zahteva za energetski neutralnim radom, ograničenim kapacitetom baterije i definisanim performansama moguće je zadati algoritam.

Modul za donošenje odluka je češće je implementiran u vidu skupa pravila. Stanja komponenti sistema su diskretizovana i predstavljaju skup stanja. Na osnovu stanja komponenti definiše se koja pravila se primenjuju. Ovo je praktičniji pristup u odnosu na optimizacioni problem, jer čak i složenije organizacije mogu jednostavno da se modeluju i da se opiše njihova interakcija u okviru sistema.

3.4 Modeli procesa i sistema

Modelovanjem je omogućeno da se na osnovu ulaznih merenja dobiju podaci koje algoritam može na jednostavniji način da tumači i iskoristi. Dve kategorije modelovanja se ističu: modelovanje sistema i modelovanje procesa.

3.4.1 Model sistema

Modelovanje sistema podrazumeva da se pojedini delovi sistema, sistem u celini, kao i njihovo ponašanje, opišu u vidu mašina stanja ili analitički [99].

Implementacija u vidu mašina stanja je pogodna zbog jednostavne realizacije. Radi jednostavnije implementacije, za odabir podešavanja performansi komponenti sistema se uglavnom koriste diskretna stanja. Stanja sistema i stanja komponenti sistema se modeluju i onda se na osnovu modela vrši upravljanje. Svaka komponenta ima svoj profil potrošnje koji zavisi od stanja u kojem se komponenta nalazi.

Sa druge strane, postoje situacije gde je model sistema pogodnije opisati analitički, što se često koristi za preciznije modelovanje performansi. Recimo zavisnost potrošnje od radne učestanosti, ili broja poslatih paketa preko mreže.

Algoritmi za optimizaciju potrošnje i performansi su implementirani u okviru softvera, najčešće u

okviru operativnog sistema. Modelovanje pojedinačnih komponenti i sistema kao celine omogućava da se opiše doprinos svakog dela ukupnoj potrošnji sistema, kao i da se apstrahuju specifičnosti hardvera koje nisu presudne za potrošnju i performanse. Apstrakcijom specifičnosti hardvera kroz model omogućeno je da isti softver može da se pokreće na različitim platformama, a jedino što je potrebno je odgovarajući model dostupnog hardvera. Na taj način se pojednostavljuje održavanje softvera.

ACPI (*Advanced Configuration and Power Interface*) Razvijen je za potrebe PC računara. U okviru ACPI komponente sistema opisane su u vidu tabela. Tabele služe da operativni sistem može prilikom pokretanja da očitava informaciju o hardveru koji mu je dostupna. Na taj način isti operativni sistem može da se pokreće na različitim hardverskim sistemima, jer su specifikacije hardvera sadržane u ACPI tabelama.

ACPI specifikacija apstrahuje hardverske specifičnosti i posmatra modele pojedinačnih komponenti. U okviru modela definisana su stanja u kojima komponente mogu da se nalaze. Algoritam za optimizaciju potrošnje i performansi implementiran u okviru operativnog sistema upravlja samo stanjima komponenti.

Stanja sistema kao i pojedinačnih komponenti definisana u okviru ACPI specifikacije su (slika 3.2):

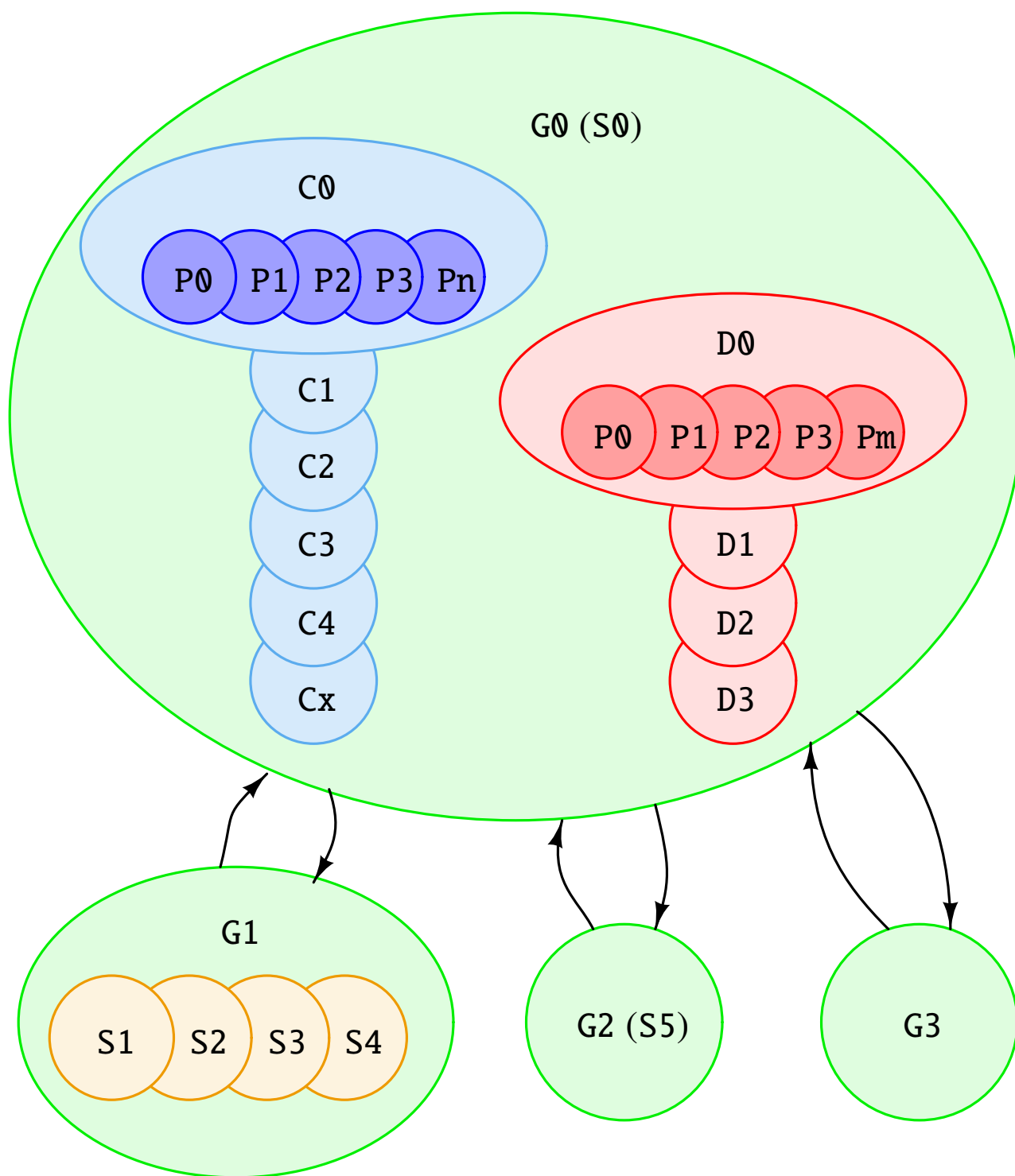
- G (*Global*) – stanja u kojima može da se nalazi sistem,
- S (*Sleep*) – stanja smanjene potrošnje energije sistema,
- C (*CPU*) – stanja u kojima može da se nalazi procesor,
- D (*Device*) – stanja u kojima mogu da se nalaze pojedinačne komponente,
- P (*Performance*) – definišu potrošnju i performanse procesora ili uređaja u datom stanju.

Sva stanja su numerisana brojevima od 0 pa naviše. U konkretnim implementacijama sistema, stanja sa indeksom 0 su uvek podržana, dok ostala stanja i ne moraju biti.

Globalna (G) stanja se odnose na ceo sistem. U stanju G0 sistem je u potpunosti aktivan i tada je stanje smanjene potrošnje S0, što znači da sistem nije u režimu smanjenje potrošnje. U stanju G1 se ulazi u *sleep* režim, gde se stanjima S definiše nivo. Što je veći indeks stanja S to se više energije štedi, ali je potrebno i više vremena da bi sistem ponovo bio funkcionalan. U stanju S2 sistem je u suspendovanom stanju, gde je kontekst sačuvan u RAM memoriji koja se osvežava. U stanju S3 sistem je u stanju hibernacije, gde je kontekst sačuvan na hard disku ili drugoj dostupnoj postojećoj memoriji. U stanjima G2/G3 sistem je u potpunosti isključen i potrebno je proći kroz ponovni proces pokretanja da bi bio funkcionalan.

Sličan je koncept i kada su u pitanju C stanja. U stanju C0 procesor je potpuno aktivan i P stanjima se definiše nivo performansi. Stanje P0 predstavlja najveći nivo performansi, ali i potrošnje. Što je veći indeks P stanja to procesor ima manje performanse, ali i nižu potrošnju. U C stanjima sa indeksom većim od 0 procesor je u nekom od režima smanjene potrošnje. U zavisnosti od hardvera različite varijante su dostupne, od čekanja na prekid, do isključenja taktova ili keš memorija. Što je veći indeks C stanja to se više energije štedi, ali je potrebno više vremena da procesor može ponovo da krene da radi.

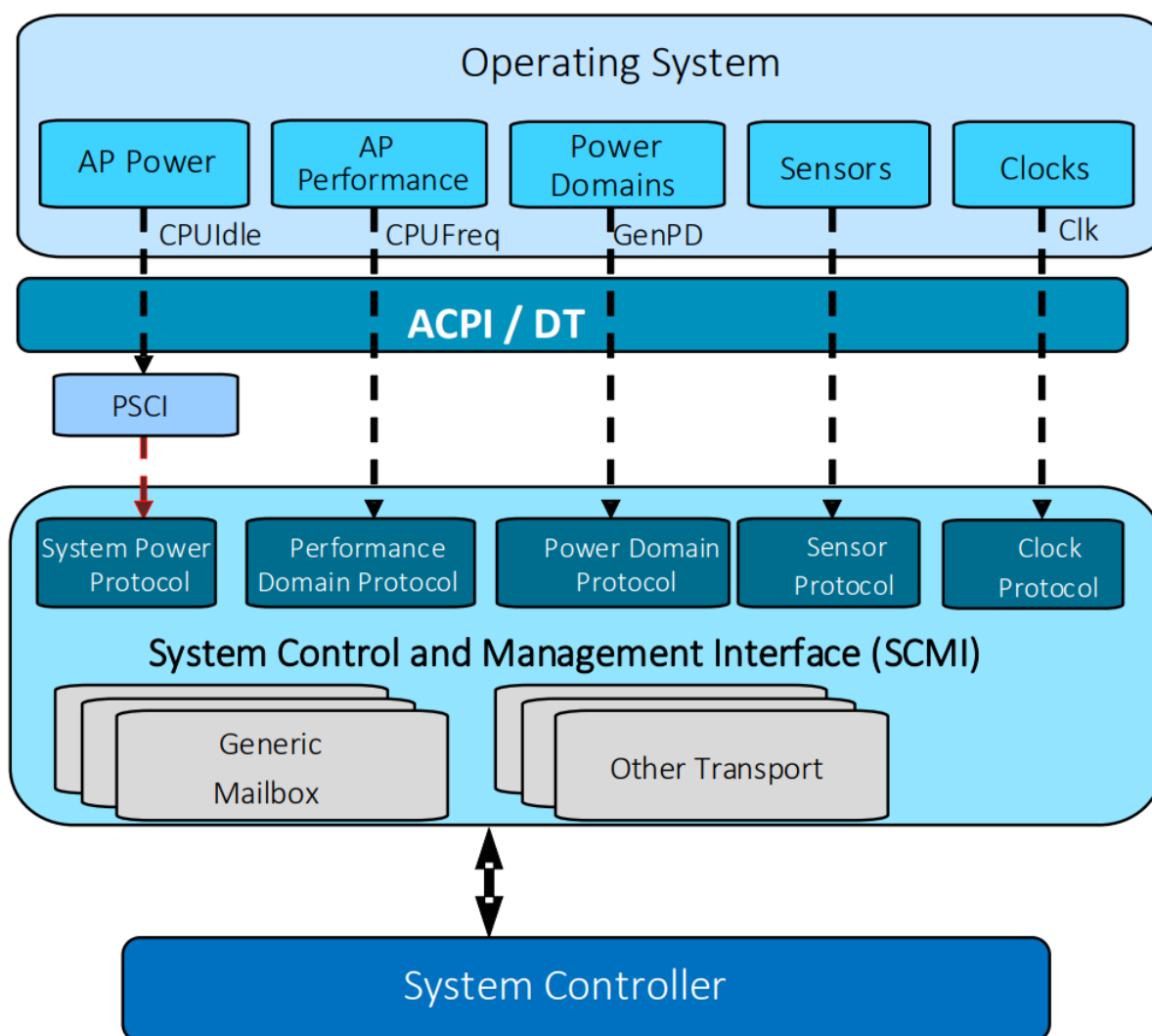
D stanja se tumače isto kao i C stanja, samo što se odnose na pojedinačne komponente a ne na procesor. Stanje D0 predstavlja aktivno stanje, gde se P stanjima definiše nivo performansi, dok D stanja sa indeksom većim od 0 predstavljaju neki režim smanjene potrošnje.



Slika 3.2: Podržana stanja prema ACPI specifikaciji: sistema (G), smanjene potrošnje sistema (S), procesora (C), komponenti (D) i performansi (P).

SCMI (System Control and Management Interface) U namenskim računarskim sistemima ACPI je retko zastupljen. ARM (*Advanced RISC Machine*) za svoje aplikacione procesore koji se koriste u sistemima na čipu u mobilnim telefonima nudi SCMI. Ideja je da se napravi uniforman interfejs između operativnog sistema i posebnog procesorskog jezgra, kontrolera sistema (eng. *System Controller - SC*), koje je zaduženo za upravljanja stanjima hardvera.

Prema SCMI, operativni sistemi koji se izvršavaju na sistemu na čipu su *agenti* koji preko *protokola* definisanih u SCMI zadaju komande za podešavanje stanja hardverskih komponentu i primaju



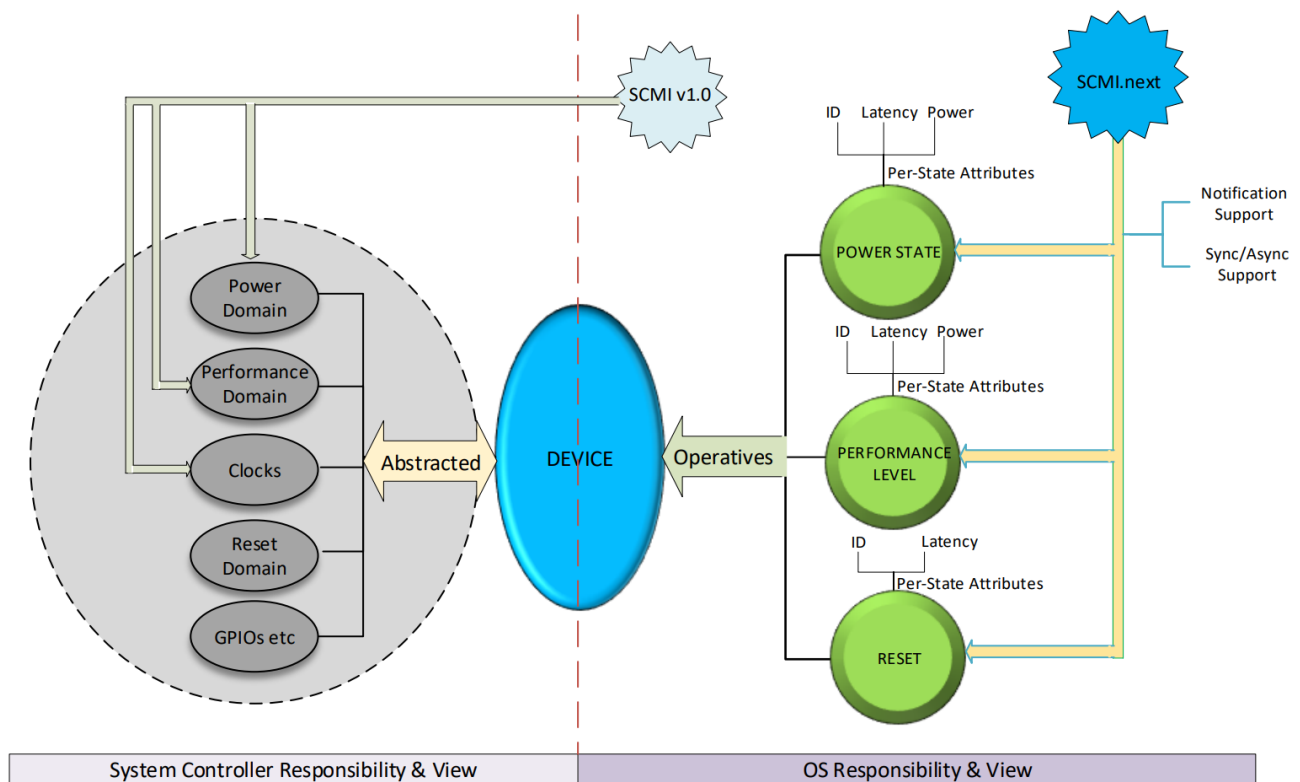
Slika 3.3: SCMI agenti i protokoli [100]

notifikacije o promenama. Protokoli uključuju podršku za upravljanje stanjima procesora, taktnih i energijskih domena, kao i prisutnim uređajima. Kada je u pitanju upravljanje stanjima procesora, tu se koristi PSCI (eng. *Power State Coordination Interface*) koji je isto uveden od strane ARM-a.

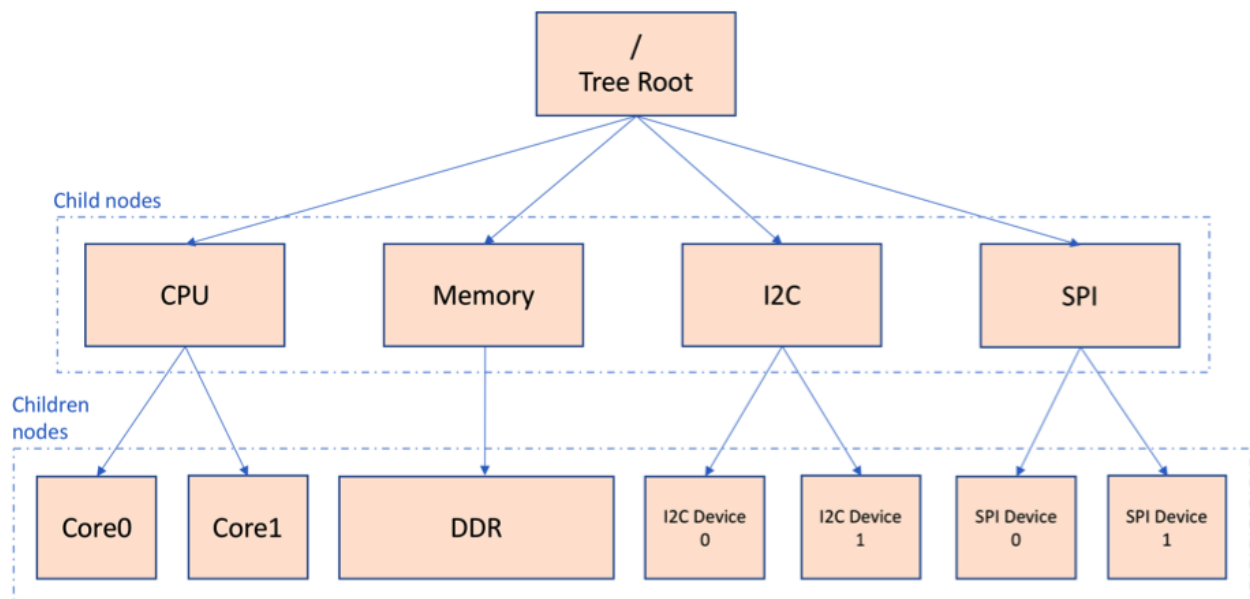
Pored eksplicitnih zahteva za podešavanje stanja domena u toku rada, ideja je da SCMI nudi apstrakciju komponenti, koja se sa strane operativnih sistema vide kao stanja, performanse i moguća resetna stanja (slika 3.4). Na osnovu tih podešavanja i znanja o sistemu kontroler sistema može da podesi i stanja odgovarajućih domena, bez eksplicitne komande od strane agenata.

Za razliku od ACPI, koji uvodi opis dostupnog hardvera u vidu tabela, SCMI nema tu mogućnost. Međutim, u te svrhe se koristi opis stabla uređaja (eng. *Flattened Device Tree* - FDT), slika 3.5. FDT opis predstavlja hijerarhijski prikaz strukture sistema. Navode se komponente koje su prisutne u sistemu na čipu, adrese, prekidi, taktovi, sve što je potrebno za inicijalizaciju komponente. Prilikom pokretanja sistema parsira FDT fajl, čime dobija informaciju o komponentama koje su mu na raspolaganju. Na taj način OS može da bude portabilan i da su sve razlike sačuvane samo u FDT.

UHA (Unified Hardware Abstraction) Razvijene su i varijante poput UHA [103]. U ovom radu predstavljen je jezik za opis stanja komponenti u okviru sistema na čipu, kao i taktnih i naponskih domena kojima pripadaju komponente, slika 3.6. Na taj način je za svaku komponentu moguće definisati akciju koja se preuzima prilikom prelaska u određeno stanje.

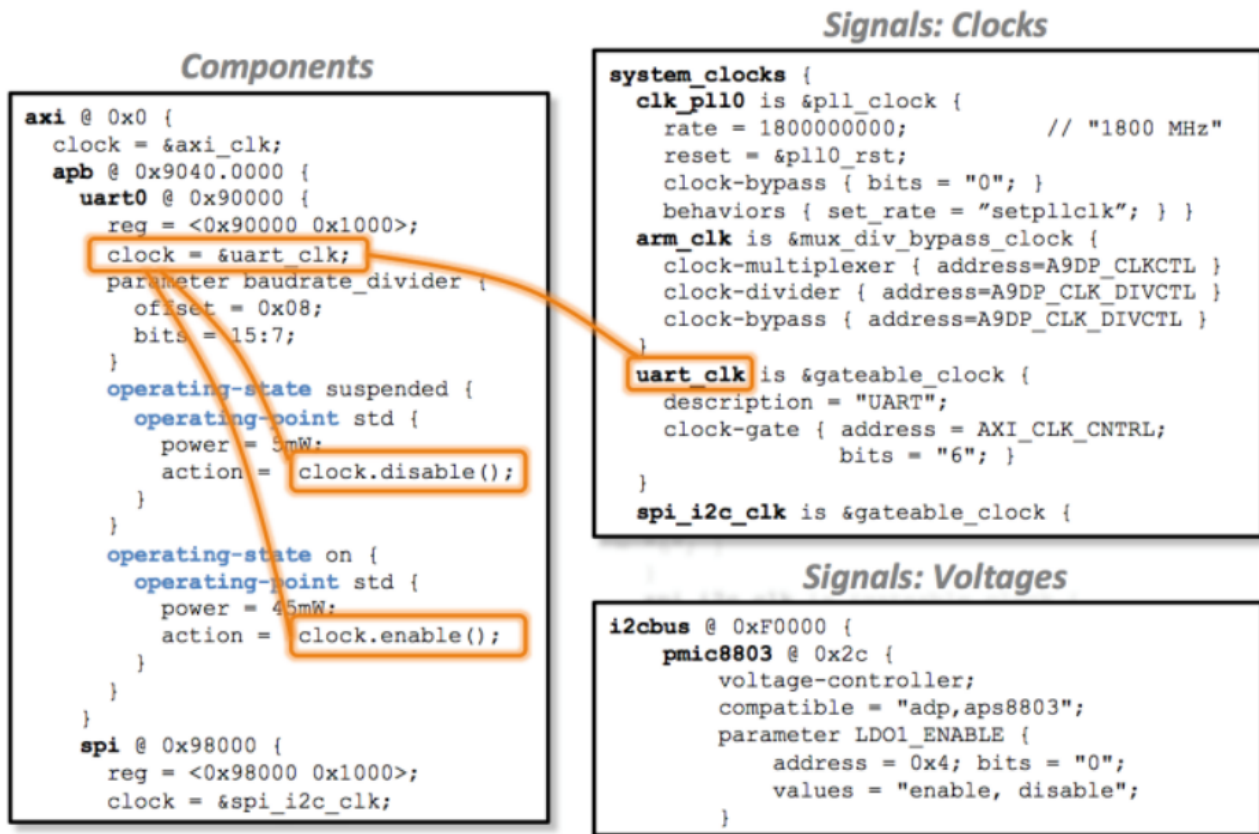


Slika 3.4: SCMI apstrakcija komponenti [101]

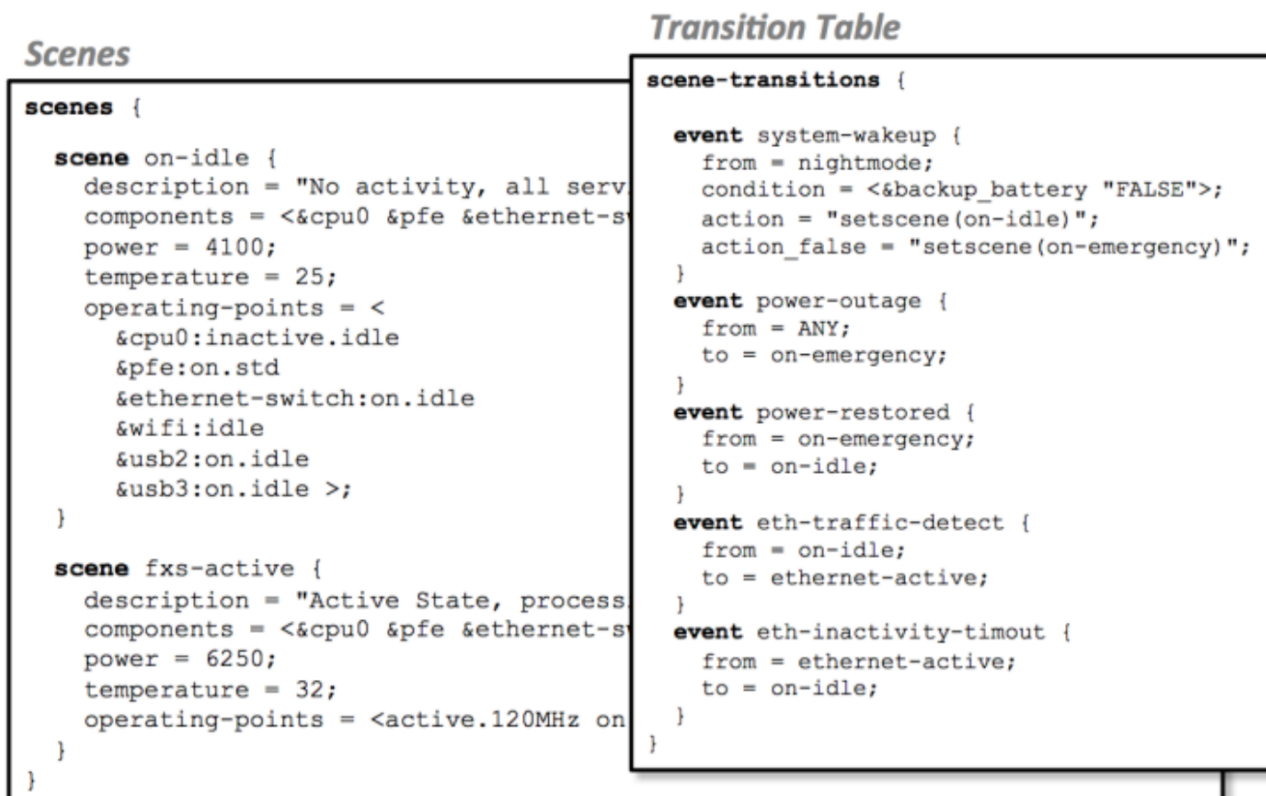


Slika 3.5: Opis stabla uređaja - FDT opis [102]

Scene se koriste za opis stanja čitavog sistema, a tranzicije za opis mogućih prelazaka između scena (slika 3.7). Za svaku scenu definisano je očekivano stanje podskupa komponenti na koje utiče ta scena, kao i model potrošnje za scenu. Model može da se i ažurira u toku rada na osnovu merenja. Na osnovu UHA opisa može da se generiše izvorni kod koji može da se koristi na konkretnoj platformi.



Slika 3.6: UHA komponente i signali (preuzeto iz [103, p. 2])



Slika 3.7: UHA scene i tranzicije (preuzeto iz [103, p. 2])

3.4.2 Modeli procesa

Pored modela sistema, u okviru algoritma za optimizaciju potrošnje i performansi mogu da se modeluju procesi kojima je moguće iz ulaznih podataka izvući bitne karakteristike koje se kasnije uvode u modul za donošenje odluka. Mogu biti predikcija vrednosti promenljive u cilju broja smanjenja uzorkovanja, ili analiza na osnovu prethodnih merenja.

Na primeru solarno napajanih bežičnih senzorskih čvorova koji za odlučivanje o raspoređivanju energije koriste predviđanje energije koja će biti dostupna u budućnosti, same tehnike za predviđanje dostupne energije su implementirane u okviru modela. Dakle, tehnike na osnovu ulaznih podataka (prikupljena energija u vremenskim intervalima kod PPF tehnika i vremenska prognoza kod tehnika zasnovanih na vremenskoj prognozi) kao izlaz daju predviđanje energije koja će biti dostupna u budućnosti koja se koristi kao ulaz u algoritam za raspoređivanje energije, odnosno modul za donošenje odluka.

3.5 Postojeći algoritmi za optimizaciju potrošnje i performansi

Algoritam za optimizaciju potrošnje, u zavisnosti od dostupnog hardvera i mogućnosti hardvera može biti izuzetno kompleksan. U cilju kontrolisanja kompleksnosti algoritma i uticaja kompleksnosti algoritma na softver koji se razvije i pokreće, koriste se različiti pristupi. Cilj je napraviti skalabilan sistem u kojem se energija skalira performansama [103], odnosno omogućiti efikasnu upotrebu energije.

U računarskim (PC) sistemima je u algoritam za optimizaciju potrošnje i performansi implementiran u okviru operativnog sistema (eng. *Operating System directed Power Management* - OSPM). Specifičnost računarskih sistema je da je korisnik skoro uvek prisutan, tako da ne postoji potreba za korišćenjem potpuno funkcionalnog algoritma za optimizaciju potrošnje. Samim tim, na PC sistemima su više zastupljene tehnike, gde je korisniku ostavljena uloga algoritma i može na osnovu određenih parametara da konfiguriše željeni rad sistema.

Na primeru Linuks operativnog sistema, upravljanje potrošnjom je moguće pomoću sledećih okruženja

- `system suspend/resume` – suspendovanje rada sistema (S stanja kod ACPI)
- `runtime pm` – isključivanje neaktivnih komponenti u toku rada
- `clock` – upravljanje dostupnim taktnim signalima
- `cpufreq` – primena DVFS na procesorski sistem (P stanja kod ACPI)
- `cpuidle` – odabir nivoa smanjene potrošnje za procesorski sistem (C stanja kod ACPI)

system suspend/resume Suspendovanjem rada sistema postiže se smanjenje i statičke i dinamičke potrošnje pošto se najveći broj komponenti sistema isključuje tako što se isključi takt i napon. Ostaju da rade samo neophodni moduli, poput RAM memorije koja se osvežava da ne bi došlo do gubitka informacija, kao i određenih delova takta, RTC i izvori prekida koji mogu da probude sistem. Naravno ovakva ušteda energije dolazi po cenu vremena koje je potrebno da sistem pređe iz neaktivnog u aktivno stanje.

runtime pm Isključivanje neaktivnih komponenti u toku rada je zasnovano na klasičnoj tehnici čekanja. Ukoliko se komponenta ne koristi određeno vreme, onda se ta komponenta isključuje.

Tehnike **runtime pm** i **system suspend/resume** se koriste samo u okviru globalnog algoritma za optimizaciju potrošnje koji zavisi od toga da li sistem radi sa baterijskog napajanja ili je priključen na struju, kao i podešavanja koje je zadao korisnik, i u skladu sa time se odlučuje da li se tehnike koriste ili ne.

clock Upravljanje taktnim signalima se zasniva na brojanju korisnika svakog taktnog signala. Ukoliko broj korisnika postane 0, onda je moguće isključiti taktni signal radi uštede energije.

Ovo je, ujedno, i jedina tehnika koja uopšte ne zavisi od algoritma, već se samo na osnovu stanja komponenti koje koriste određeni taktni signal (pripadaju određenom taktnom domenu) vrši uključivanje/isključivanje taktnog signala.

cpufreq Primer klasičnog algoritma za optimizaciju potrošnje implementiran je u okviru **cpufreq**. **cpufreq** služi za dinamičko skaliranje učestanosti i potrošnje procesorskog sistema. Parovi (učestanost, napon) se nazivaju radne tačke (eng. *Operating Performance Point* – OPP) i definisani su za svaku platformu. Algoritam je implementiran u okviru upravljača (eng. *governor*) koji u zavisnosti od željenih performansi i trenutnog stanja sistema podešava trenutni OPP. Dostupni su različiti upravljači sa različitim karakteristikama:

- **powersave** – upravljač koji uvek koristi OPP najniže potrošnje
- **performance** – upravljač koji uvek koristi OPP najviših performansi
- **conservative** – upravljač koji prilikom detektovanja povećanja utilizacije povećava OPP za po jedan korak, i smanjuje za po jedan korak po smanjenju utilizacije
- **ondemand** – upravljač koji prilikom detektovanja povećanja utilizacije povećava OPP na maksimalnu, a potom smanjuje korak po korak
- **userspace** – jedini upravljač u okviru kojeg nije implementiran algoritam, već je omogućen interfejs putem kojeg proizvoljni algoritam definisan u korisničkom prostoru može da upravlja odabirom OPP

cpuidle Odabir nivoa smanjene potrošnje za procesorski sistem služi da se u toku rada zaustavi rad procesora ukoliko nema potrebe za radom. Na taj način se postiže ušteda statičke potrošnje ali samo procesorskog sistema, ostatak sistema nastavlja da radi.

Kao i kod **cpufreq** postoje upravljači u okviru kojih je implementiran algoritam:

- **ladder** – upravljač koji po pojavi neaktivnosti prevodi procesor u najmanje agresivno stanje smanjene potrošnje (stanje C1 prema ACPI). Zatim, kako se povećava vreme neaktivnosti, tako se procesor prevodi u dublja stanja smanjene potrošnje. Nedostatak ovog upravljača je što dugo vremena može biti potrebno da se dostigne najdublje stanje smanjene potrošnje, koje omogućava i najveću uštedu energije.
- **menu** – upravljač koji na osnovu prethodnih intervala neaktivnosti predviđa koliko će trajati sledeći interval neaktivnosti. Na osnovu te informacije i informacija o karakteristikama dostupnih stanja smanjene potrošnje procesora donosi se odluka u koje stanje smanjene potrošnje će se prebaciti procesor.

Ukoliko se posmatraju bežične senzorske mreže i algoritmi za raspoređivanje energije koji su prikazani u glavi 2, mogu da se primete neke stvari u kontekstu modelovanja algoritma za optimizaciju potrošnje. Prikazani algoritmi za raspoređivanje energije zadati su u vidu optimizacionog problema ili u vidu skupa pravila. U oba slučaja kao ulazni podaci koristi se stanje napunjenosti skladišta energije, kao i merenja energije koja se prikuplja. Kod algoritama koji koriste i podatak o energiji koja će biti dostupna u budućnosti, u okviru modelovanja procesa implementirane su tehnike za predviđanje dostupne energije. Tehnike na osnovu merenih podataka u prethodnim intervalima, ili na osnovu podataka vremenske prognoze, ili oba, daju predviđanje energije koje se koristi u okviru modula za odlučivanje. Posebno kod modula za donošenje odluka koji su implementirani u vidu skupa pravila, stanje napunjenosti skladišta je modelovano na određeni način.

Glava 4

Degradacija u sistemima za rad u realnom vremenu

Kao što je navedeno u glavi 1, za adekvatnu optimizaciju performansi neophodna je informacija o trenutnim performansama ili trenutnoj degradaciji. Međutim, objektivna metrika degradacije performansi ne postoji.

Da bi bilo moguće postići kompromis između potrošnje i performansi, neophodno je definisanje metrike degradacije performansi. Jedan od ciljeva ove disertacije bio je i da se uvede objektivna metrika degradacije performansi, koja bi omogućila proširenje oblasti primene tehnika za smanjenje potrošnje i postizanje veće uštede energije.

U okviru disertacije i istraživanja posmatra se degradacija u kontekstu sistema za rad u realnom vremenu. U tipičnom sistemu za rad u realnom vremenu postoji aplikacija koja se izvršava, a koja se sastoji od pojedinačnih taskova. Prostor za uvođenje metrike degradacije performansi se vidi u tome što posledica probijanja vremenskog ograničenja nisu iste za sve taskove.

Taskovi interaguju sa okolinom koristeći određene periferije. Ukoliko se taskovima dodeli potrošnja hardvera kojim upravljaju, onda se praćenjem izvršavanja taskova može dobiti informacija o potrošnji i degradaciji performansi celog sistema.

Pored nove metrike degradacije performansi, u ovoj glavi biće prikazana i nova tehnika za smanjenje potrošnje koja je zasnovana na uvedenoj metrici. Tehnika omogućava znatno veći domen primene u odnosu na postojeće tehnike za smanjenje potrošnje i omogućava fin odabir kompromisa između potrošnje i performansi.

4.1 Nova metrika degradacije performansi

Neka programski posao predstavlja skup n periodičnih taskova $\Gamma = \{\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n\}$. Indeksiranje taskova je određeno prema dodeljenim prioritetima taskova, tako da je τ_1 task najvećeg prioriteta a τ_n task najnižeg prioriteta. Svako pojavljivanje taska predstavlja posebnu instancu i uzeto je da se k -ta instanca taska τ_1 obeležava kao $\tau_{1,k}$.

Na osnovu klasifikacije taskova [104] prema vremenskoj kritičnosti posla, taskovi mogu da se podele na:

- vremenski kritične taskove (*hard real-time*) – taskovi koji ne smeju da probiju vremenska ograničenja

- uslovno vremenski kritične taskove (*firm real-time*) – taskovi koji ne smeju više od određenog broja puta uzastopno da probiju vremenska ograničenja
- vremenski nekritične taskove (*soft real-time*) – taskovi kod kojih se toleriše, ali ne sme da se zanemari, probijanje vremenskih ograničenja

Primeri taskova ovih klasa dati su u tabeli 4.1.

Tabela 4.1: Primeri taskova različitih vremenskih kritičnosti

<i>hard</i>	<i>firm</i>	<i>soft</i>
održavanje pejsmejlera	uzimanje odbiraka signala	osvežavanje displeja
upravljanje motorom automobila	predikcija vrednosti	skaniranje tastature
upravljanje procesom u industriji	otvaranje elektronske brave	prenos video podataka

Od interesa za metodu su sledeće karakteristike taskova:

- period pojavljivanja taska, T_i
- vreme izvršavanja taska, e_i
- doprinos taska opterećenju procesora, odnosno utilizacija taska, U_i
- klasa taska (*hard*, *firm* ili *soft*)
- prioritet taska, pr_i
- vremensko ograničenje taska, D_i

Merenjem karakteristika izvršavanja tokom vremenskog intervala $T_{per} = \text{NZS}(T_1, T_2, T_3, \dots, T_n)$ moguće je odrediti vreme izvršavanja svakog taska e_i i doprinos svakog taska opterećenju procesora U_i . Može se definisati i ukupno opterećenje procesora kao

$$U_{max} = \sum_i U_i. \quad (4.1)$$

Klasu taska, prioritet taska pr_i , kao i vremensko ograničenje D_i zadaje korisnik prilikom kreiranja taska.

Na osnovu ulaznih podataka metoda kao izlaz daje vrednost degradacije pojedinačnih taskova, DEG_i , kao i degradaciju cele aplikacije, $DEG = f(DEG_i)$. Vrednost degradacije kreće se u intervalu $[0, 1]$, gde vrednost 0 znači da nema degradacije, dok vrednost 1 znači da su performanse maksimalno degradirane. Jedan od mogućih načina za predstavljanje degradacije aplikacije je

$$DEG = \sum_i k_i DEG_i, \quad (4.2)$$

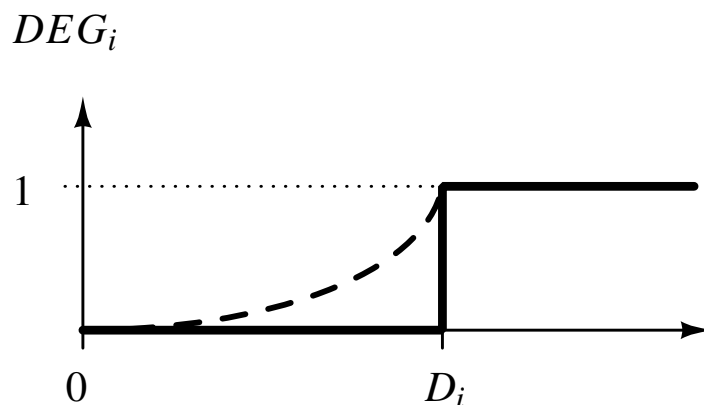
gde je k_i koeficijent kojim se bliže određuje uticaj degradacije performansi taska i na degradaciju performansi aplikacije. Odabirom vrednosti koeficijenta k_i moguće je smanjiti ili povećati uticaj degradacije performansi nekih taskova na degradaciju performansi aplikacije, pa čak i zanemariti uticaj ($k_i = 0$).

Za svaku klasu taska postoji model degradacije performansi dat u vidu funkcije. Funkcija je pridružena kontrolnom bloku taska (TCB) u formi ekstenzije i može biti jednostavna, ali i predstavljati složeni izraz u zavisnosti od potreba. U nastavku su prikazani modeli degradacije performansi za svaku klasu taskova pojedinačno.

Za svaku klasu data su po dva modela. Prvi model, dat punom linijom, ne uzima u obzir tačan trenutak završetka taska već samo da li je, ili nije, probijeno vremensko ograničenje. To je ujedno i jednostavniji model, pošto je jedina informacija koja je potrebna da li je task probio vremensko ograničenje. Drugi model, dat isprekidanom linijom, uzima u obzir i tačan trenutak završetka obrade taska i taj model je praktičniji ako se pored degradacije performansi želi odrediti i degradacija kvaliteta usluge (*Quality of Service* - QoS).

4.1.1 Vremenski kritični taskovi (*hard real-time*)

Prema definiciji, kod vremenski kritičnih taskova probijanje vremenskog ograničenja dovodi do prestanka rada sistema. Funkcije koje su odabrane za modelovanje degradacije performansi vremenski kritičnih taskova prikazane su na slici 4.1.



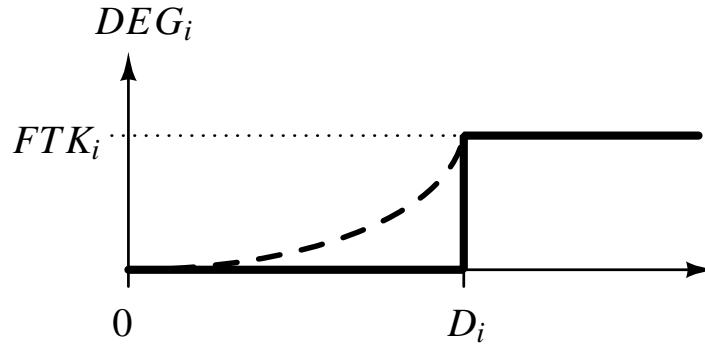
Slika 4.1: Model degradacije performansi kod vremenski kritičnih taskova

Degradacija vremenski kritičnih taskova u određenom intervalu je 1 ako je bilo koja instanca probila vremensko ograničenje. Takođe, ukoliko dođe do probijanja vremenskog ograničenja, dolazi do otkaza u radu sistema.

4.1.2 Uslovno vremenski kritični taskovi (*firm real-time*)

Kod uslovno vremenski kritičnih taskova uzastopno probijanje vremenskog ograničenja dovodi do prestanka rada sistema. Funkcija koja je odabrana za modelovanje degradacije performansi uslovno vremenski kritičnih taskova prikazana je na slici 4.2.

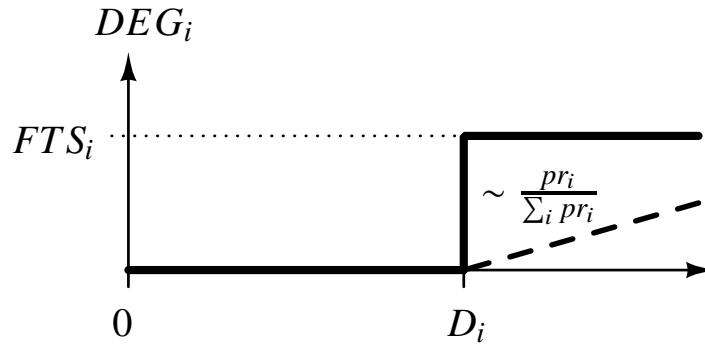
Na slici 4.2, FTK_i predstavlja konstantu degradacije za uslovno vremenski kritičan task i važi $FTK_i < 1$. Svaki put kada se probije vremensko ograničenje taska degradacija taska se inkrementira za FTK_i . Nakon $1/FTK_i$ probijanja vremenskog ograničenja degradacija taska postaje jednaka 1. Tada dolazi i do otkaza aplikacije.



Slika 4.2: Model degradacije performansi kod uslovno vremenski kritičnih taskova

4.1.3 Vremenski nekritični taskovi (*soft real-time*)

Kod vremenski nekritičnih taskova probijanje vremenskog ograničenja ne dovodi do otkaza, ali može doći do određene degradacije performansi. Na slici 4.3 prikazane su funkcije kojima može da se modeluje degradacija performansi vremenski nekritičnih taskova.



Slika 4.3: Model degradacije performansi kod vremenski nekritičnih taskova

Pošto vremenski nekritični taskovi ne mogu dovesti do otkaza, onda je degradacija usled probijanja vremenskog ograničenja postavljena slično uslovno vremenski kritičnim taskovima na FTS_i , gde nakon $1/FTS_i$ probijanja vremenskog ograničenja dolazi do degradacije 1. Sa druge strane degradacija kvaliteta usluga počinje da se povećava nakon probijanja vremenskog ograničenja i srazmerna je relativnom prioritetu datog taska.

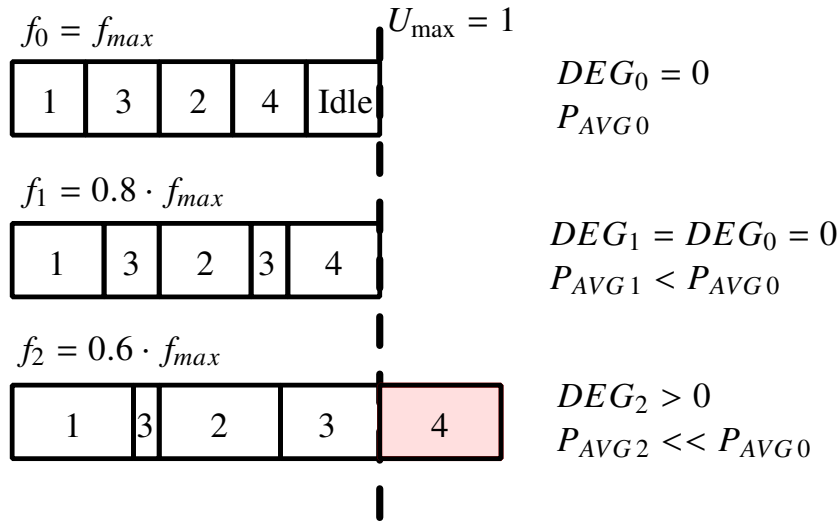
Može se primetiti da otkaz sistema nije usko vezan za degradaciju performansi aplikacije, pošto otkaz pojedinačnog uslovno vremenski kritičnog ili vremenski kritičnog taska može da se desi za proizvoljan ukupni nivo degradacije performansi. Na primer, istovremena pojava događaja koju procesira grupa taskova aplikacije može da dovede do preopterećenog režima rada, što može da dovede do otkaza uslovno vremenski kritičnih ili vremenski kritičnih taskova.

4.2 Degradacija performansi kod prioritarnog raspoređivanja

Svrha uvedene metrike performansi jeste da omogući objektivno kvantifikovanje degradacije performansi pojedinačnih taskova i cele aplikacije, kao i otkaz sistema.

Za prioritarno raspoređivanje, vrednosti težinskih faktora se određuju na osnovu prioriteta taska. Degradacija performansi aplikacije DEG definisana je kao funkcija parametara degradacije performansi pojedinačnih taskova DEG_i , i odgovarajućih težinskih faktora w_i u formi

$$DEG = DEG(w_0, DEG_0, \dots, w_n, DEG_n) . \quad (4.3)$$



Slika 4.4: eDVFS.

Degradacija performansi pojedinačnih taskova dobija se pomoću uvedenog modela degradacije povezanog sa tipom taska. Težinski faktor za svaki task određuje se na osnovu parametara raspoređivanja u modelu taska.

4.2.1 Primer – Proširenje opsega DVFS (eDVFS)

Kao što je ranije rečeno, DVFS se primenjuje samo u opsegu gde se svi taskovi izvršavaju u predviđenom vremenu. Ako se DVFS posmatra kroz predstavljenu metriku degradacije performansi, opseg primene DVFS je samo u domenu gde je degradacija jednaka nuli. To dosta ograničava opseg primene.

Ukoliko se dozvoli da degradacija bude veća od nule, onda se polje parametara rada proširuje na polje eDVFS (eng. *extended DVFS*). Pošto je uvedena metrika objektivna, onda je moguće kroz algoritam postići kompromis između degradacije performansi i potrošnje.

Na slici 4.4 prikazano je izvršavanje taskova kada se primenjuje eDVFS. Jednostavnosti radi usvojen je set taskova $\{\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4\}$ koji se izvršava pri različitim učestanostima procesora ($f_0 = f_{max}$, $f_1 = 0.8 \cdot f_{max}$ i $f_2 = 0.6 \cdot f_{max}$), sa uniformnom utilizacijom taskova $U_i = 0.2$ pri učestanosti $f_0 = f_{max}$ i prioritetom $Pr_i = i$.

Smanjenje učestanosti sa f_0 na f_1 dovodi do granične vrednosti utilizacije aplikacije, U_{bound} . Vrednost U_{bound} je granična utilizacija aplikacije koja garantuje da svi taskovi aplikacije ispunjavaju svoje vremensko ograničenje [105] i zavisi od osobina korišćenog algoritma raspoređivanja. Učestanost f_1 je ujedno i najniža učestanost koja može da se primeni za DVFS jer ne dovodi do degradacije, pod pretpostavkom da je vremensko ograničenje svih taskova veće od predviđenog vremena izvršavanja.

Promenom učestanosti procesora postiže se dodatno smanjenje potrošnje, ali do degradacije performansi sistema jer task τ_4 ne stiže da se izvršava.

Nedostatak eDVFS je što se kompromis između potrošnje i degradacije performansi postiže isključivo skaliranjem učestanosti. Međutim, preteranim spuštanjem učestanosti javlja se rizik da dođe do probijanja vremenskog ograničenja kod uslovno vremenski kritičnih taskova ili vremenski kritičnih taskova.

4.3 Nova tehnika za smanjenje potrošnje – tehnika za kontrolu utilizacije

Metrika za degradaciju performansi opisuje okvir za procenu performansi aplikacije, dok tehnika za kontrolu utilizacije omogućava kontrolu performansi aplikacije. Kontrola performansi aplikacije omogućena je uvođenjem periodičnog taska za kontrolu utilizacije τ_{UC} koji ima prioritet Pr_{UC} , period pojavljivanja $T_{UC} = T_{per}$ i vreme izvršavanja e_{UC} . Treba naznačiti da su parametri taska specificirani sa prioritetom Pr_{UC} i ciljanom utilizacijom U_{UC} . Vreme izvršavanja taska određuje se pomoću $e_{UC} = U_{UC}T_{per}$, pošto je period izvršavanja taska jednak periodu posmatranja T_{per} . Cilj tehnike za kontrolu utilizacije jeste da pruži makar U_{UC} nivo utilizacije uvedenog taska τ_{UC} tako što će dinamički da menja prioritet taska između dva nivoa prioriteta, definisanog Pr_{UC} i minimalnog podržanog Pr_{min} . Utilizacija taska τ_{UC} u periodu posmatranja T_{per} se evaluira na granici intervala sistemskog časovnika i ukoliko je trenutna utilizacija manja od U_{UC} task će se izvršavati sa prioritetom Pr_{UC} , inače se izvršava sa prioritetom Pr_{min} .

Za datu radnu učestanost sistema f , u zavisnosti od usvojenih parametara taska (Pr_{UC}, U_{UC}) nekoliko slučajeva izvršavanja seta taskova Γ može da se identifikuje:

slučaj 1 : $U_{UC} + U_{max}(f) < U_{bound}$,

slučaj 2 : $U_{bound} < U_{UC} + U_{max}(f) < 1$,

slučaj 3 : $U_{UC} + U_{max}(f) > 1$.

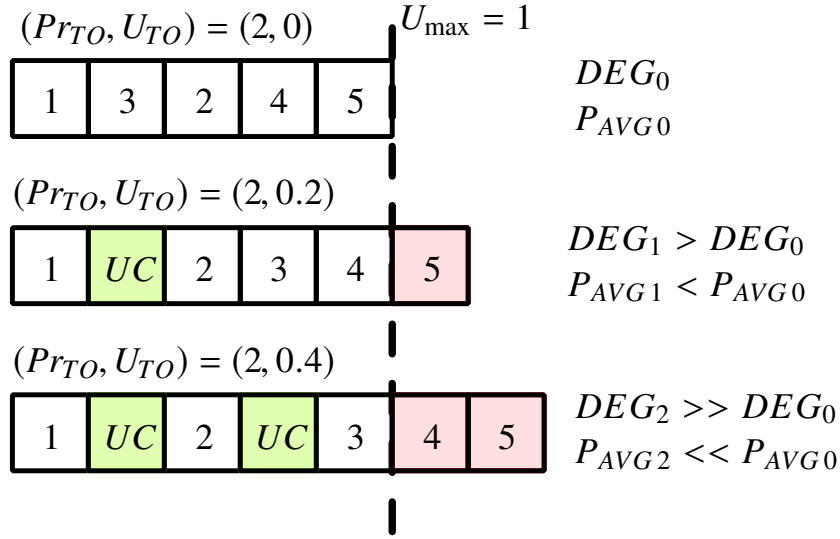
U definisanom slučaju 1 ne postoji uticaj na performanse aplikacije pošto svi taskovi ispunjavaju svoje vremensko ograničenje, dok se potrošnja sistema povećava ili smanjuje u zavisnosti od odabranog faktora skaliranja učestanosti. Ovaj scenario operacije sistema koriste tehnike zasnovane na dinamičkom skaliranju učestanosti za optimizaciju potrošnje.

U slučaju 2, potrošnja sistema ne zavisi od parametara (Pr_{UC}, U_{UC}) za datu vrednosti skalirane učestanosti. Međutim, neki taskovi sa prioritetom $Pr_j < Pr_{UC}$ mogu da propuste svoje vremensko ograničenje, što bi dovelo do degradacija performansi aplikacije.

Ukoliko se utilizacija taska U_{UC} odabere tako da dovede do preopterećenog režima rada (slučaj 3) za datu učestanost procesora φ , očekivano je da taskovi sa prioritetom $Pr_j < Pr_{UC}$ imaju redukovane performanse zato što će neke instance taskova da propuste vremensko ograničenje. U ovom slučaju izvršavanja ubacivanje idle obrade pomoću taska τ_{UC} dovodi do smanjenja potrošnje sistema uz odgovarajuće povećanje degradacije performansi aplikacije. Selektivnost prikazane tehnike je postignuta pomoću taska τ_{UC} odnosno odabirom vrednosti prioriteta Pr_{UC} i ciljane utilizacije U_{UC} pošto izvršavanje ovog taska utiče samo na taskove aplikacije koji imaju prioritet $Pr_j < Pr_{UC}$.

Slika 4.5 ilustruje rezultat izvršavanja tehnike za kontrolu utilizacije za nekoliko parametara (Pr_{UC}, U_{UC}) taska τ_{UC} , što dovodi do različitih scenarija izvršavanja u preopterećenom režimu rada. Takođe su dati i posledice na degradaciju performansi aplikacije i prosečnu potrošnju. Jednostavnosti radi usvojen je set taskova $\{\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5\}$ koji se izvršava pri konstantnoj učestanosti procesora, sa uniformnom utilizacijom taskova $U_i = 0.2$, prioritetom $Pr_i = i$, i graničnom utilizacijom $U_{bound} \rightarrow 1$.

Pod pretpostavljenim radom sistema u preopterećenom režimu rada, uvođenje taska τ_{UC} (2, 0.2) utiče na izvršavanje taska τ_5 , što dovodi do odgovarajuće degradacije performansi i smanjenja potrošnje s obzirom da važi $P_{AVG}(\tau_{UC}) < P_{AVG}(\tau_5)$. Dodatno povećanje utilizacije taska bez promene prioriteta taska, τ_{UC} (2, 0.4), dalje degradira performanse drugih taskova sa prioritetom $Pr_i > 2$. Kao posledica toga na račun degradacije performansi aplikacije postiže se smanjenje celokupne potrošnje sistema.

Slika 4.5: Scenariji izvršavanja aplikacije za različite parametre taska τ_{UC} .

U definisanom kontekstu balansiranja potrošnje i performansi, primena uvedene tehnike za kontrolu utilizacije je ciljana za slučaj 3 sa preopterećenim režimom rada.

4.4 Rezultati i diskusija

Da bi se evaluirale osobine predložene tehnike, nekoliko scenarija izvršavanja seta taskova $\Gamma = \{\tau_1, \dots, \tau_9\}$ je analizirano u simuliranom okruženju. Parametri pseudo-periodičnih taskova su dati u tabeli 4.2.

Tabela 4.2: Podešene vrednosti za raspoređivanje seta taskova Γ

Task	C_i	Pr_i	$Tper_i$	E_i
τ_1	hard	10	240	5
τ_2	hard	20	200	4
τ_3	hard	30	160	4
τ_4	firm	40	120	3
τ_5	firm	50	100	3
τ_6	firm	60	80	2
τ_7	soft	70	60	2
τ_8	soft	80	40	2
τ_9	soft	90	20	1

Za kvantifikovanje potrošnje sistema izvršavanja taska τ_i usvojen je sledeći model

$$P_i(\varphi, v) = P_i^{CPU}(\varphi, v) + P_i^{PD}, \quad (4.4)$$

gde su $\varphi = f/f_{max}$ i $v = V/V_{max}$ normalizovane vrednosti radne učestanosti i napona procesora, respektivno, $P_i^{CPU}(\varphi, v)$ je potrošnja procesa koja se skalira sa promenom učestanosti i napona, a P_i^{PD} je potrošnja ostalih komponenti sistema. Usvojena je klasična veza [106] između potrošnje i

parametara OPP u formi

$$P_i^{CPU}(\varphi, v) = P_i^{CPU}(1, 1) \times \varphi \times v^2, \quad (4.5)$$

gde je $P_i^{CPU}(1, 1)$ potrošnja procesora kada radi sa vrednostima OPP od (f_{max}, V_{max}) . Veza između napona i učestanosti je usvojena kao

$$v = v_{min} + k\varphi, \quad (4.6)$$

gde je v_{min} minimalni radni napon. Koristeći ovu relaciju, izrazi (4.4) i (4.5) mogu da se zapišu kao

$$P_i(\varphi) = P_i^{CPU}(\varphi) + P_i^{PD}, \quad (4.7)$$

$$P_i^{CPU}(\varphi) = P_i^{CPU}(1) \times \varphi \times (v_{min} + k\varphi)^2. \quad (4.8)$$

Vrednosti potrošnje za sve taskove u Γ usvojen je kao $P_i^{CPU}(1) = 100$ i $P_i^{PD} = 10$. Parametri koji se tiču potrošnje taska za kontrolu utilizacije su odabrani kao $P_{UC}^{CPU}(1) = 0$ i $P_{UC}^{PD} = 10$, pošto ovaj task vrši procesiranje u neaktivnom režimu (eng. *idle processing*). Parametri iz izraza (4.6) su odabrani kao $v_{min} = 0.9$ i $k = 0.1$.

Težinski faktori za računanje doprinosa taska ukupnoj degradaciji aplikacije su računati na osnovu prioriteta taska kao

$$w_i = \frac{Pr_{min} - Pr_i}{\sum_i (Pr_{min} - Pr_i)}, \quad (4.9)$$

gde je $Pr_{min} = 95$. Faktor degradacije performansi cele aplikacije DEG iz izraza (4.3) definisan je kao težinska suma faktora degradacije pojedinačnih taskova

$$DEG = \sum_{i=1}^9 w_i DEG_i. \quad (4.10)$$

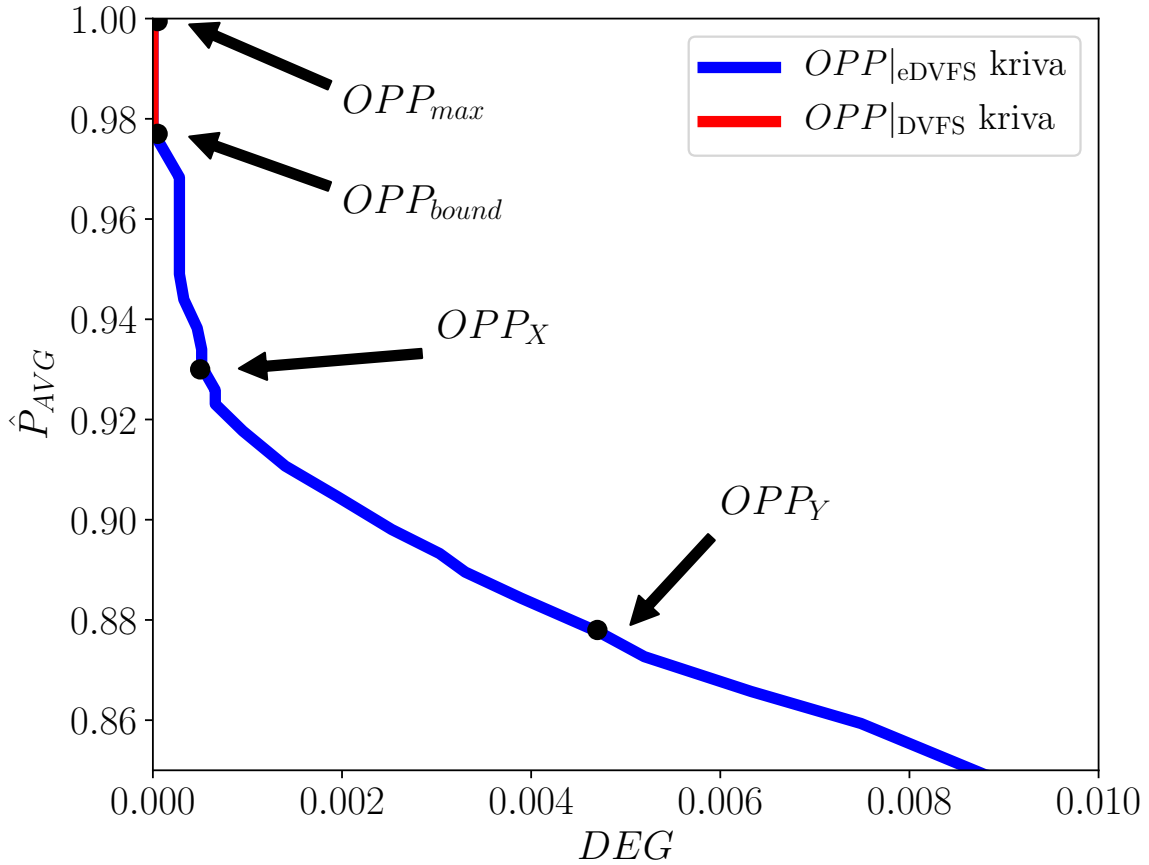
4.4.1 Primena modela degradacije na eDVFS

Za dati set taskova iz tabele 4.2 na slici 4.6 prikazane su krive radnih tački za DVFS ($OPP|_{DVFS}$) i eDVFS ($OPP|_{eDVFS}$) za opseg radnih učestanosti od f_{max} do $f_{max}/3$. Kao što je ranije rečeno, DVFS može da se primeni samo u domenu gde ne dolazi do degradacije. Uvođenjem modela degradacije proširuje se mogućnost primene na eDVFS radne tačke.

Na slici 4.6 izdvojene su četiri karakteristične radne tačke sistema obeležene sa OPP_{max} , OPP_{bound} , OPP_X i OPP_Y . Odgovarajući parametri metrika potrošnje i performansi su dati u tabeli 4.3. OPP_{max} je inicijalna radna tačka sa maksimalnom radnom učestanosti procesora, $\varphi = 1$. OPP_{bound} je radna tačka koja se određuje na osnovu vrednosti U_{bound} za radnu učestanost procesora $\varphi < 1$, gde je moguće postići maksimalnu uštedu energije bez izazivanja degradacija performansi aplikacije. OPP_X i OPP_Y su izabrane kao reprezentativne radne tačke sistema tokom preopterećenog rada sistema izabranog u 1D operativnim parametrima kao $f_{max}/2$ i $f_{max}/3$.

Tabela 4.3: Osobine rada sistema za karakteristične OPP tačke sa slike 4.6

Tačka	φ	$\hat{P}_{AVG}$	DEG	$\Delta\hat{P}_{AVG} [\%]$
OPP_{max}	1.00	1.000	0.000	0.0
OPP_{bound}	0.77	0.967	0.000	-3.1
OPP_X	0.50	0.931	<0.001	-6.9
OPP_Y	0.33	0.877	0.005	-12.3



Slika 4.6: Operativne tačke sistema u polju potrošnje-performansi za $OPP(\varphi)$.

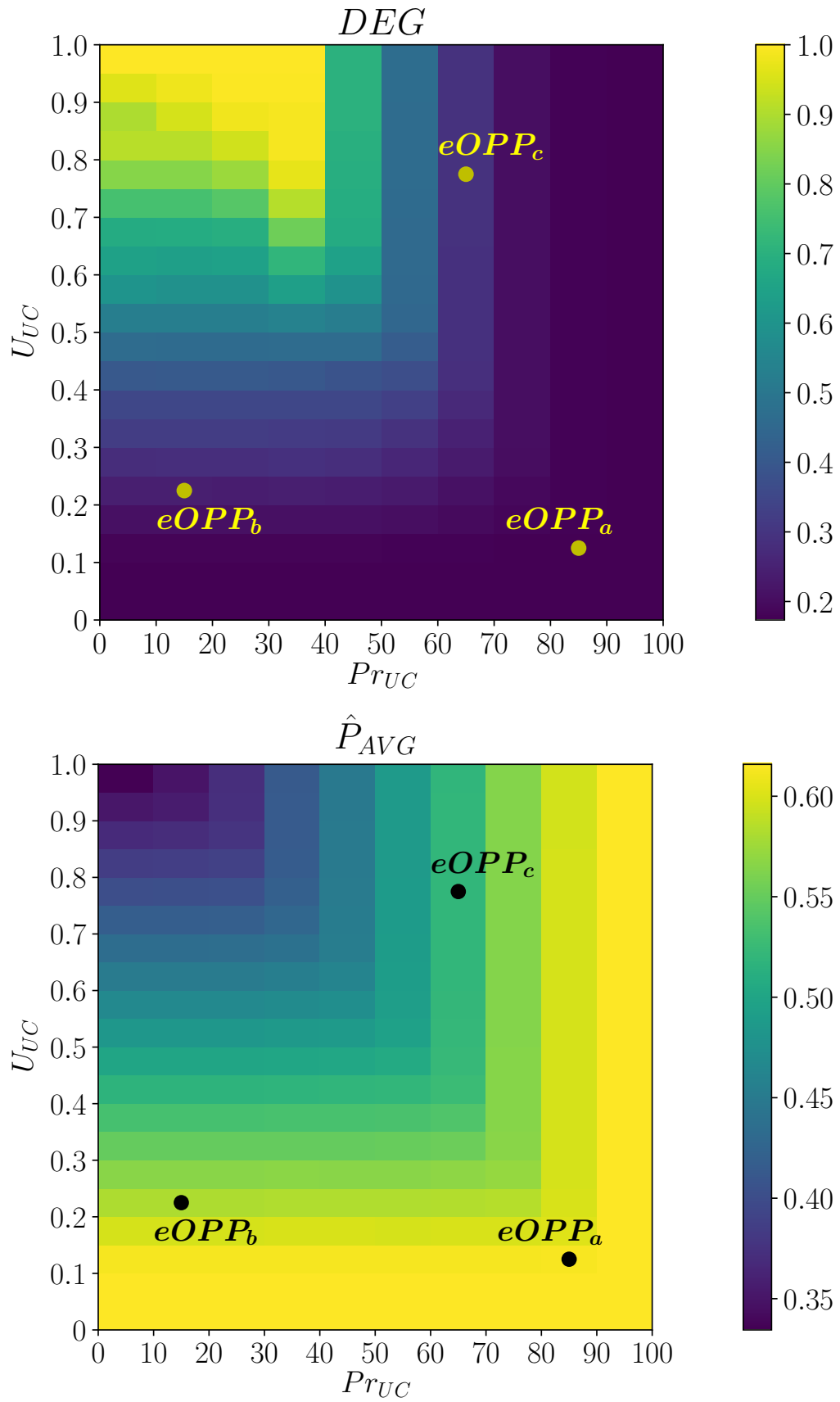
U kontekstu standardnih algoritama koji DVFS tehniku koriste tako da se skaliranje vrši između izvršavanja taskova, rad sistema u opsegu između OPP_{max} i OPP_{bound} ilustruje potencijal standardne DVFS tehnike. Uvedena metrika performansi sistema omogućava proširenje opsega rada izvan OPP_{bound} i ka OPP_X i OPP_Y , označeno kao eDVFS na slici 4.6. Radne tačke sistema u 1D polju parametara za eDVFS pružaju značajno veću uštedu energije u poređenju sa standardnim DVFS, po cenu degradacije performansi.

4.4.2 Evaluacija tehnike za kontrolu utilizacije

4.4.2.1 Fiksna radna učestanost

Sledeća analiza ilustruje potencijal za postizanje kompromisa prikazane tehnike za kontrolu utilizacije koja je primenljiva u scenarijima gde tehnika za skaliranje napona i učestanosti nije dostupna ili gde postoje značajni nedostaci po pitanju česte primene te tehnike. Pošto je u tom scenariju odnos skaliranja učestanosti φ konstantan, kontrola kompromisa se postiže isključivo putem kontrole parametara (Pr_{UC}, U_{UC}). Na slici 4.7 prikazan je uticaj odabira različitih podešavanja parametara (Pr_{UC}, U_{UC}) na degradaciju performansi i normalizovanu prosečnu potrošnju za preopterećen režim rada sistema koji je odabran podešavanjem skalirane učestanosti na $f_{max}/8$.

Kao što je prikazano na slici 4.7, upravljanjem parametrima (Pr_{UC}, U_{UC}) postiže se variranje osobina izvršavanja aplikacije u domenu potrošnje i performansi do 25% i 80%, respektivno. Da bi se demonstrirao potencijal za kompromis tehnike za kontrolu utilizacije za fino podešavanje radne tačke aplikacije u polju potrošnje-performansi, nekoliko radnih tački je odabrano i njihove metrike potrošnje i performansi su prikazane u tabeli 4.4.



Slika 4.7: Metrike performansi aplikacije (gore) i potrošnje (dole) u polju sistemskih parametara (Pr_{UC}, U_{UC}).

Tabela 4.4: Osobine rada sistema za odabrane radne tačke $eOPP$ sa slike 4.7

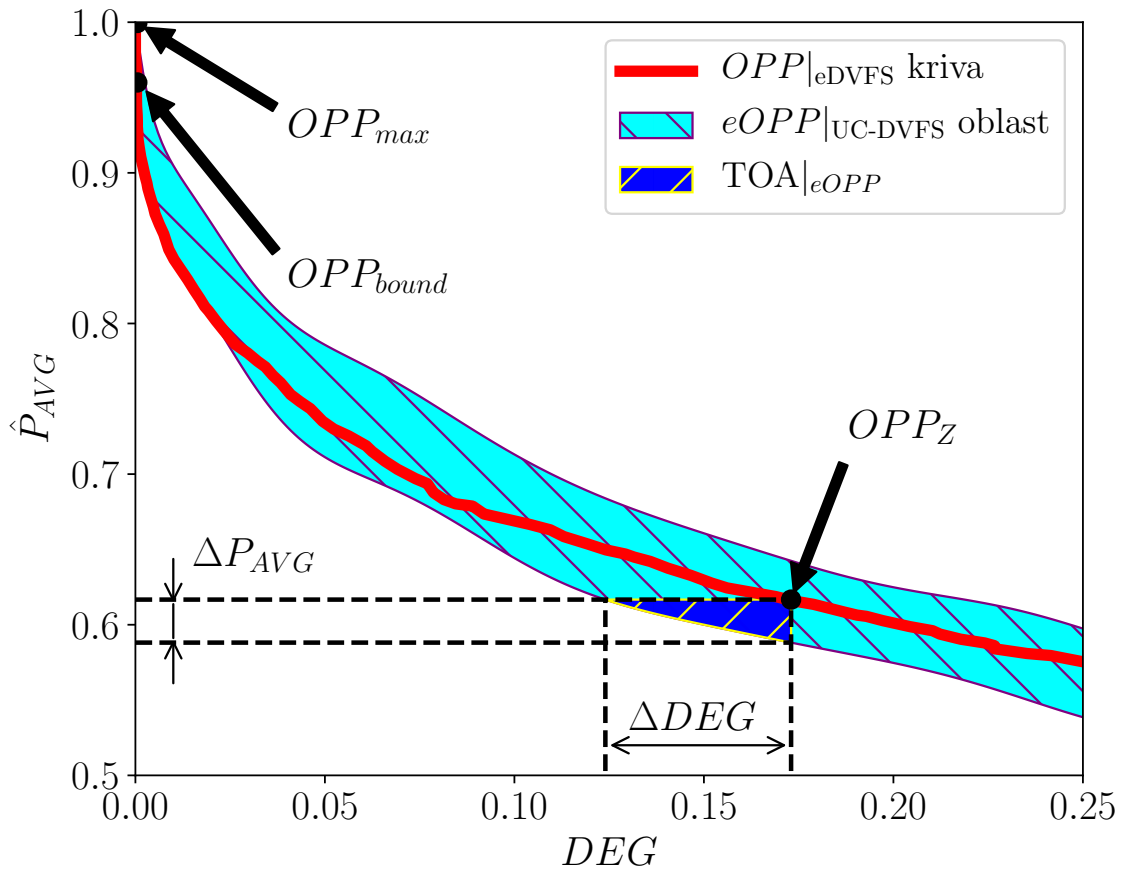
Tačka	$\hat{P}_{AVG}$	DEG
$eOPP_a$	0.613	0.174
$eOPP_b$	0.582	0.242
$eOPP_c$	0.520	0.290

Na osnovu tabele 4.4 može da se primeti da se variranjem parametara (Pr_{UC}, U_{UC}) u suprotnim smerovima menjaju prosečna potrošnja sistema i degradacija performansi aplikacije, što predstavlja osnovu za postizanje kompromis.

U poređenju sa tradicionalnom tehnikom za skaliranje napona i učestanosti, koja bira radnu tačku sistema $OPP(\varphi)$ u jednodimenzionalnom prostoru parametara rada sistema, uvođenje dodatnih parametara (Pr_{UC}, U_{UC}) proširuje prostor sistemskih operativnih parametara na 3D, što je naznačeno kao $eOPP(\varphi, Pr_{UC}, U_{UC})$.

4.4.2.2 Dostupno skaliranje učestanosti i napona

Rezultujuća efektivnost predložene tehnike u ukupnom 3D prostoru sistemskih radnih tačaka je dodatno analizirana. Osobine izvršavanja aplikacije u polju potrošnje-performansi za skaliranje učestanosti u opsegu od f_{max} do $f_{max}/10$, prioriteta Pr_{UC} u opsegu od Pr_{min} do $Pr_{max} = 5$ i utilizacije U_{UC} u opsegu od 0 do 1 prikazani su na slici 4.8.

Slika 4.8: Operativne tačke sistema u polju potrošnje-performansi za $OPP(\varphi)$ i $eOPP(\varphi, Pr_{UC}, U_{UC})$.

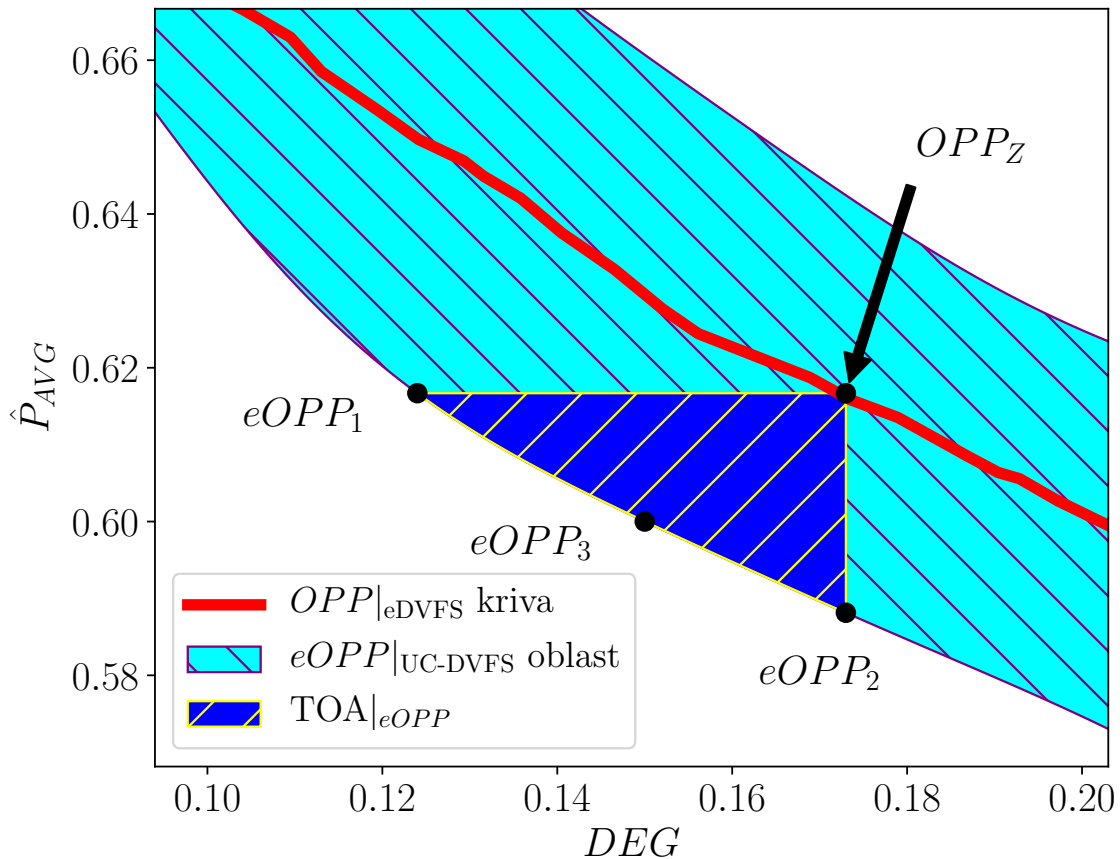
Na slici 4.8 su prikazane iste tačke OPP_{max} i OPP_{bound} koje su detaljnije opisane u potpoglavlju 4.4.1. Tačka OPP_Z je izabrana kao reprezentativna radna tačka sistema tokom preopterećenog rada sistema izabranog u 1D operativnim parametrima kao $f_{max}/8$. Odgovarajući parametri metrika potrošnje i performansi su dati u tabeli 4.5.

Tabela 4.5: Osobine rada sistema za karakteristične OPP tačke sa slike 4.8

Tačka	φ	$\hat{P}_{AVG}$	DEG	$\Delta\hat{P}_{AVG}$ [%]
OPP_{max}	1.00	1.000	0.000	0.0
OPP_{bound}	0.77	0.967	0.000	-3.1
OPP_Z	0.12	0.616	0.173	-38.4

Proširenje radne tačke iz 1D u 3D prostor, podržano tehnikom za kontrolu utilizacije, uvodi mogućnost za znatno efikasnije izvršavanje aplikacije u odnosu na mogućnosti koje nudi eDVFS. Kontrola 3D sistemskih parametara omogućava fini kompromis između potrošnje i performansi. Tehnika uvodi oblasti kompromisa (eng. *Trade-Off Area* - TOA) za datu konfiguraciju parametara u 1D prostoru (OPP) kao što je ilustrovano na slici 4.8. Ova oblast definiše sekciju $eOPP$ koja omogućava efikasniji rad sistema u poređenju sa radnim tačkama koje nudi eDVFS.

Na slici 4.9 oblast TOA je prikazana u više detalja. Tri istaknute tačke $eOPP_i, i = 1, 2, 3$ su odabrane i upoređene sa radnom tačkom OPP_Z i rezultati poređenja prikazani su u tabeli 4.6. Kao što je ilustrovano u tabeli 4.6, proširenje sistemskih parametara u 3D prostor donosi mogućnosti za efikasnije izvršavanje aplikacije. Za odabrane OPP_Z i $eOPP$ može da se izaberu tačke sa manjom degradacijom performansi ($eOPP_1$) ili nižom potrošnjom ($eOPP_2$), ili oba ($eOPP_3$).



Slika 4.9: Ilustracija potencijala TOA za odabranu OPP_Z .

Tabela 4.6: Osobine rada sistema za karakteristične $eOPP$ u oblasti TOA izabranjoj sa OPP_Z

Tačka	φ	Pr_{UC}	U_{UC}	$\hat{P}_{AVG}$	DEG	$\Delta\hat{P}_{AVG}$ [%]	ΔDEG [%]
OPP_Z	0.12	95	0.00	0.616	0.173	0.0	0.0
$eOPP_1$	0.15	65	0.25	0.616	0.124	0.0	-28.3
$eOPP_2$	0.13	75	0.20	0.588	0.173	-4.5	0.0
$eOPP_3$	0.12	75	0.55	0.600	0.150	-2.6	-13.3

Glava 5

Nove tehnike za predviđanje dostupne solarne energije

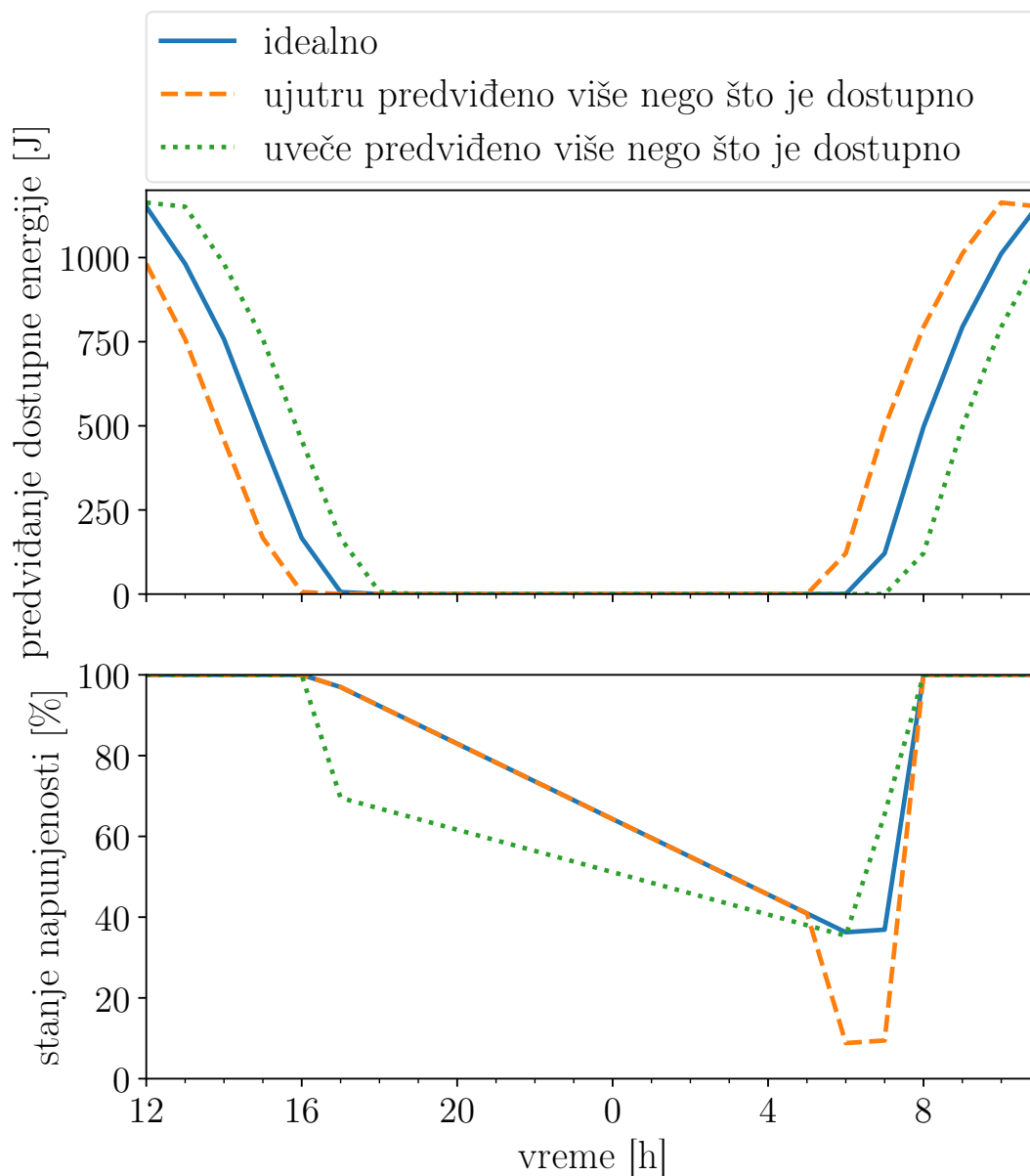
Na osnovu analize iz druge glave, tehnike za predviđanje dostupne energije u budućnosti zasnovane na podacima iz prethodnih intervala daju kvalitetnu predikciju za kratkoročnu vremensku prognozu, dok tehnike zasnovane na vremenskoj prognozi daju dobre rezultate za srednjeročnu i dugoročnu prognozu. Cilj istraživanja u okviru doktorske disertacije je realizovati novu tehniku koja daje dobre rezultate u svim horizontima predviđanja.

Mana analiziranih PPF tehnika je što ne mogu da predvide solarnu energiju prilikom izlaska sunca, pošto tokom noći nema podataka o solarnoj osunčanosti koji bi se koristili. Prednost tehnika koje koriste vremensku prognozu je što je prognoza dostupna za interval od najmanje 24 časa unapred. Međutim, pošto se greške predviđanja povećavaju sa intervalom predviđanja, stvarna greška zavisi od učestanosti sa kojom se dohvata vremenska prognoza. Takođe, oblačnost ne može da se prati tokom noći, pa je greške u predviđanju teško detektovati pre izlaska sunca.

Posledice po skladište energije usled predviđanja više energije nego što će stvarno biti dostupno su najizraženije prilikom izlaska i zalaska sunca, slika 5.1. Greške predviđanja energije koje se dese prilikom zalaska sunca ne moraju da imaju katastrofalne posledice, pošto performanse senzorskog čvora mogu da se prilagode tokom noći da bi se kompenzovala greška. Međutim, greške predviđanja prilikom izlaska sunca mogu da dovedu do prestanka rada sistema, pošto baterija može da se isprazni. Važno je napomenuti da su PPF tehnike manje podložne greškama koje se dese prilikom izlaska sunca, pošto na predviđanje za naredni vremenski interval utiče prethodni vremenski interval. Samim tim postoji kašnjenje od jednog vremenskog intervala između stvarne i predviđene energije. Greške predviđanja za tehnike koje koriste vremensku prognozu zavise dosta od kvaliteta korišćene vremenske prognoze.

U ovoj glavi biće prikazane dve nove tehnike koje su razvijene u fazi istraživanja na ovoj doktorskoj disertaciji. Rezultati jedne tehnike su objavljeni u radu [107], dok je druga u pripremi za slanje. Obe tehnike koriste isti metod za određivanje solarne energije za potpuno vedar dan, dok se razlikuju u metodi koju koriste za određivanje predviđene vrednosti.

Predložene tehnike za predviđanje koriste model osunčanosti za potpuno vedar dan i primenjuju oblačnost i verovatnoću padavina dobijene iz vremenske prognoze. Da bi se minimizovali troškovi usled prenosa podataka mrežnim interfejsom, vremenska prognoza za 24 časa unapred dohvata se jednom dnevno, u podne, kada je očekivano da će najviše energije biti dostupno.



Slika 5.1: Posledice po skladište energije usled predviđanja više energije nego što će stvarno biti dostupno prilikom izlaska i zalaska sunca

5.1 Određivanje solarne energije za potpuno vedar dan

Za računanje dostupne solarne energije potrebna je informacija o globalnoj, direktnoj i difuznoj solarnoj osunčanosti. U prikazanim tehnikama koristi se izvanzemaljski model radijacije [78] za računanje solarne radijacije za potpuno vedar dan za dati dan i sat. U analizi koja sledi smatra se da je solarni panel postavljen tangencijalno u odnosu na Zemljinu površinu. Detaljan račun može da se nađe u [87] ako je panel postavljen pod uglom u odnosu na Zemljinu površinu.

Izvanzemaljska radijacija predstavlja solarnu energiju koja pada na horizontalnu površinu izvan atmosfere. Zavisi od udaljenosti između Zemlje i Sunca i može da se izračuna kao

$$G_o = G_{SC} \left(1 + 0.0033 \cos \frac{360^\circ \times d_n}{365.25} \right) \cos \theta_z, \quad (5.1)$$

gde je $G_{SC} = 1367 \text{ W/m}^2$ solarna konstanta, d_n je dan u godini i θ_z je zenitni ugao.

Vrednost zenitnog ugla može da se izračuna pomoću

$$\theta_z = \cos^{-1} (\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta) , \quad (5.2)$$

gde je ϕ geografska širina na kojoj se nalazi panel, δ je deklinacija i ω je satni ugao koji zavisi od geografske dužine na kojoj se nalazi panel.

Deklinacija δ se računa kao

$$\begin{aligned} \delta = & (0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma \\ & - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma \\ & - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma)(180/\pi), \end{aligned} \quad (5.3)$$

gde je Γ dnevni ugao koji se računa kao

$$\Gamma = 2\pi \frac{d_n - 1}{365} . \quad (5.4)$$

Satni ugao ω se računa kao

$$\omega = 15^\circ \times (12 - ST) , \quad (5.5)$$

gde je ST solarno vreme. Solarno vreme ST se računa kao

$$ST = t + \frac{E_t + 4(\lambda - 15^\circ \times TZ)}{60} \quad (5.6)$$

gde je E_t jednačina vremena, λ je geografska širina na kojoj se nalazi panel i TZ je vremenska zona.

Jednačina vremena E_t se računa kao

$$\begin{aligned} E_t = & (0.000075 + 0.001868 \cos \Gamma - 0.032077 \sin \Gamma \\ & - 0.014615 \cos 2\Gamma - 0.04089 \sin 2\Gamma) \cdot 229.18 . \end{aligned} \quad (5.7)$$

Nakon što se odredi izvanzemaljsko solarno zračenje, primenjuje se model zračenja za potpuno vedar dan.

Prema Hottel [108], direktna komponenta zračenja za potpuno vedar dan može da se izračuna pomoću izvanzemaljske radijacije i zenitnog ugla kao

$$G_b = G_o \left(a_0 + a_1 e^{-\frac{k}{\cos \theta_z}} \right) , \quad (5.8)$$

gde su a_0 , a_1 i k parametri koji zavise od tipa klime. Ovi parametri se računaju na osnovu izraza (5.9-5.11), gde je A nadmorska visina na kojoj se nalazi lokaciju za koju se određuje vrednost osunčanosti, a r_0 , r_1 i r_k su korektivni faktori za različite toplotne pojaseve dati u tabeli 5.1.

$$a_0 = r_0 \times \left(0.4237 - 0.00821 (6 - A)^2 \right) \quad (5.9)$$

$$a_1 = r_1 \times \left(0.5055 + 0.00595 (6.5 - A)^2 \right) \quad (5.10)$$

$$k = r_k \times \left(0.2711 + 0.01858 (2.5 - A)^2 \right) \quad (5.11)$$

Difuzna komponenta radijacije računa se na osnovu Liu i Jordan [109] kao

$$G_d = 0.271 G_o - 0.294 G_b . \quad (5.12)$$

Tabela 5.1: Vrednosti korektivnih faktora r_0 , r_1 i r_k za različite toplotne pojaseve [108]

toplotni pojas	r_0	r_1	r_k
tropski	0.95	0.98	1.02
umereni - leto	0.97	0.99	1.02
umereni - zima	1.03	1.01	1.00
hladni - leto	0.99	0.99	1.01

Globalna radijacija za potpuno vedar dan je suma direktne i difuzne komponente

$$G = G_b + G_d . \quad (5.13)$$

Potrebno je napomenuti da vrednost globalne radijacije za potpuno vedar dan iz izraza (5.13) zavisi samo od geografskog položaja (dužina, širina i nadmorska visina) i vremenskog trenutka, pa može da se unapred izračuna i koristi u vidu lukap tabele, ukoliko su ovi parametri poznati.

Solarna energija za potpuno vedar dan dobija se iz solarne radijacije na osnovu karakteristika solarnog panela.

5.2 Nova tehnika WF-Fuzzy-Hybrid

Ova tehnika koristi osunčanost za potpuno vedar dan iz izraza (5.13) i na nju primenjuje podatke vremenske prognoze, kao i dodatnu popravku u stilu PPF tehnika.

5.2.1 Računanje solarne energije za dati trenutak

Kao što je prethodno navedeno, oblačnost se koristi kao parametar koji moduliše direktnu osunčanost za potpuno vedar dan. U odnosu na rad [89], dodata je i verovatnoća padavina, pošto je pokazano da može da utiče na solarnu radijaciju koja pada na Zemlju [110]. Podaci o verovatnoći padavina su korišćeni za modulisanje difuzne komponente osunčanosti za potpuno vedar dan G_d .

Da bi se ublažio uticaj greške predviđanja u ranim jutarnjim satima, uveden je stepen sa fazi filterom u tehniku za predviđanje. Greška predviđanja vlažnosti vazduha i atmosferskog pritiska se koriste da bi se korigovale vrednosti oblačnosti i verovatnoće padavina koji su dobijeni iz vremenske prognoze.

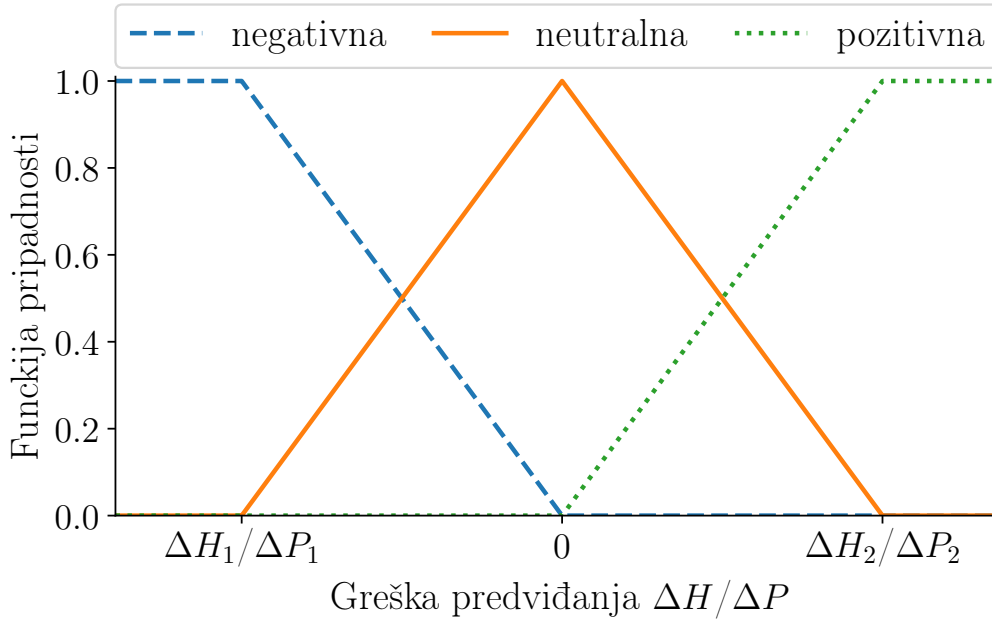
Korelacija između stvarne oblačnosti i vlažnosti vazduha i atmosferskog pritiska je pozitivna [91] i negativna [111], respektivno. Funkcije pripadnosti za fazifikovane vrednosti greške predviđanja vlažnosti vazduha ΔH i atmosferskog pritiska ΔP imaju oblik prikazan na slici 5.2

Funkcije pripadnosti za korekciju predviđanja oblačnosti ΔCC i verovatnoće padavina ΔPP imaju oblik prikazan na slici 5.3.

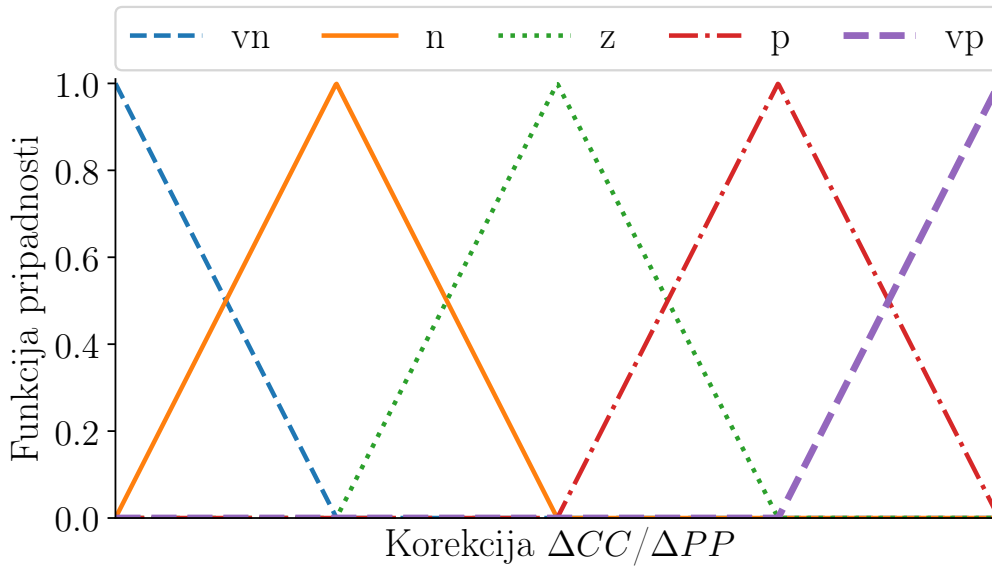
Skup pravila za mapiranje greške predviđanja vlažnosti vazduha i atmosferskog pritiska u korekciju predviđanja oblačnosti i verovatnoće padavina dat je u tabeli 5.2

Defazifikovane vrednosti korekcije predviđanja oblačnosti i padavina, ΔCC i ΔPP , se primenjuju na predviđene vrednosti do N_F časova unapred kao

$$\widetilde{CC}^{t+i} = CC^{t+i} + \Delta CC \frac{N_F - i}{N_F} \quad i \quad (5.14)$$



Slika 5.2: Funkcije pripadnosti za greške predviđanja vlažnosti vazduha (ΔH) i atmosferskog pritiska (ΔP)



Slika 5.3: Funkcije pripadnosti za korekciju predviđanja oblačnosti (ΔCC) i verovatnoće padavina (ΔPP)

$$\widetilde{PP}^{t+i} = PP^{t+i} + \Delta PP \frac{N_F - i}{N_F}, \quad (5.15)$$

gde $i \in [0, N_F - 1]$.

Da bi se dobila očekivana solarna osunčanost na osnovu podataka vremenske prognoze, primenjujemo podatke o oblačnosti i verovatnoći padavina na direktnu (5.8) i difuznu (5.12) komponentu, respektivno, kao

$$\widetilde{G}^t = (1 - CC^t) \times G_b^t + (1 - PP^t) \times G_d^t, \quad (5.16)$$

gde je CC^t oblačnost a PP^t je verovatnoća padavina za vremenski interval t . U slučaju ove tehnike u izrazu 5.16 za predviđanja oblačnosti i verovatnoće padavina koriste se korigovane vrednosti dobijene iz izraza (5.14)–(5.15).

Tabela 5.2: Skup fazi pravila za mapiranje greške predviđanja vlažnosti vazduha ΔH i atmosferskog pritiska ΔP u korekciju predviđanja oblačnosti ΔCC i verovatnoće padavina ΔPP

ΔH	ΔP	ΔCC	ΔPP
negativna	pozitivna	vp	vp
negativna	neutralna	p	p
negativna	negativna	z	z
neutralna	pozitivna	p	p
neutralna	neutralna	z	z
neutralna	negativna	n	n
pozitivna	positive	z	z
pozitivna	neutralna	n	n
pozitivna	negativna	vn	vn

5.2.2 Korekcija predviđene vrednosti

Pošto vremenska prognoza nije idealna, dodatna korekcija se primenjuje tako što se koristi odnos predviđene i stvarno izmerene energije da bi se korigovala buduća predviđanja kao

$$\hat{E}^t = \min \left\{ (1 + \alpha) \tilde{E}^t, E_{CS}^t \right\}, \quad (5.17)$$

gde je

$$\alpha = \frac{E^{t-1} - \tilde{E}^{t-1}}{\tilde{E}^{t-1}}. \quad (5.18)$$

Umesto ograničavanja α kao u [89], koristi se solarna energija za potpuno vedar dan da bi se ograničila predviđena energija posle korekcije. Na ovaj način, čak i ako dođe do predviđanja više energije nego što će je stvarno biti dostupno, vrednost je ograničena.

5.3 Nova tehnika WFET-Hybrid

Druga prikazana tehnika je jednostavnija jer ima samo jedan stepen korekcije. Ona, takođe, koristi podatke o osunčanosti za potpuno vedar dan dobijene na osnovu izraza (5.13) koje moduliše podacima o oblačnosti i verovatnoći padavina iz vremenske prognoze. Predviđanje na osnovu vremenske prognoze se kombinuje sa PPF tehnikom koja posmatra odnos izmerene i maksimalne (izvanzemaljske) solarne radijacije da bi se dobilo konačno predviđanje.

5.3.1 Računanje solarne energije za dati trenutak

Nakon što se primene podaci iz vremenske prognoze, dobija se očekivana solarna radijacija prema izrazu (5.16), gde se za predviđanje oblačnosti i verovatnoće padavina koriste podaci iz vremenske prognoze. Ta radijacija biće označena sa G_{WF} . Pored računanja predviđene radijacije, računa se odnos izmerene radijacije u prethodnom intervalu i radijacije prema modelu izvanzemaljskog zračenja

$$G_{PPF}^{t+i} = \frac{G^{t-1}}{G_{ET}^{t-1}} \cdot G_{ET}^{t+i}, i \geq 0. \quad (5.19)$$

Pošto se koristi ovakav odnos, očekivana radijacija će uvek biti manja ili jednaka maksimalnoj.

Konačna radijacija se dobija kombinacijom ove dve kao

$$G^{t+i} = \begin{cases} \frac{G_{WF}^{t+i} \cdot i + G_{PPF}^{t+i} \cdot (N_F - i)}{N_F}, & \text{za } 0 \leq i \leq N_F, \\ G_{WF}^{t+i}, & \text{za } i > N_F. \end{cases} \quad (5.20)$$

Na taj način su ukombinovane obe tehnike, gde se koristi PPF tehnika za kratkoročnu, a tehnika zasnovane na vremenskoj prognozi za srednjeročnu i dugoročnu prognozu.

5.4 Rezultati i diskusija

Da bi se omogućilo evaluiranje tehnika za predviđanje solarne energije, modelovan je solarno napajani bežični senzorski čvor u simuliranom okruženju, u kojem su i testirane predložene tehnike. Podaci o solarnom zračenju su preuzeti sa sajta automatske merne stanice Košutnjak [112] za period od februara 2018. godine do februara 2019. godine. Podaci vremenske prognoze su preuzeti sa sajta Dark Sky [113] koji nudi pristup putem programskog interfejsa (eng. *Application Programming Interface* - API) i pruža podatke u JavaScript Object Notation (JSON) formatu. Simulator je implementiran u programskom jeziku Python koristeći *simpy* [114] modul za simulaciju diskretnih događaja. Python modul *skfuzzy* [115] je korišćen za implementaciju fazi filtera.

Predložene tehnike za predviđanje dostupne energije upoređene su u pogledu greške predviđanja sa više tehnika opisanih u glavi 2: EWMA [51], ASE [72], WCMA [73], Pro-Energy [75], IPro-Energy [76], Pro-Energy-T [77], Delta-T [77], Forecast-WCMA [86] i tehnikom prikazanom u radu [89] (u daljem tekstu WF2LVL).

Metrike korišćene za računanje greške predviđanja su:

- srednja apsolutna greška predviđanja u procentima (*Mean Absolute Percentage Error* - MAPE)

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_i \left| \frac{E^i - \hat{E}^i}{E^i} \right| \quad (5.21)$$

- srednje apsolutno odstupanje u procentima (*Mean Absolute Deviation Percent* - MADP)

$$MADP = 100 \cdot \frac{\sum_{M(i)} |E^{M(i)} - \hat{E}^{M(i)}|}{\sum_{M(i)} E^{M(i)}} \quad (5.22)$$

- normalizovana srednja kvadratna greška (*Normalized Root Mean Squared Error* - nRMSE)

$$nRMSE = 100 \cdot \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (E^i - \hat{E}^i)^2}}{\frac{\sum_i E^i}{N}} \quad (5.23)$$

- srednja greška uticaja (*Mean Bias Error* - MBE)

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_i (\hat{E}^i - E^i) \quad (5.24)$$

U izrazima (5.21)–(5.24) vrednosti E^i i $\hat{E}^i$ su izmerena i predviđena vrednost solarne energije za interval i , respektivno.

MAPE metrika se često koristi za evaluaciju kvaliteta tehnika za predviđanje. Međutim, mana MAPE metrike je što kada je merena energija bliska nuli, npr. prilikom izlaska ili zalaska sunca, greška koja se dobija ovom metrikom može da bude prilično velika, što može da unese grešku u konačne rezultate. MADP metrika se koristi da se odredi greška predviđanja u intervalu od M uzastopnih vremenskih intervala. U ovoj disertaciji mnterval M je odabran da bude 24 časa. MADP je robusnija metrika od MAPE pošto na nju ne utiču vrednosti kada je merena energija bliska nuli. Normalizovana varijanta srednje kvadratne greške (nRMSE) koristi se da bi rezultati mogli da se porede sa tehnikama koje su testirane na drugim merenim podacima. MBE je jedina metrika koja uzima u obzir i znak greške predviđanja, pa može da ukaže na sveukupan trend grešaka predviđanja u smislu predviđanja manje ili više energije koja će biti dostupna.

Podesivi parametri tehnika za predviđanje su odabrani u skladu sa odgovarajućim radovima. Tehnike Forecast-WCMA i WF2LVL nemaju parametre čije vrednosti treba da se konfigurišu. Lista izabranih vrednosti parametara data je u tabeli 5.3.

Funkcije pripadnosti za fazi filter tehnike WF-Fuzzy-Hybrid su odabrane na osnovu dostupnih podataka. Standardna devijacija grešaka predviđanja za vlažnost vazduha i atmosferski pritisak su $\sigma_H = 11\%$ i $\sigma_P = 0.8$ mbar, respektivno. Za vrednosti ΔH_1 , ΔH_2 , ΔP_1 i ΔP_2 odabran je opseg od 3σ . Opseg korekcije greške ΔCC je ograničen na $[-0.5, 0.5]$, a ΔPP na $[-0.25, 0.25]$.

Greške predviđanja analiziranih tehnika za predviđanje dostupne energije u budućnosti za naredni vremenski interval date su u tabeli 5.4. Na osnovu tabele 5.4, predložena tehnika za predviđanje WFET-Hybrid ima najmanju grešku predviđanja za naredni vremenski interval prema MAPE i nRMSE metrikama, odnosno drugu najmanju grešku predviđanja prema MADP metrici. Tehnika WF-Fuzzy-Hybrid ima 4-tu, 5-tu i 6-tu najmanju grešku predviđanja za naredni vremenski interval po metrikama MAPE, MADP i nRMSE, respektivno. Na osnovu MBE metrike, obe predložene tehnike u proseku predviđaju malo više energije nego što je stvarno dostupno.

Ukoliko se posmatraju MAPE greške, tehnike sa najmanjom greškom za naredni vremenski interval, WFET-Hybrid, ASEA, Delta-T i WF-Fuzzy-Hybrid, vrše korekciju na osnovu odnosa prikupljene energije u prethodnom vremenskom intervalu i predviđanja za prethodni vremenski interval. U daljoj analizi na graficima će biti prikazano šest tehnika za predviđanje dostupne energije koje imaju najmanju MAPE grešku za naredni vremenski interval.

Distribucija MAPE grešaka analiziranih tehnika u koracima od po 20% MAPE prikazana je u tabeli 5.5, dok je na slici 5.4 prikazana distribucija MAPE grešaka odabranih šest tehnika po različitim opsezima grešaka. Na osnovu distribucije grešaka tehnika WFET-Hybrid ima 59.58% grešaka u MAPE opsegu od 20% MAPE, gde ostale tehnike za predviđanje dostupne energije imaju od 32.77% do 58.43%. Tehnike WFET-Hybrid, ASEA i WF-Fuzzy-Hybrid se ističu jer im se preko 95% MAPE grešaka nalazi u opsegu od 100% MAPE.

Da bi se stekao bolji uvid u karakteristike i ponašanje predloženih tehnika za predviđanje, MAPE, MAE i MBE greške za sunčane sate od 05:00 do 19:00 prikazane su na slikama Fig. 5.5-5.7. MAE greška (eng. *Mean Absolute Error* - srednja apsolutna greška) nije korišćena u poređenju evaluiranih tehnika koje je prikazano u tabeli 5.4, zato što je korišćena MAPE greška. MAPE greška je bila praktičnija za poređenje zato što uzima u obzir odnos između greške predviđanja i stvarne vrednosti, a ne samo grešku predviđanja. MAE se računa kao

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_i |E^i - \hat{E}^i|. \quad (5.25)$$

Prema slici 5.5, tehnike WFET-Hybrid i WF-Fuzzy-Hybrid imaju MAPE grešku u jutarnjim satima

Tabela 5.3: Izabrani parametri tehnika za predviđanje

tehnika	parametar	vrednost
EWMA [51]	α	0.7
ASEA [72]	α	0.7
	N	6
WCMA [73]	α	0.7
	D	4
	K	3
Pro-Energy [75]	α	0.5
	D	14
	K	2
	P	9
IPro-Energy [76]	W_f	0.7
	D	30
	K	2
	P	2
	r	0.5
Pro-Energy-T [77]	<i>isto kao Pro-Energy</i>	
Delta-T [77]	D	4
Forecast-WCMA	<i>nema podesivih parametara</i>	
WF2LVL [89]	<i>nema podesivih parametara</i>	
WF-Fuzzy-Hybrid [107]	N_f	6
	ΔH_1	-33
	ΔH_2	33
	ΔP_1	-2.4
	ΔP_2	2.4
WFET-Hybrid	N_f	6

jednaku ili manju od greške ASEA, a značajno manju od ostalih tehnika. U popodnevnim satima WFET-Hybrid zadržava manju MAPE grešku od ostalih tehnika.

Da bi se detaljnije analizirale greške predviđanja po sunčanim satima, na slici 5.6 prikazane su greške po satima za evaluirane tehnike. Na osnovu MAE grešaka može da se zaključi da WFET-Hybrid tehnika ima najmanju grešku predviđanja po svim sunčanim satima, sem za 7 časova, kada manju grešku ima ASEA tehnika. Slika 5.6 dodatno potvrđuje zaključak da tehnike zasnovane na korišćenju odnosa merenja iz prethodnog vremenskog intervala i predviđene energije daju najmanju grešku predviđanja za naredni vremenski interval.

MBE greške po sunčanim satima prikazane na slici 5.7 pokazuju da ASEA i Delta-T imaju najkonzistentnije greške predviđanja, gde je u proseku na nivou dana podjednaka količina predviđanja više i manje energije nego što će je stvarno biti. Ostale tehnike imaju tendenciju da u prepodnevnim satima predviđaju manje energije nego što će je stvarno biti, dok u popodnevnim satima predviđaju

5.4. REZULTATI I DISKUSIJA

Tabela 5.4: Greške predviđanja analiziranih tehnika za predviđanje dostupne energije za naredni vremenski interval

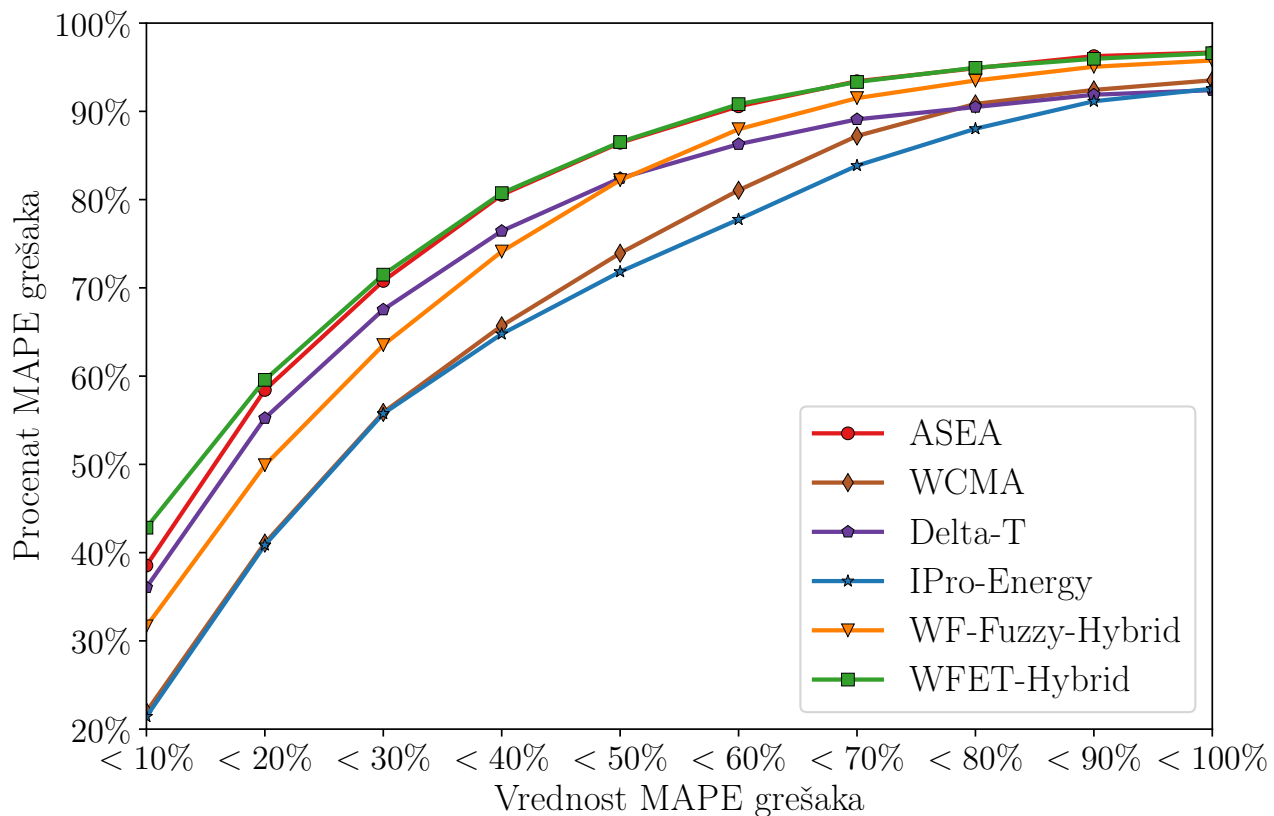
tehnika	MAPE [%]	MADP [%]	nRMSE [%]	MBE [J]
EWMA [51]	80.26	27.39	72.09	-7.33
ASEA [72]	25.99	3.69	43.78	0.96
WCMA [73]	38.35	1.93	51.17	-6.60
Pro-Energy [75]	46.95	12.85	56.42	-46.52
IPro-Energy [76]	40.95	15.87	53.41	-54.21
Pro-Energy-T [77]	44.73	10.74	43.05	-13.38
Delta-T [77]	30.33	4.02	47.57	0.43
Forecast-WCMA [86]	47.55	7.21	56.91	3.28
WF2LVL [89]	59.59	17.60	56.71	-34.15
WF-Fuzzy-Hybrid [107]	31.15	4.07	51.97	2.40
WFET-Hybrid	24.90	2.95	40.09	0.61

Tabela 5.5: Distribucija MAPE grešaka u koracima od po 20% za predviđanje dostupne energije u narednom vremenskom intervalu

Tehnika	opseg MAPE grešaka					
	0 – 20%	20 – 40%	40 – 60%	60 – 80%	80 – 100%	> 100%
EWMA [51]	39.93	21.84	12.33	6.29	2.95	16.67
ASEA [72]	58.43	22.11	10.03	4.32	1.78	3.33
WCMA [73]	41.08	24.62	15.36	9.78	2.68	6.48
Pro-Energy [75]	32.77	28.81	14.46	10.28	3.99	9.70
IPro-Energy [76]	40.86	23.91	12.98	10.28	4.54	7.43
Pro-Energy-T [77]	51.00	21.32	7.98	3.36	5.96	10.39
Delta-T [77]	55.23	21.21	9.84	4.21	1.91	7.60
Forecast-WCMA [86]	39.87	23.04	14.10	8.17	3.25	11.56
WF2LVL [89]	39.68	25.20	16.15	3.77	2.65	12.54
WF-Fuzzy-Hybrid [107]	49.90	24.21	13.86	5.52	2.27	4.24
WFET-Hybrid	59.58	21.15	10.08	4.13	1.64	3.42

više energije nego što će je stvarno biti. Taj trend je prilično izražen kod IPro-Energy i WCMA tehnika, dok je kod WFET-Hybrid i WF-Fuzzy-Hybrid znatno manje izraženo.

Na slici 5.8 prikazana su MAPE greške predviđanja za šest odabranih tehnika po mesecima. MAPE greške svih tehnika su najmanje u periodima april-maj i avgust-oktobar, dok su greške značajno veće u letnjim i zimskim mesecima. Tehnika WFET-Hybrid ima najmanju grešku po svim mesecima, sem u septembru gde tehnika ASEA ima manju MAPE grešku. Još jednom se vidi da tehnike zasnovane na korišćenju odnosa izmerene i predviđene energije za prethodni interval daju manju grešku od ostalih tehnika.



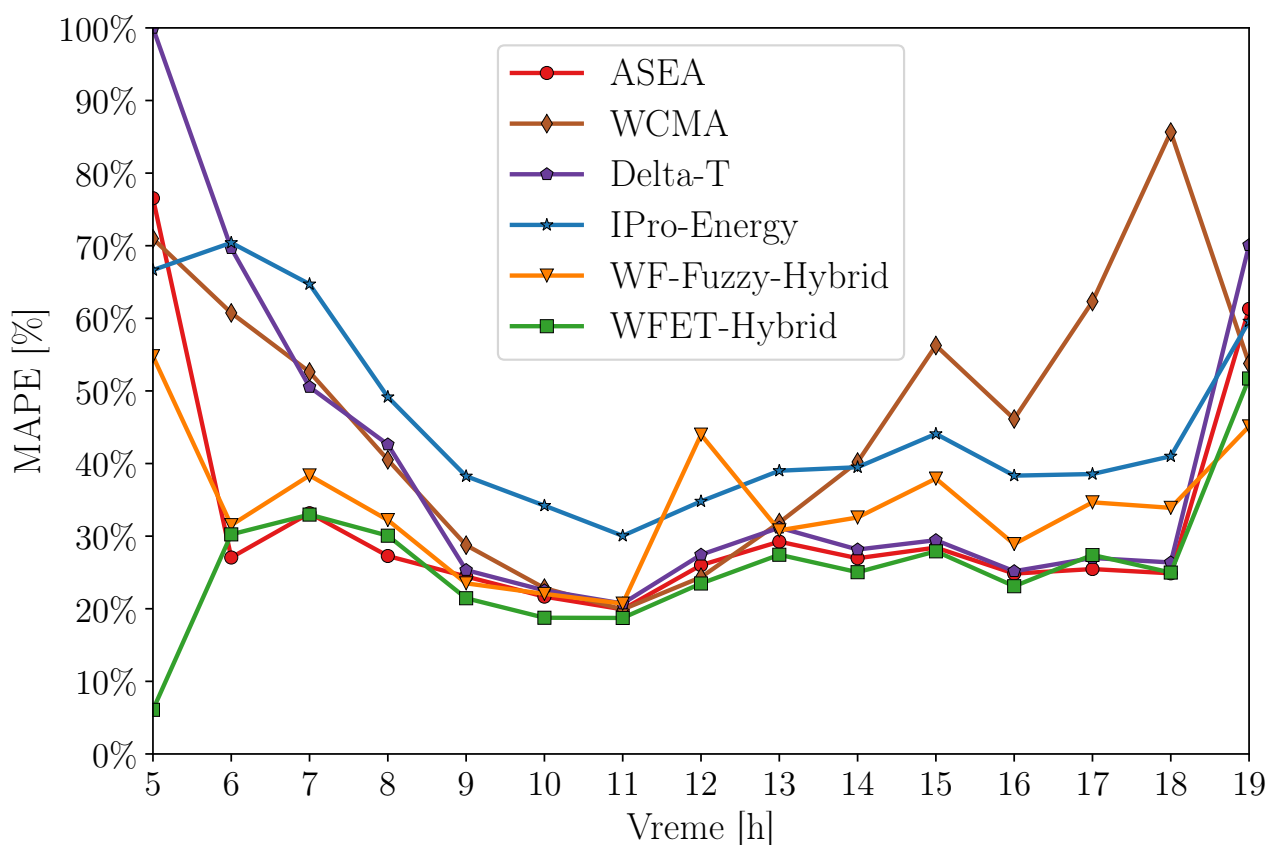
Slika 5.4: Distribucija MAPE grešaka za predviđanje dostupne energije u narednom vremenskom intervalu

MBE greška po mesecima pokazuje da IPro-Energy i WCMA svakog meseca predviđaju manje energije nego što je stvarno izmereno. Predviđanja ostalih tehnika su uglavnom uravnotežena po pitanju predviđanja više i manje energije nego što je stvarno dostupno.

U dosadašnjoj analizi posmatrano je predviđanje samo za naredni vremenski interval, odnosno kratkoročna prognoza. Algoritmima za raspoređivanje energije mogu biti potrebni podaci o srednjeročnoj i dugoročnoj prognozi, da bi mogli da naprave adekvatan plan rada. MAPE greške predviđanja analiziranih tehnika za intervale predviđanja do 24 časa unapred date su u tabeli 5.6. Na osnovu tabele 5.6 predložene tehnike WF-Fuzzy-Hybrid i WFET-Hybrid se ističu jer imaju najmanje vrednosti MAPE grešaka u svim vremenskim intervalima od 2 do 24 časa u budućnosti. Uzrok znatno manje MAPE greške u odnosu na ostale tehnike jeste to što su predložene tehnike zasnovane na vremenskoj prognozi. Iako u tabeli 5.6 ima još tehnika koje koriste vremensku prognozu (Forecast-WCMA i WF2LVL), prednost predloženih tehnika je što u funkciji $G(CC_d^t)$ iz izraza (2.20) koriste podatke iz vremenske prognoze o verovatnoći padavina pored podataka o oblačnosti. Takođe, predložene tehnike koriste izvanzemaljski model radijacije za računanje za računanje solarne radijacije za potpuno vedar dan, umesto tabelarnih vrednosti po mesecima na osnovu kojih rade Forecast-WCMA i WF2LVL.

Na slici 5.10 prikazane su MAPE greške predviđanja odabranih šest tehnika za vremenske intervale od 1 sat do 24 sata u budućnosti. Na osnovu slike 5.10, tehnika WFET-Hybrid ima najmanje vrednosti MAPE grešaka u svim vremenskim intervalima od 1 do 24 sata u budućnosti, odnosno za sve intervale predviđanja: kratkoročno, srednjeročno i dugoročno. Tehnika WF-Fuzzy-Hybrid ima manje MAPE greške od ostalih tehnika koje su korišćene za poređenje u svim vremenskim intervalima od 2 do 24 sata u budućnosti, jedino za naredni vremenski interval tehnika ASEA ima manju MAPE grešku.

Vrednosti MAPE grešaka za predložene tehnike imaju konstantnu vrednost od vremenskog intervala od 6 sati u budućnosti pa nadalje, zato što je parametar N_f koji određuje dokle se primenjuje PPF



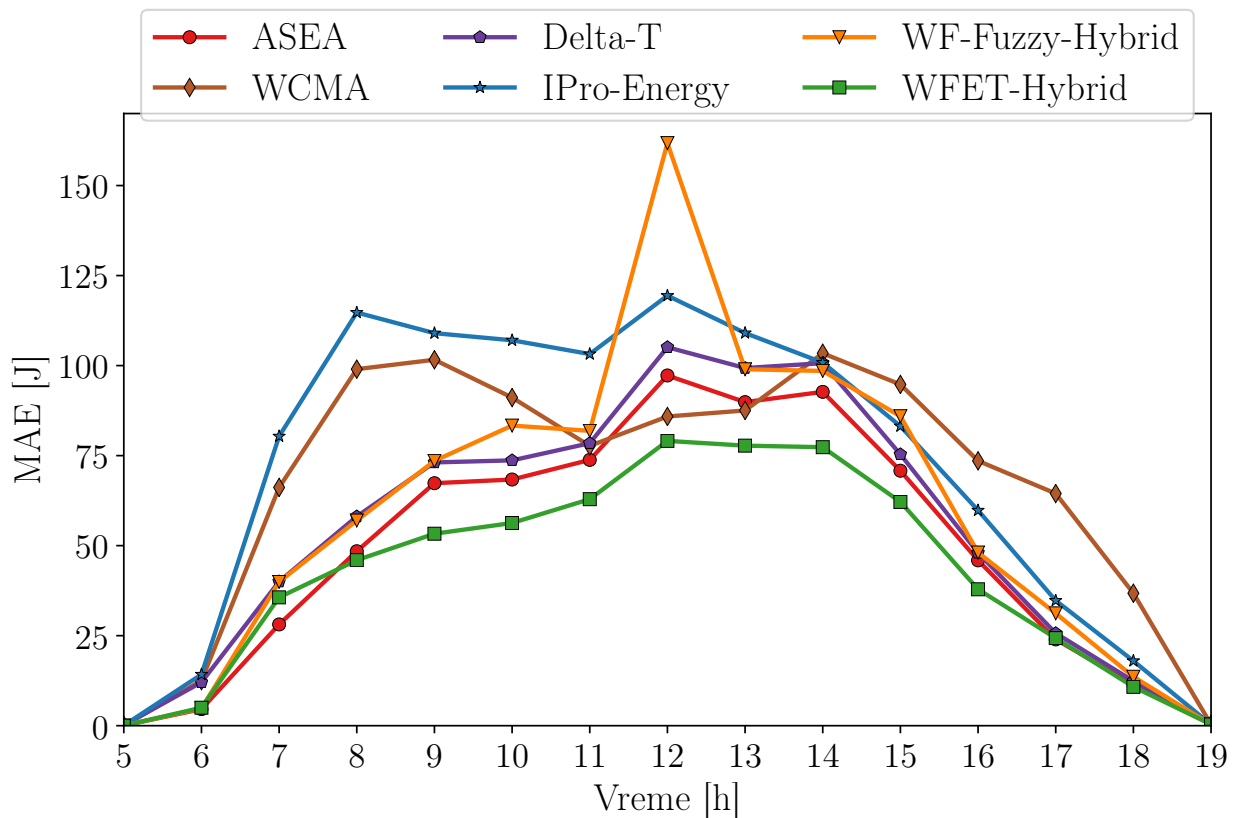
Slika 5.5: MAPE greške za predviđanje dostupne energije u narednom vremenskom intervalu po sunčanim satima od 05:00 do 19:00

Tabela 5.6: MAPE greške predviđanja analiziranih tehnika za vremenske intervale do 24 časa u budućnosti

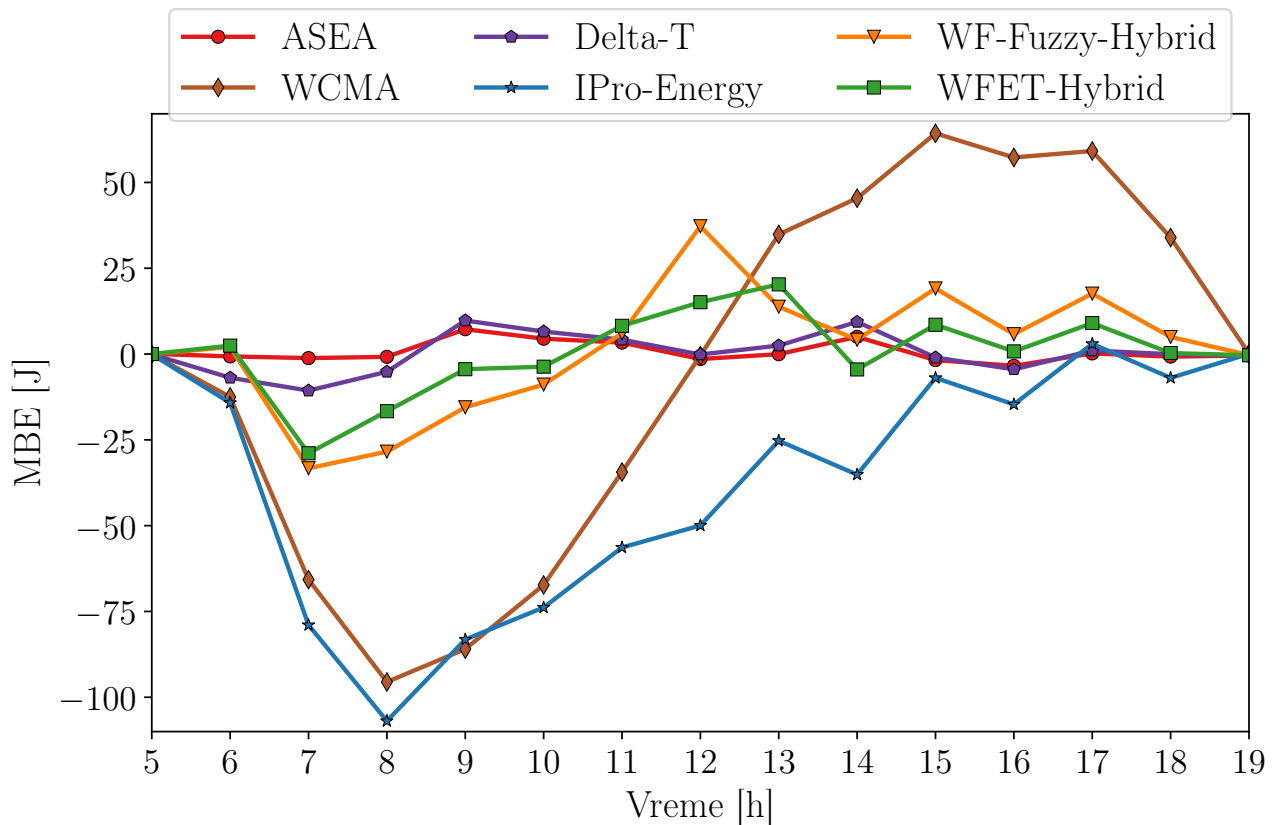
Tehnika	vremenski interval u budućnosti						
	+2	+4	+6	+8	+12	+18	+24
EWMA [51]	80.26	80.26	80.26	80.26	80.26	80.26	80.26
ASEA [72]	45.59	90.95	94.94	80.26	80.26	80.26	80.26
WCMA [73]	82.10	82.10	82.11	82.66	86.72	90.15	106.13
Pro-Energy [75]	60.26	73.06	81.44	84.33	89.60	88.85	74.91
IPro-Energy [76]	61.82	84.28	86.19	77.48	71.32	96.50	74.91
Pro-Energy-T [77]	63.12	79.37	80.34	74.03	72.97	86.06	99.82
Delta-T [77]	48.40	65.98	80.97	88.81	97.98	84.79	78.22
Forecast-WCMA [86]	89.23	83.72	79.98	78.65	82.95	93.06	62.86
WF2LVL [89]	83.59	83.59	83.59	83.59	83.59	83.59	83.59
WF-Fuzzy-Hybrid [107]	45.42	55.01	58.14	59.05	59.05	59.05	59.05
WFET-Hybrid	41.87	54.56	58.71	59.05	59.05	59.05	59.05

korekcija postavljen na 6 sati. Zato se u intervalima daljim od 6 sati u budućnosti koristi predviđanje samo na osnovu vremenske prognoze, koja se dohvata jednom u 24 časa, pa je greška ista za sve vremenske intervale.

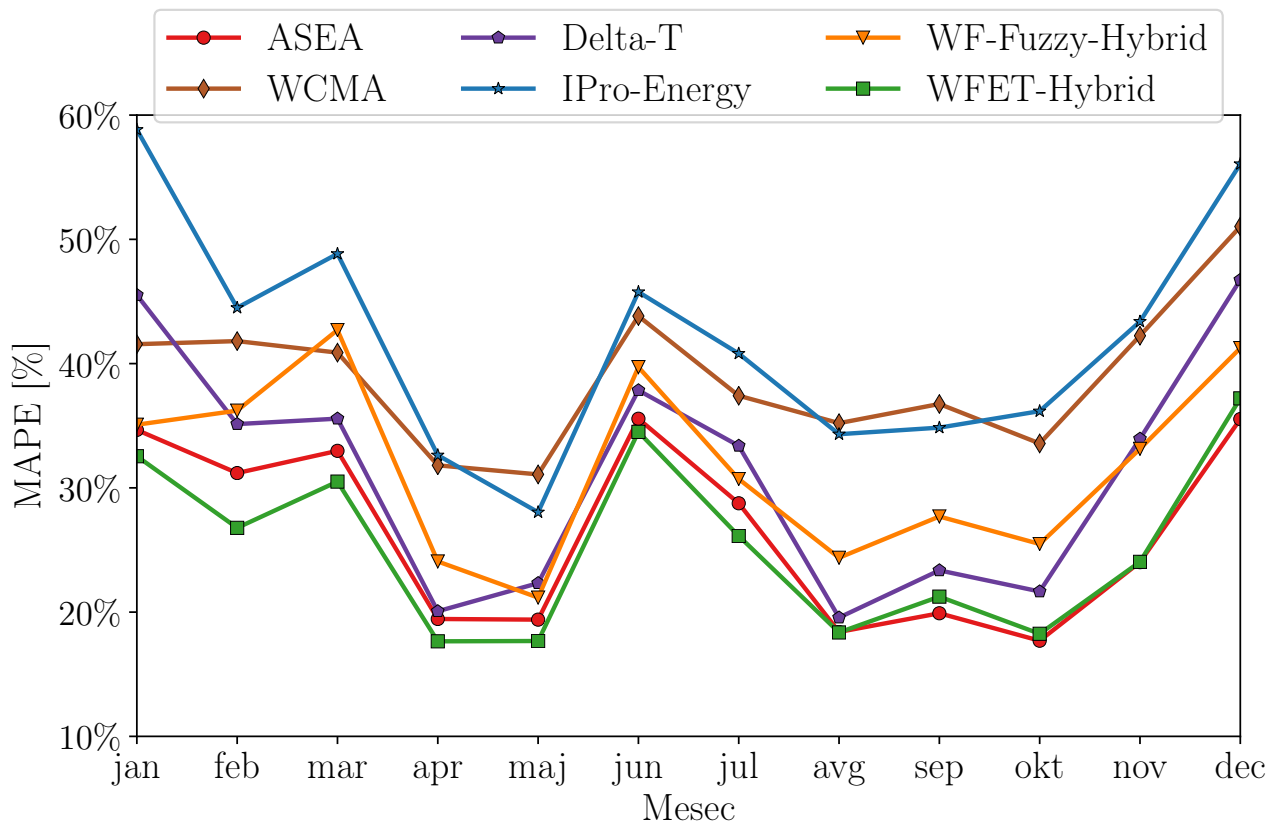
Tehnike ASEA i Delta-T imaju uporedive MAPE greške predviđanja sa predloženim tehnikama samo u prva dva vremenska intervala u budućnosti, nakon čega predložene tehnike dominiraju.



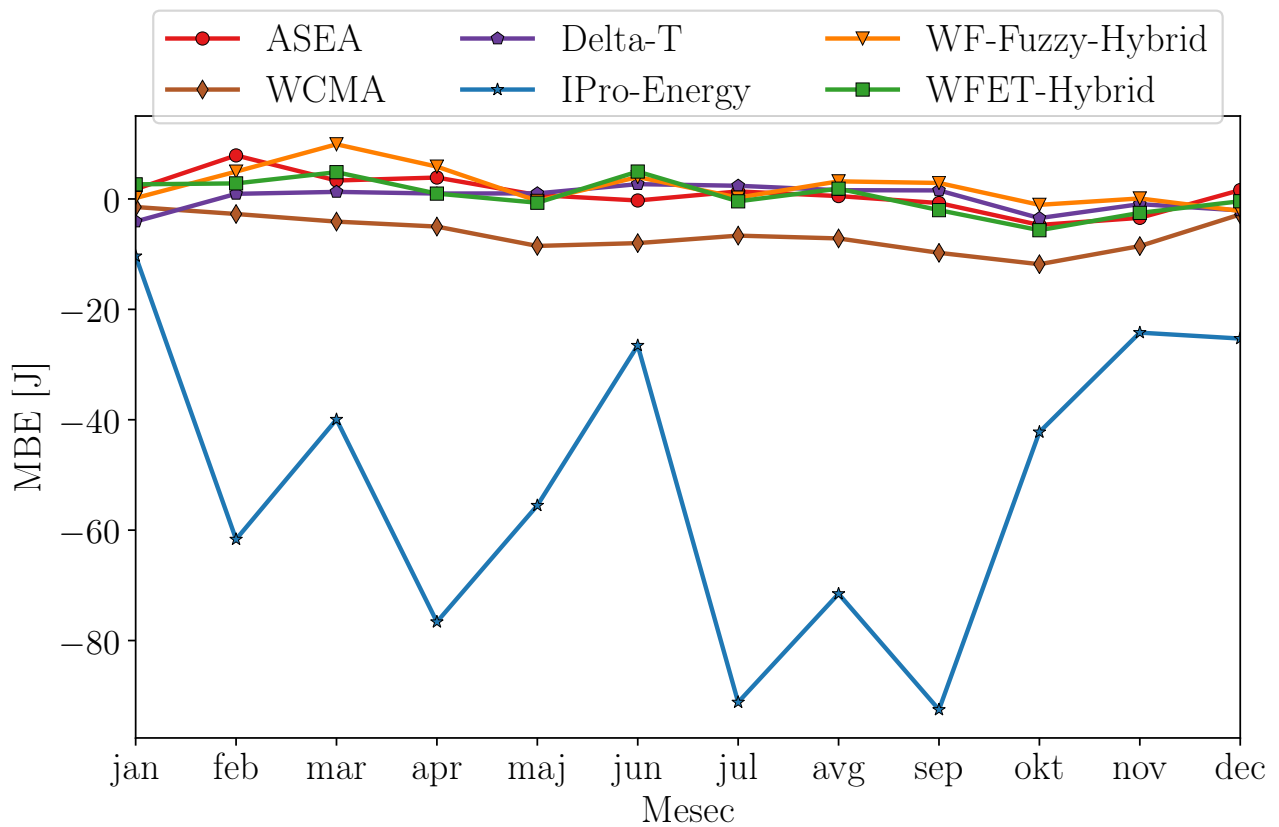
Slika 5.6: MAE greške za predviđanje dostupne energije u narednom vremenskom intervalu po sunčanim satima od 05:00 do 19:00



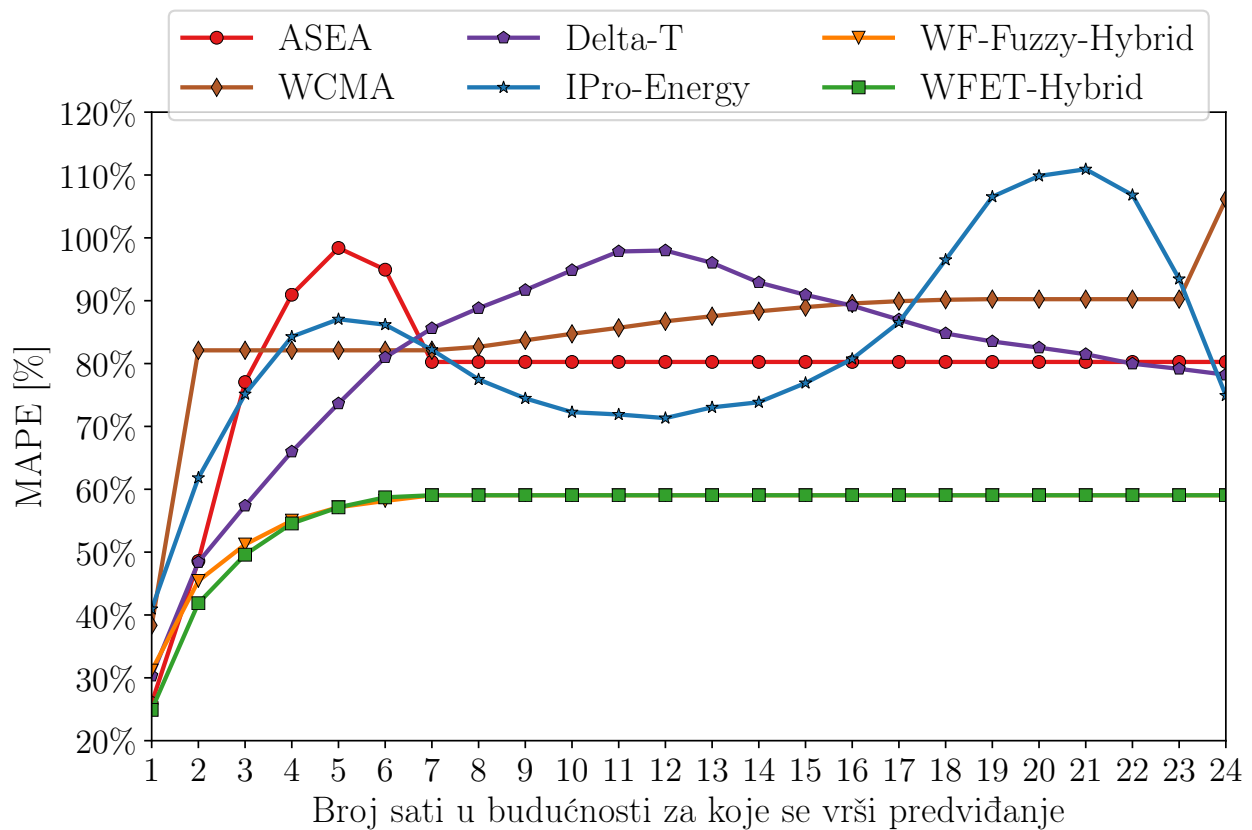
Slika 5.7: MBE greške za predviđanje dostupne energije u narednom vremenskom intervalu po sunčanim satima od 05:00 do 19:00



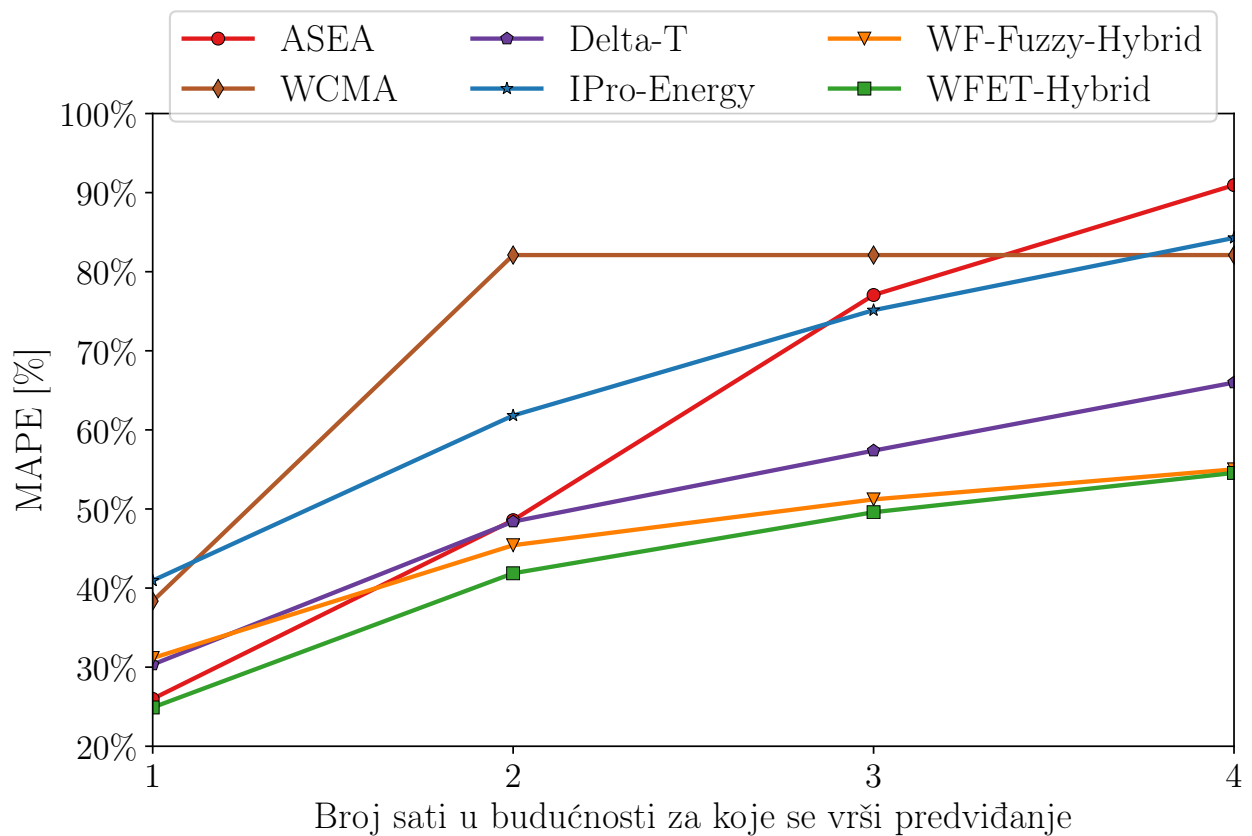
Slika 5.8: MAPE greške odabranih tehnika za različite mesece u godini



Slika 5.9: MBE greške odabranih tehnika za različite mesece u godini



Slika 5.10: MAPE greške predviđanja odabranih tehnika za vremenske intervale od 1 sat do 24 sata u budućnosti



Slika 5.11: MAPE greške predviđanja odabranih tehnika za vremenske intervale od 1 sat do 4 sata u budućnosti

Glava 6

Algoritam za optimizaciju potrošnje i performansi

U glavama 4 i 5 opisane su tehnike koje predstavljaju sastavne delove algoritma za optimizaciju potrošnje i performansi. Tehnika za smanjenje potrošnje prikazana u glavi 4 ulazi u sastav algoritma za raspoređivanje energije, a tehnika za predviđanje dostupne energije u budućnosti prikazana u glavi 5 pripada modelima procesa u okviru algoritma za optimizaciju.

U ovoj glavi biće prikazan novi algoritam za raspoređivanje energije, odnosno modul za donošenje odluka. Integracijom prikazanih novih tehnika i algoritma za raspoređivanje energije dobija se novi algoritam za optimizaciju potrošnje i performansi, čije će karakteristike biti analizirane u ovoj glavi.

6.1 Model solarno napajanog bežičnog senzorskog čvora

Model solarno napajanog bežičnog senzorskog čvora prikazan je na slici 6.1.

Solarni panel prikuplja solarnu energiju. Karakteristike solarnog panela su površina A i efikasnost η_{panel} . U modelu je podešeno da je panel postavljen tangencijalno u odnosu na Zemljinu površinu. Pojednostavljena verzija modela iz [116] korišćenja je za računanje energije koju generiše solarni panel u vremenskom intervalu T kao

$$E_{panel} = \eta_{panel} \tilde{G} \cdot A \cdot T, \quad (6.1)$$

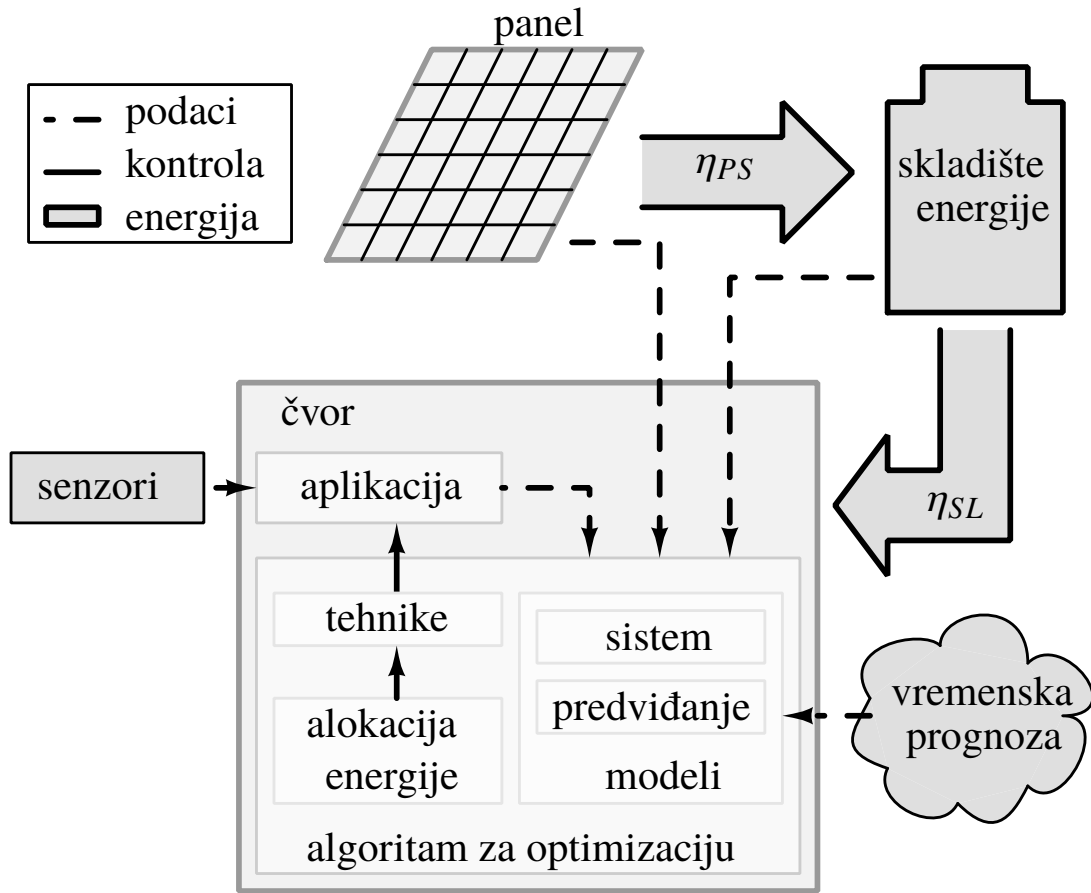
gde je $\tilde{G}$ predviđena osunčanost izračunata na osnovu izraza (5.16).

Prikupljena energija se skladišti u skladištu energije sa efikasnošću $\eta_{PS} < 1$ usled konverzija energije. Skladište energije modelovano je pomoću trenutnog stanja napunjenosti E_{ES} . Maksimalni kapacitet skladišta energije je $E_{ES,MAX}$.

Senzorski čvor troši energiju iz skladišta sa efikasnošću $\eta_{SN} < 1$ usled konverzija energije. Čvor troši srednju snagu P_{ON} kada radi sa 100% utilizacije i P_{OFF} kada je u neaktivnom režimu. Maksimalna utilizacija je ograničena na DC_{MAX} i srednja potrošnja u tom slučaju je P_{MAX} .

Na senzorskom čvoru se izvršava predefinisana aplikacija. Aplikacija je modelovana pomoću tri taska:

- τ_{acq} - vremenski kritičan task koji vrši akviziciju podataka (task najvišeg prioriteta);
- τ_{proc} - vremenski nekritičan task koji vrši obradu podataka pre slanja (task najnižeg prioriteta);



Slika 6.1: Model solarno napajanog bežičnog senzorskog čvora

- τ_{rf} - vremenski kritičan task koji vrši slanje podataka ka pristupnom čvoru (task srednjeg prioriteta).

Prikupljeni podaci mogu da se šalju ka pristupnom čvoru i bez obrade, odnosno ne mora svaka instanca taska τ_{proc} da se izvrši. U slučaju da se ne izvrši neka instanca taska τ_{proc} , doprinos degradaciji taska DEG_{proc} je $1/FTS_{proc}$, a doprinos degradaciji cele aplikacije je $w_{proc} \cdot DEG_{proc}$.

Pošto je vremenska skala raspoređivanja taskova u milisekundama, a vremenska skala predviđanja dostupne solarne energije u minutima odnosno satima, za potrebe simulacije modelovano je da je potrošnja energije prilikom prikupljanja, obrade i slanja podataka konstantna i iznosi $P_{ON} \cdot t_{acq}$. Vreme t_{acq} predstavlja trajanje celog procesa prikupljanja, obrade i slanja podataka.

6.1.1 Novi algoritam za raspoređivanje energije

Na osnovu analize postojećih realizacija algoritama za raspoređivanje energije iz glave 2, mogu da se izdvoje dva različita pristupa. Jedan pristup podrazumeva da se algoritam za raspoređivanje energije formuliše u vidu optimizacionog problema koji se potom rešava. U tom slučaju raspored se pravi za više vremenskih intervala u budućnosti i neophodna su predviđanja dostupne energije za više vremenskih intervala u budućnosti. Mana ovog pristupa je što je rešavanje takvog optimizacionog problema suviše kompleksno za mikrokontrolere koji se mogu naći u senzorskim čvorovima. Drugi pristup predstavlja realizaciju algoritma za raspoređivanje energije u vidu skupa pravila. Na taj način se odluke donose samo za naredni vremenski interval i implementacija je jednostavnija.

Algoritam za raspoređivanje energije prikazan u ovoj glavi realizovan je u vidu skupa pravila. U toku dana koriste se podaci predviđanja dostupne energije za naredni vremenski interval, dok se

tokom noći prati dugoročno predviđanje u cilju optimalnog raspoređivanja energije. Ulazi u algoritam su podaci o prikupljenoj solarnoj energiji sa solarnog panela i trenutno stanje napunjenosti skladišta energije. Stanje napunjenosti podeljeno je u tri regiona. Takođe, kao ulazni podatak se koristi rezultat tehnike za predviđanje dostupne energije. Podaci o vremenskoj prognozi, koje koriste određene tehnike za predviđanje dostupne energije, dohvataju se pomoću istog bežičnog interfejsa koji se koristi za slanje izmerenih podataka. Od tehnika za smanjenje potrošnje koristi se uvedena tehnika za kontrolu utilizacije.

Cilj optimizacije je da se postigne što veći stepen energetske neutralnosti, gde su performanse proporcionalne utilizaciji sistema.

6.1.2 Regioni stanja napunjenosti skladišta energije

Na slici 6.2 prikazani su regioni na koje je podeljeno skladište energije i uslovi za prelazak između regiona.

6.1.2.1 Normalni region

U normalnom regionu, kada je stanje napunjenosti veće od $E_{ES,HI}$, performanse sistema se određuju na osnovu predviđanja energije koja će biti dostupna u budućnosti prema izrazu (6.2).

$$DC = \min \left\{ \frac{\eta_{PS}\eta_{SN}\hat{E}^t/T - P_{OFF}}{P_{ON} - P_{OFF}}, DC_{MAX} \right\}, \quad (6.2)$$

Ideja je da se sva energija koja pristiže iskoristi za rad sistema, uz uslov da utilizacija ne može biti veća od DC_{MAX} . Na taj način se u normalnom regionu održava stanje napunjenosti skladišta energije.

6.1.2.2 Konzervativni region

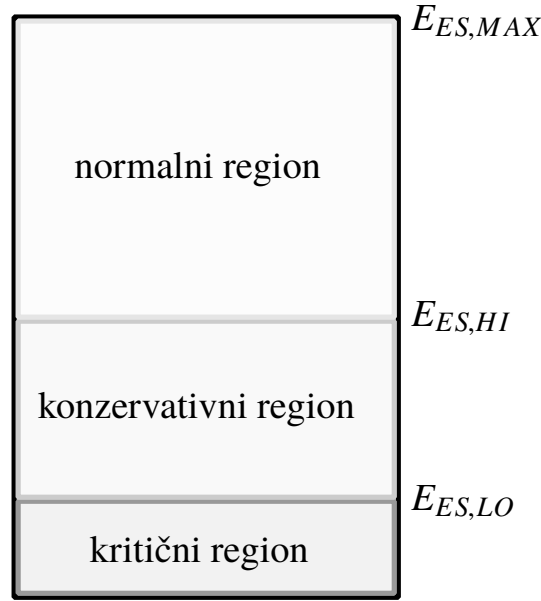
Ukoliko stanje napunjenosti padne ispod $E_{ES,HI}$, ulazi se u konzervativni region, gde se aktivira tehnika za kontrolu utilizacije. Primenom tehnike za kontrolu utilizacije dodaju se intervali neaktivnog procesiranja umesto određenih vremenski nekritičnih ili uslovno vremenski kritičnih taskova. Na taj način smanjuje se ukupna utilizacija sistema, a samim tim i potrošnja, po cenu povećanja degradacije performansi. Tehnika se primenjuje tako da se utilizacija sistema redukuje na vrednost utilizacije dobijene izrazom (6.2) pomnožene faktorom k , $k < 1$. Smanjenjem potrošnje sistema ostavlja se mogućnost skladištu energije da se brže dopuni.

6.1.2.3 Kritični region

Ukoliko stanje napunjenosti skladišta energije padne ispod $E_{ES,LO}$, ulazi se u kritični region i utilizacija se postavlja na DC_{MIN} . U ovom regionu smatra se da je sistem u otkazu. Da bi se izašlo iz kritičnog regiona potrebno je da se stanje napunjenosti skladišta energije vrati na $E_{ES,HI}$. Uvedeni histerezis omogućava da se izbegne oscilovanje između konzervativnog i kritičnog regiona.

6.1.3 Određivanje vrednosti utilizacije koja treba da se podesi

Očekivana energija za naredni vremenski interval $\hat{E}^t$ se koristi za određivanje utilizacije za naredni vremenski interval u normalnom regionu rada. Ukoliko je očekivana energija iznad energije koja je



Slika 6.2: Granične vrednosti stanja napunjenosti skladišta energije u primeru algoritma za raspoređivanje energije

neophodna za rad sa utilizacijom DC_{LO}

$$E_{LO} = (DC_{LO}P_{ON} + (1 - DC_{LO})P_{OFF}) \times T, \quad (6.3)$$

količina energije koja će biti prikupljena se koristi za podešavanje utilizacije prema izrazu (6.2), tako da stanje napunjenosti baterije ostane nepromenjeno. Utilizacija DC_{LO} je odabrana tako da skladište energije napunjeno do maksimalnog kapaciteta može da održi funkcionalnost čvora 12 časova bez ikakve prikupljene energije. U tom slučaju, prosečna potrošnja u svakom vremenskom intervalu bi trebala da bude

$$P_{avg,LO} = \frac{1}{T} \frac{E_{ES,MAX} - E_{ES,HI}}{12}, \quad (6.4)$$

i DC_{LO} može da se izračuna kao

$$DC_{LO} = \frac{P_{avg,LO} - P_{OFF}}{P_{ON} - P_{OFF}} \quad (6.5)$$

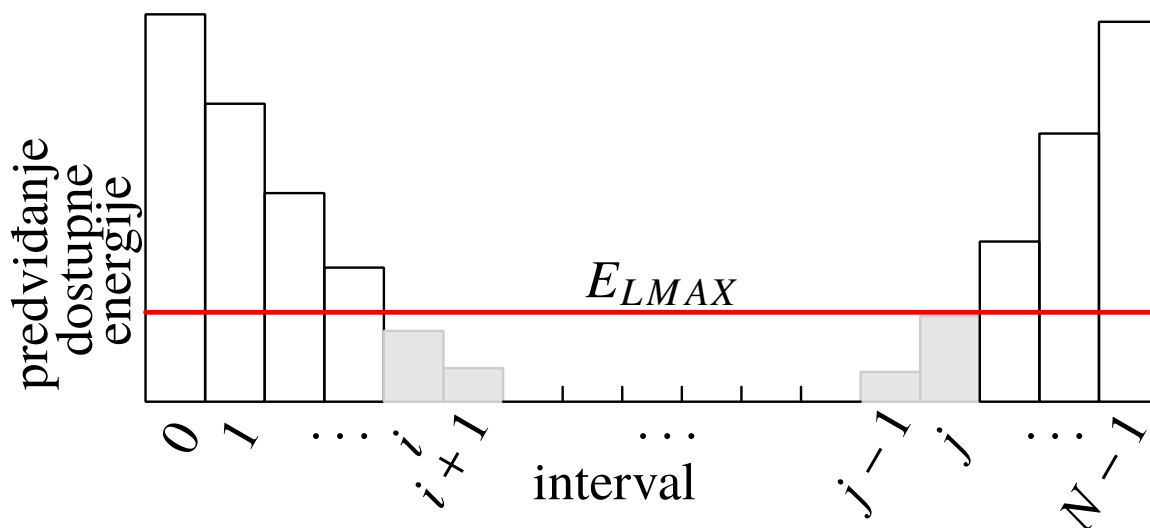
Ukoliko je očekivana energije ispod E_{LO} , što je očekivano da se desi u suton, naredni vremenski intervali se pretražuju dok se ne nađe vremenski interval $t + X$ za koji važi $\hat{E}^{t+X} > E_{LO}$, koji se onda identifikuje kao svitanje. Na slici 6.3 data je ilustracija pretraživanja vremenskih intervala i određivanja dostupne energije od sumraka do svitanja. Za vremenske intervale od t do $t + X$, odnosno tokom noći, prosečna utilizacija se određuje pomoću sledećeg izraza

$$DC_{night} = \frac{\eta_{SN} \left(\eta_{PS} \sum_{i=0}^{X-1} \hat{E}^{t+i} + E_{ES}^t - E_{ES,HI} \right)}{X \times T}. \quad (6.6)$$

Na taj način, stanje napunjenosti skladišta energije u svitanje bi trebalo da bude $E_{ES,HI}$ i čvor bi trebalo da nastavi da radi u normalnom regionu. Međutim, pošto tehnike za predviđanje nisu idealne i može doći do grešaka, stanje napunjenosti skladišta energije između $E_{ES,LO}$ i $E_{ES,HI}$ je ostavljeno kao margina, da se ne bi u slučaju greške odmah prešlo u kritičan region.

6.2 Rezultati i diskusija

Algoritam za optimizaciju potrošnje i performansi testiran je u simuliranom okruženju kao i na laboratorijskom prototipu. U obe varijante kao bežični senzorski čvor korišćena je platforma



Slika 6.3: Ilustracija određivanja dostupne energije od sumraka do svitanja

zasnovana na CC430 sistemu na čipu koji je modelovan u radu [99]. CC430 sistem na čipu u sebi ima MSP430 procesorsko jezgro koje može da radi na učestanosti do 20 MHz i radio interfejs zasnovan na CC1101 koji radi na učestanosti od 868 MHz. Kao skladište energije korišćena je litijum-jonska baterija kapaciteta 100 mAh.

6.2.1 Simulacija

Solarno napajani bežični senzorski čvor modelovan je u simuliranom okruženju u cilju evaluiranja algoritma za optimizaciju potrošnje i performansi po pitanju postizanja energetske neutralnosti.

Parametri modelovanog solarno napajanog bežičnog senzorskog čvora dati su u tabeli 6.1.

Na osnovu rezultata simulacija u tabeli 6.2 prikazani su: srednja utilizacija senzorskog čvora $\bar{U}$, ukupno vreme provedeno u kritičnom regionu $\sum t_{em}$ i prosečna vrednost degradacije performansi aplikacije DEG .

Gledajući tabelu 6.2, tehnike ASEA i WCMA, kao i predložene tehnike za predviđanje WF-Fuzzy-Hybrid i WFET-Hybrid ne uvode sistem u kritični region, odnosno ne dovode do otkaza sistema. Od ove četiri tehnike, WCMA ima 1.2% manju srednju utilizaciju od ASEA i predloženih tehnika, koje i ostvaruju najveću utilizaciju od svih prikazanih tehnika. Kada se posmatra srednja degradacija, predložene tehnike dovode do najmanje degradacije. Takođe, tehnike koje predviđanje za naredni vremenski interval daju na osnovu odnosa merene i predviđene energije u prethodnom vremenskom intervalu dovode do 2-5 puta manje degradacije u odnosu na ostale tehnike.

Predviđena prikupljena energija i stanje napunjenosti skladišta energije za odabrane tehnike za predviđanje u različitim danima u toku godine dati su na slikama 6.4-6.6. Grafici predviđene i izmerene energije sa slika 6.4-6.6 ilustruju da predložene tehnike za predviđanje mogu da prate merene podatke prilično dobro.

6.2.2 Laboratorijski prototip

Za evaluaciju primenljivosti algoritma za optimizaciju potrošnje i performansi realizovan je laboratorijski prototip solarno napajanog bežičnog senzorskog čvora. Na slici 6.7 šematski je prikazana organizacija laboratorijskog prototipa. Korišćeni solarni panel je površine $6.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ i efikasnosti

Tabela 6.1: Vrednosti parametara simuliranog solarno napajanog bežičnog senzorskog čvora

parametar	vrednost
A	0.0033 m^2
η_{panel}	15%
η_{PS}	85%
$E_{ES,MAX}$	932 J
η_{SN}	95%
P_{ON}	60 mW
P_{OFF}	5 μ W
DC_{MAX}	70%
DC_{MIN}	0.01%
$E_{ES,HI}$	$0.2 \cdot E_{ES,MAX}$
$E_{ES,LO}$	$0.05 \cdot E_{ES,MAX}$
k	0.5
w_{proc}	0.3
FTS_{proc}	1

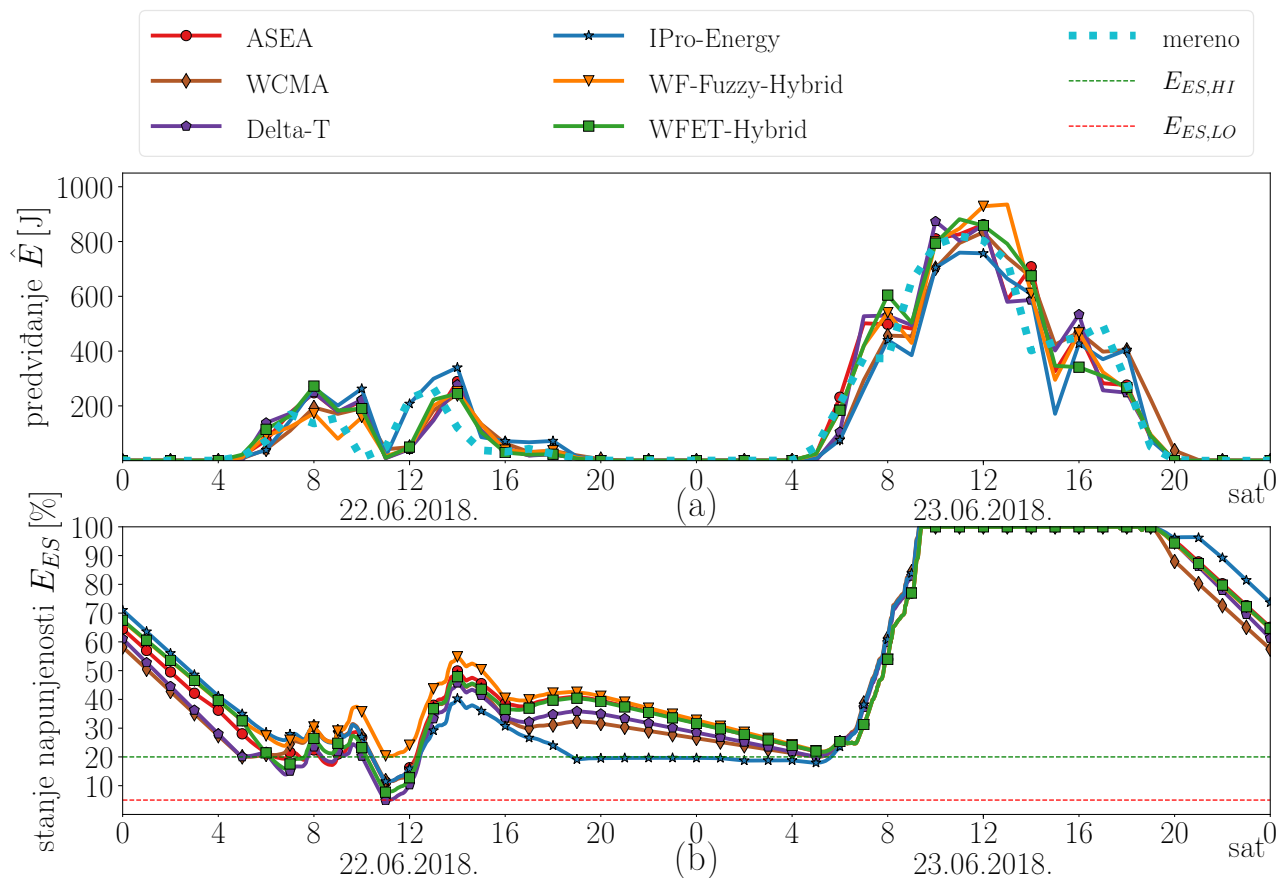
Tabela 6.2: Evaluacija performansi algoritma za optimizaciju potrošnje i performansi simuliranog senzorskog čvora za različite tehnike za predviđanje dostupne solarne energije u budućnosti

tehnika	$\bar{U}$ [%]	$\sum t_{em}$ [sati]	$\overline{DEG}$ [%]
EWMA [51]	36.30	537.16	4.82
ASEA [72]	36.27	0.00	0.90
WCMA [73]	35.80	0.00	0.96
Pro-Energy [75]	35.32	54.10	2.74
IPro-Energy [76]	34.39	34.30	2.71
Pro-Energy-T [77]	35.60	195.47	4.25
Delta-T [77]	36.02	1.50	1.19
Forecast-WCMA [86]	36.24	86.70	3.70
WF2LVL [89]	36.30	412.83	5.17
WF-Fuzzy-Hybrid [107]	36.30	0.00	0.88
WFET-Hybrid	36.27	0.00	0.84

do 15%. Nominalni napon panela je 6 V.

Merenje solarne energije koju daje solarni panel vrši se pomoću integrisanog kola INA219. Kolo INA219 omogućava merenje pada napona na šantu i napona na jednom kraju šanta. Na osnovu pada napona na šantu računa se struja, a množenjem izmerenim naponom može da se izračuna izmerena snaga. Pristup kolu moguć je putem I2C magistrale.

Kolo za punjenje litijum-jonske baterije koje se koristi je MCP73871. MCP73871 ima tri porta za protok energije: IN, na koji se vezuje izvor energije kojim se puni baterija, LOAD, na koji se vezuje



Slika 6.4: Poređenje tehnika za predviđanje dostupne energije u budućnosti za 22-23.06.2018. godine.

potrošač, i BAT, na koji se vezuje baterija koja se puni i napaja potrošač kada nema dovoljno energije na IN portu.

Panel je vezan direktno na port IN. Posledica toga je da se energija sa panela koristi samo kada je napon panela veći od 4.5 V. Odnosno, sve dok je napon na panelu manji od 4.5 V potrošač se napaja samo sa baterije. Takođe, kolo nema integrisan DC-DC konvertor, tako da je brzina punjenja baterije proporcionalna samo struji koju daje solarni panel, ne snazi. Prednost kola MCP73871 je što u toku rada omogućava da se potrošač na izlazu LOAD napaja direktno sa izvora energije ili iz baterije. Takođe, ima ugrađene zaštitne funkcionalnosti, gde se u slučaju temperaturnog problema ili prepražnjenosti baterije, isključuje potrošač i prestaje se sa pražnjenjem baterije.

Za praćenje stanja napunjenosti baterije koristi se integrisano kolo LTC4150. To je *coulomb counter* kolo koje na svakih 0.1707 mAh proteklih generiše prekid, a istovremeno je na posebnoj liniji moguće pratiti smer protoka naelektrisanja.

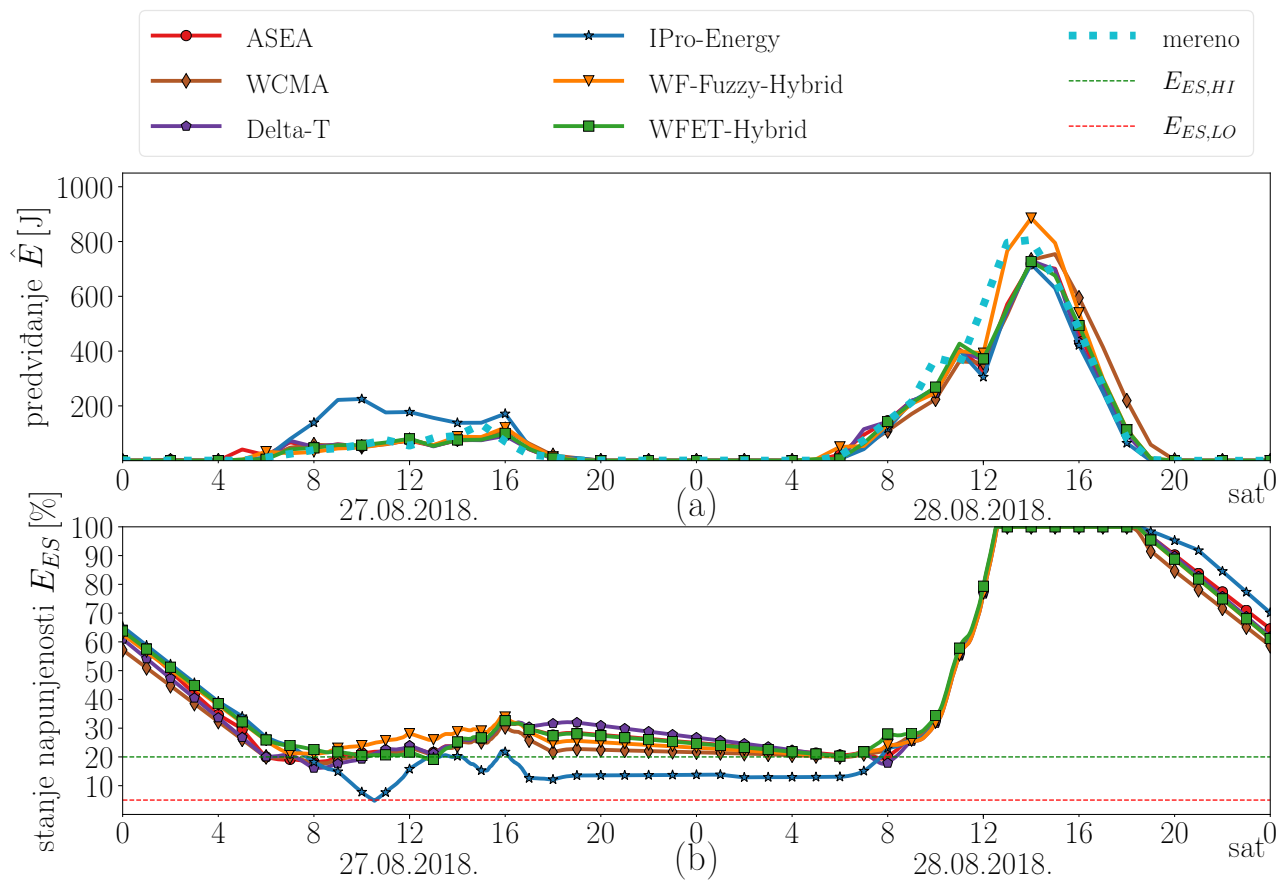
Kao potrošač i bežični senzorski čvor korišćen je MSP430-CCRF razvojni sistem [117] sa CC430 sistemom na čipu na kojem je implementirana aplikacija i algoritam za optimizaciju potrošnje i performansi. Razvojni sistem na sebi ima linearni regulator koji služi da spusti ulazni napon na 3.3 V kojima se napaja CC430 sistem na čipu.

Na slici 6.8 je fotografija realizovanog laboratorijskog prototipa. Realizovana su ukupno dva laboratorijska prototipa koja su postavljena na različitim lokacijama. Za oba prototipa biće prikazana merenja prikupljene energije i stanja napunjenosti energije za dane 15-16.05.2020. godine. Prvi dan je bio pretežno oblačan, dok je drugi dan bio sunčan.

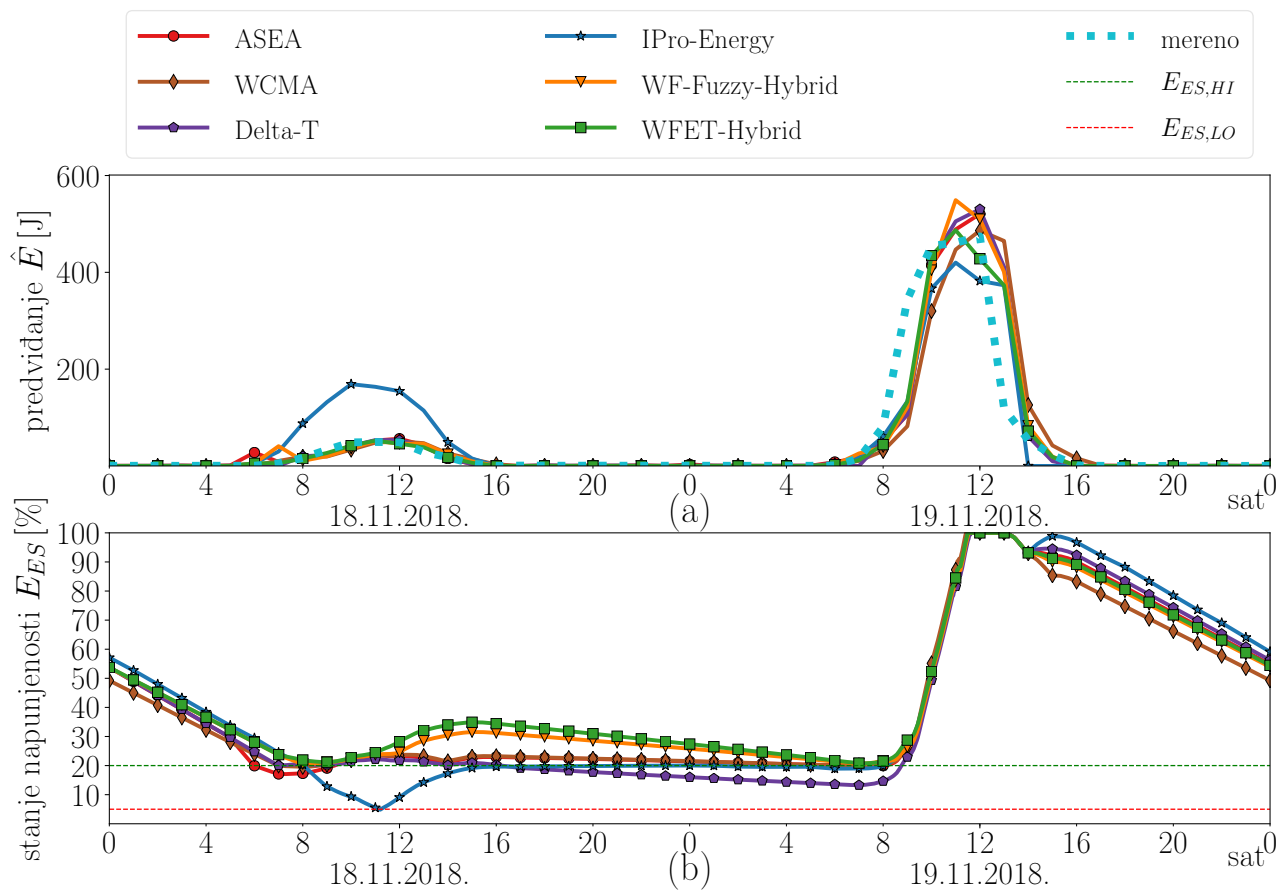
Lokacija 1 je prozor okrenut ka severoistoku. Na slici 6.9 prikazana je pozicija i izgled laboratorijskog prototipa postavljenog na lokaciji 1. Mereni podaci prikupljene energije i stanje napunjenosti

baterije za laboratorijski prototip postavljen na lokaciji 1 za dane 15-16.05.2020. godine prikazani su na slici 6.10. Prednost ove lokacije je što je u ranim jutarnjim časovima dostupna direktna komponenta sunčevog zračenja, što omogućava da skladište energije krene da se puni odmah po svitanju. Međutim, od podneva do kraja dana dostupna je samo difuzna komponenta sunčevog zračenja, usled čega skladište energije kreće da se prazni u popodnevni satima. Značajno pražnjenje traje samo u prvom intervalu kada intenzitet zračenja opadne, nakon toga algoritam na osnovu odnosa izmerene energije i predviđanja dostupne energije za taj period može da koriguje predviđanje i prilagodi operativnost senzorskog čvora.

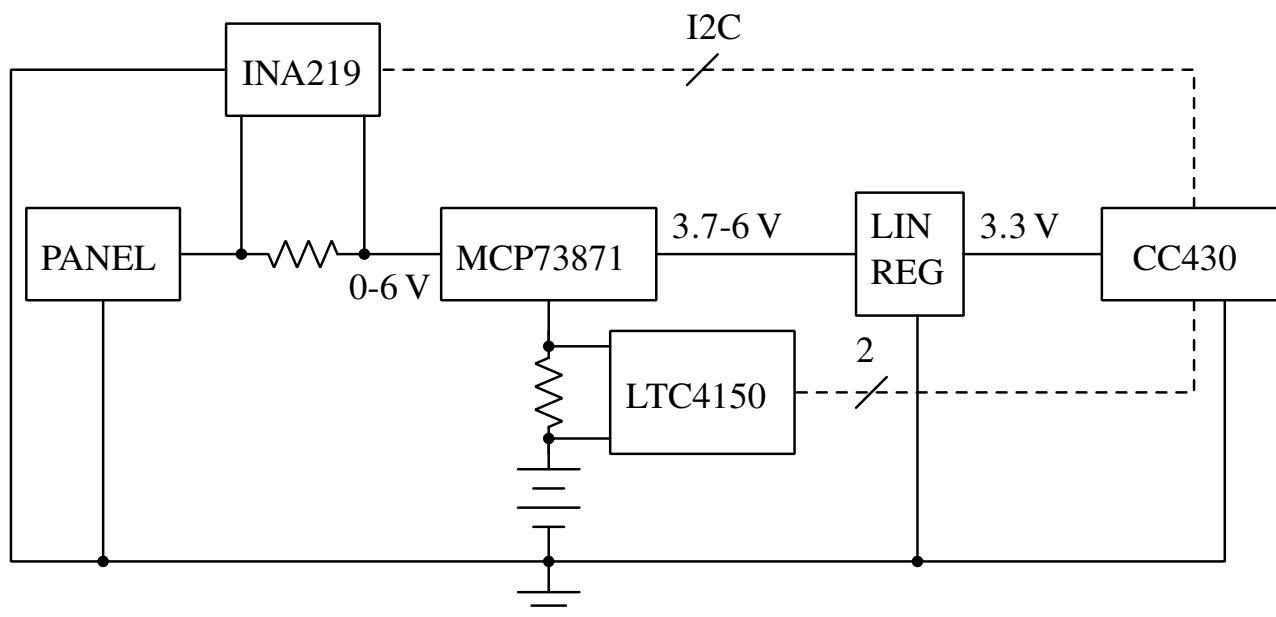
Lokacija 2 je prozor okrenut ka jugozapadu. Na slici 6.11 prikazana je pozicija i izgled laboratorijskog prototipa postavljenog na lokaciji 2. Mereni podaci prikupljene energije i stanje napunjenosti baterije za laboratorijski prototip postavljen na lokaciji 2 za dane 15-16.05.2020. godine prikazani su na slici 6.12. Nedostatak ove lokacije je što se u okolini nalazi nekoliko višespratnica koje stvaraju senku u toku dana.



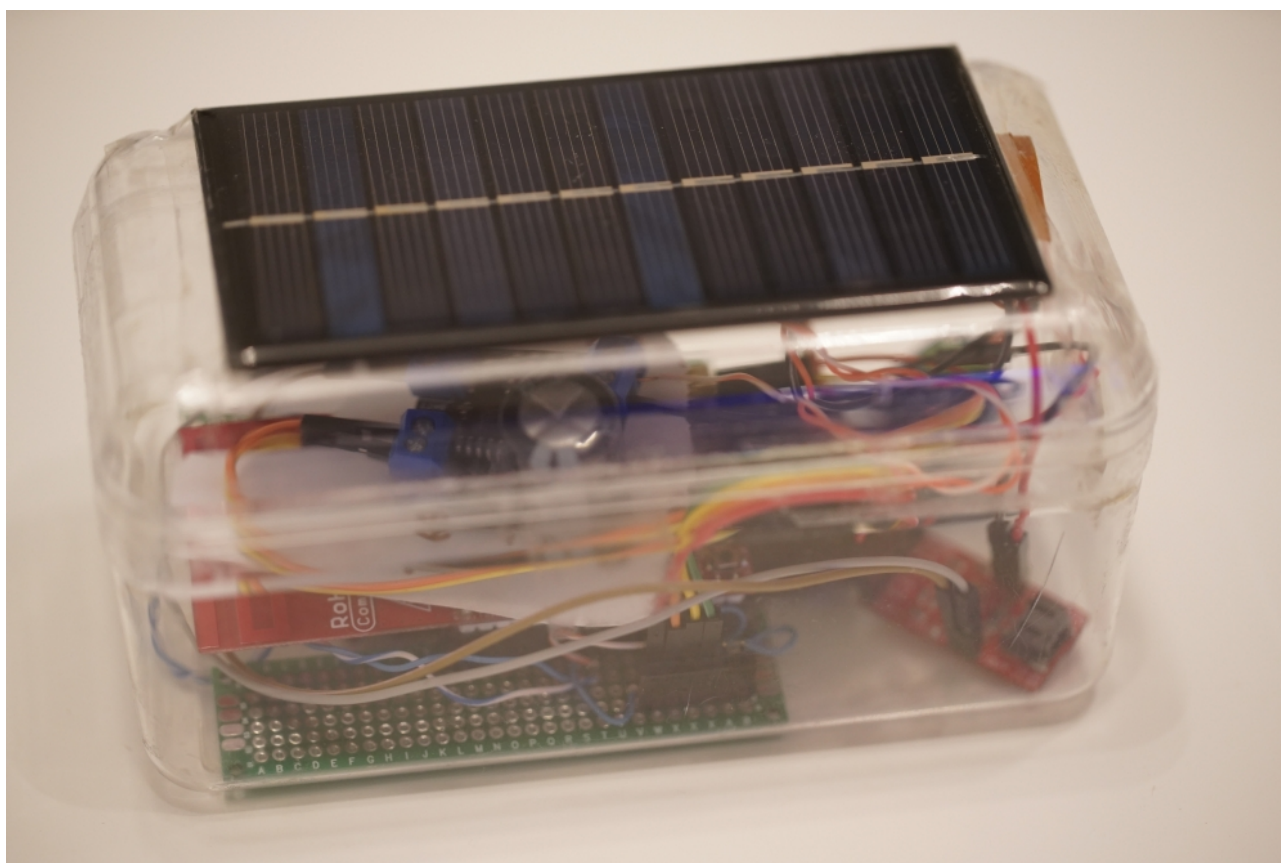
Slika 6.5: Poređenje tehnika za predviđanje dostupne energije u budućnosti za 27-28.08.2018. godine.



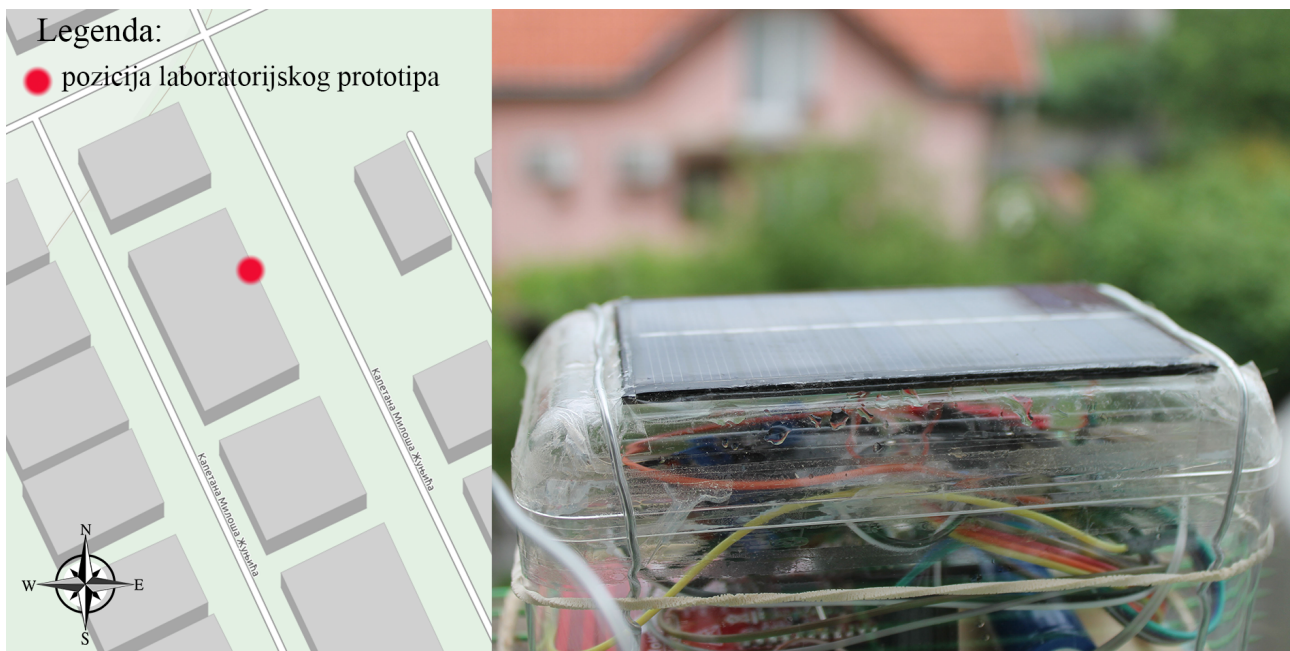
Slika 6.6: Poređenje tehnika za predviđanje dostupne energije u budućnosti za 18-19.11.2018. godine.



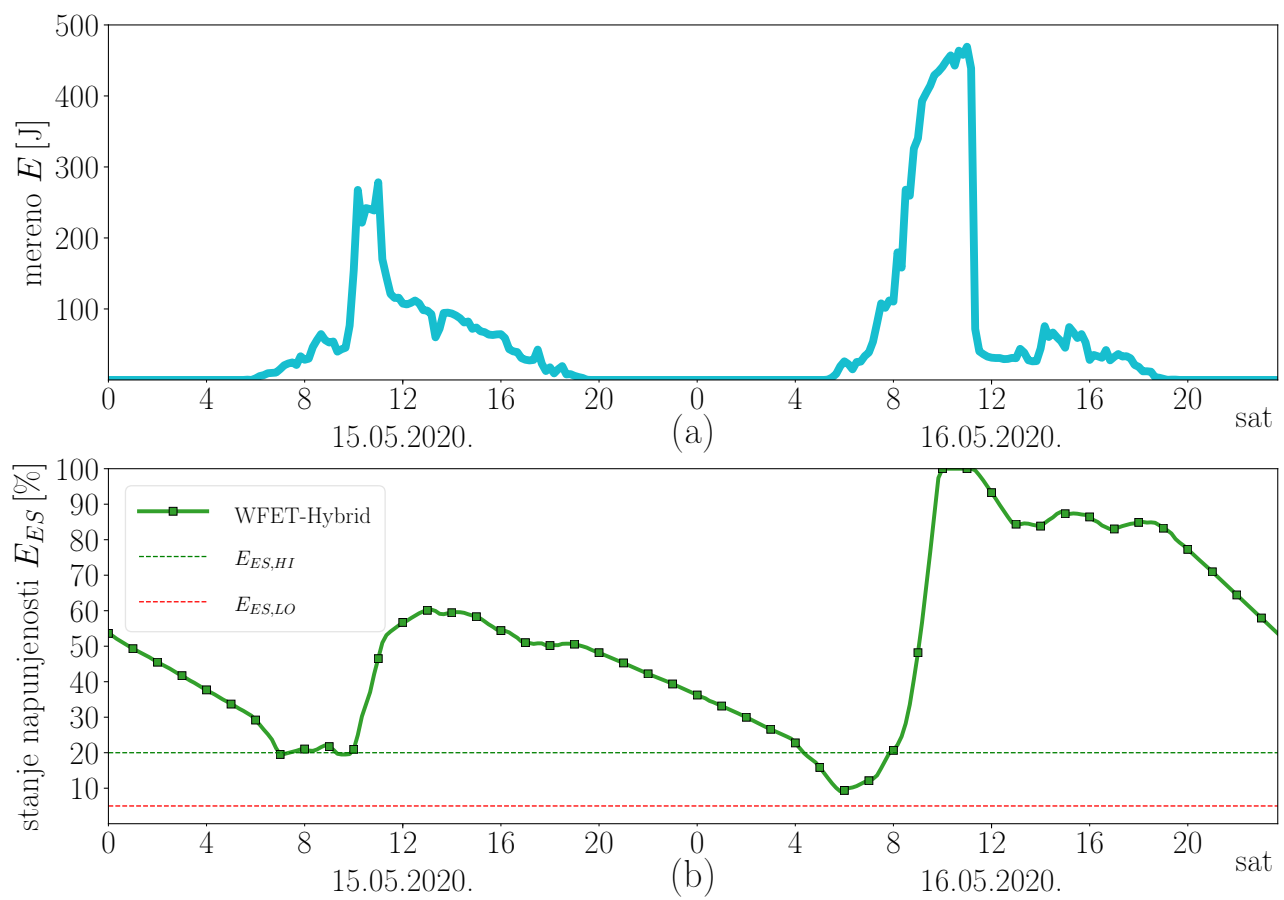
Slika 6.7: Šematski prikaz organizacije laboratorijskog prototipa.



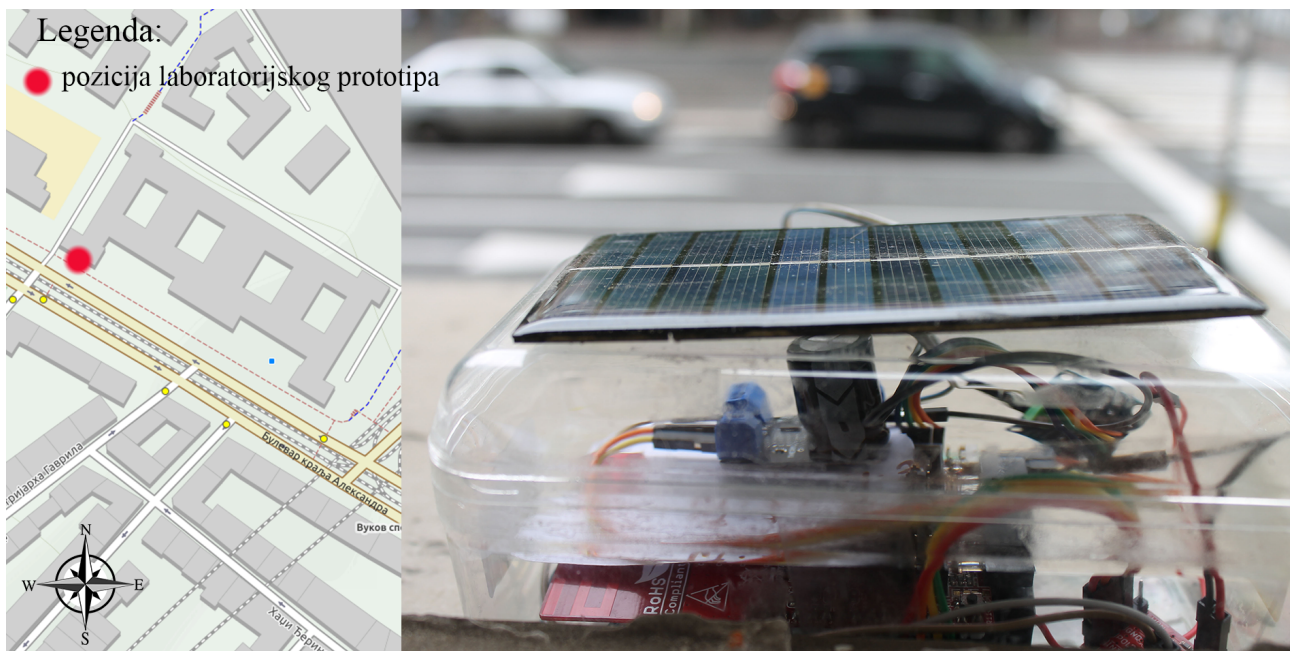
Slika 6.8: Fotografija laboratorijskog prototipa.



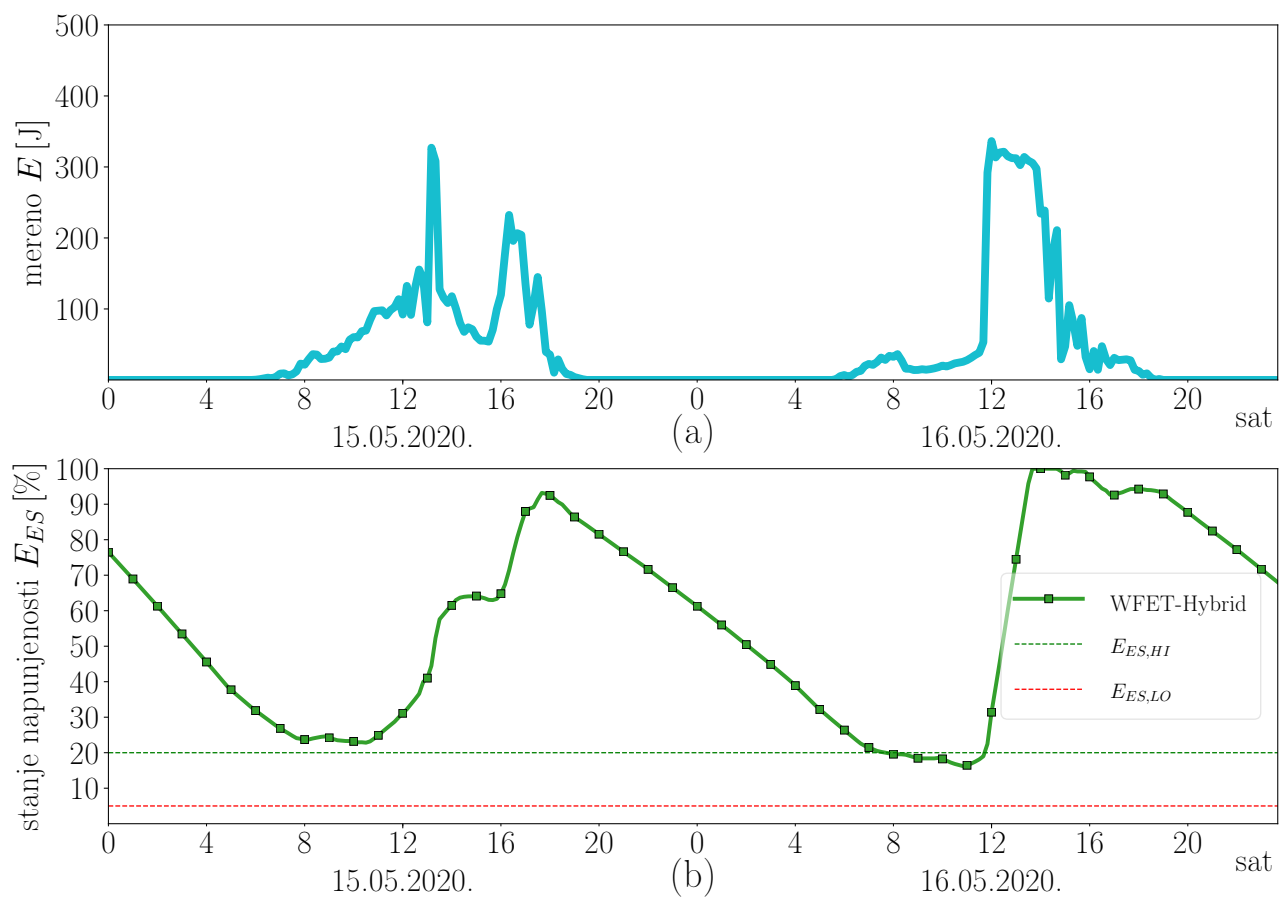
Slika 6.9: Pozicija i izgled laboratorijskog prototipa postavljenog na lokaciji 1.



Slika 6.10: Mereni podaci prikupljene energije i stanja napunjenosti baterije za laboratorijski prototip postavljen na lokaciji 1.



Slika 6.11: Pozicija i izgled laboratorijskog prototipa postavljenog na lokaciji 2.



Slika 6.12: Mereni podaci prikupljene energije i stanja napunjenosti baterije za laboratorijski prototip postavljen na lokaciji 2.

Glava 7

Zaključak

U ovoj disertaciji predložen je novi algoritam za optimizaciju potrošnje i performansi solarno napajanih bežičnih senzorskih čvorova koji obezbeđuje što veći stepen energetske neutralnog rada. Cilj energetske neutralnosti je da se postignu što veće performanse, pri čemu te performanse ne smeju da ugroze operativnost sistema. Da bi energetska neutralnost mogla da se postigne, algoritmu za optimizaciju potrošnje i performansi potrebni su podaci o trenutnom stanju baterije i podaci o energiji koja će biti dostupna u budućnosti, koje pružaju tehnike za predviđanje dostupne energije u budućnosti. Algoritam primenjuje tehnike za smanjenje potrošnje da bi postigao kompromis između potrošnje i performansi.

Postojeće tehnike za smanjenje potrošnje mogu da se podele u tehnike koje se primenjuju prilikom dizajna i tehnike koje se primenjuju u toku rada. Nedostatak postojećih tehnika za smanjenje potrošnje koje se primenjuju u toku rada jeste to što im je primena ograničena isključivo na opseg gde ne dolazi do degradacije performansi. To ograničenje je posledica nepostojanja objektivne metrike za degradaciju performansi.

U disertaciji je predstavljena nova metoda za opis degradacije performansi aplikacije za rad u realnom vremenu. Na osnovu metode svakom tasku može da se dodeli funkcija degradacije na osnovu vremenske kritičnosti taskova. Ukupna degradacija aplikacije je težinska suma degradacije svih taskova na sistemu, gde se koeficijenti određuju na osnovu definisanog kriterijuma. Kod prioritnog raspoređivanja, koeficijenti su srazmerni prioritetima taskova. Primenom metode za opis degradacije na tehniku skaliranja učestanosti i napona (DVFS) omogućava se proširenje potencijalnog opsega primene tehnike na opseg eDVFS, čime može da se postigne značajna ušteda energije, po cenu povećanja degradacije performansi.

Pored metode za opis degradacije, prikazana je i nova tehnika za smanjenje potrošnje - tehnika za kontrolu utilizacije. Tehnika uvodi novi task za kontrolu utilizacije koji ubacuje intervale neaktivnog procesiranja u skladu sa podešenim prioritetom i maksimalnim vremenom izvršavanja u određenom intervalu. Uloga taska za kontrolu utilizacije je da, u zavisnosti od podešavanja, uvede sistem u region preopterećenog rada. Na taj način se umesto taskova koji imaju prioritet manji od prioriteta taska za kontrolu utilizacije ubacuju intervale neaktivnog procesiranja, čime se štedi energija po cenu uvođenja degradacije performansi. Kvalitet predstavljene tehnike ogleda se u tome što se parametrima taska za kontrolu utilizacije proširuje skup parametara kojima se podešava radna tačka sistema, čime je omogućeno fino podešavanje odnosa između uštede energije i smanjenja degradacije. U poređenju sa eDVFS tehnikom moguće je postići manju potrošnju, manju degradaciju, ili i jedno i drugo.

Tehnike za predviđanje dostupne energije u budućnosti mogu da se podele na tehnike koje predviđanje za naredne intervale pružaju na osnovu merenih podataka iz prethodnih vremenskih intervala i tehnike koje koriste vremensku prognozu. Tehnike koje koriste merene podatke iz prethodnih intervala

su jednostavnije za implementaciju jer su merenja već dostupna, i mogu da daju kvalitetno kratkoročno predviđanje, tj. za nekoliko vremenskih intervala u budućnosti. Tehnike koje koriste vremensku prognozu imaju nedostatak jer podaci o vremenskoj prognozi moraju da se nabave na neki način, ali to može da se ublaži integrisanjem nabavljanja podataka u protokol za komunikaciju. Prednost tehnika zasnovanih na vremenskoj prognozi je što mogu da daju kvalitetno srednjeročno i dugoročno predviđanje.

U disertaciji su predložene dve nove tehnike za predviđanje dostupne energije u budućnosti, WF-Fuzzy-Hybrid i WFET-Hybrid. Obe tehnike koriste podatke vremenske prognoze koje koriguju na osnovu merenja iz prethodnih vremenskih intervala. Cilj je da se koriste prednosti obe klase tehnike i postigne kvalitetno i kratkoročno, srednjeročno i dugoročno predviđanje. Pored podataka o oblačnosti iz vremenske prognoze, koji koriste postojeće tehnike, predložene tehnike koriste i podatak o verovatnoći padavina. Tehnika WF-Fuzzy-Hybrid koristi fazi filter da bi umanjila greške prilikom izlaska sunca, i odnos merene i predviđene dostupne energije kako bi korigovala predviđanje za naredni vremenski interval. Tehnika WFET-Hybrid računa odnos između merene i izračunate energije za potpuno vedar dan i taj rezultat kombinuje sa podacima vremenske prognoze, tako da računanje na osnovu prethodnih vremenskih intervala ima veći uticaj za kratkoročno predviđanje, dok vremenska prognoza ima veći uticaj za srednjeročno i dugoročno predviđanje. Predložene tehnike su upoređene sa 9 odabranih postojećih tehnika u simuliranom okruženju. Korišćeni su mereni podaci za interval od godinu dana sa automatske merne stanice Košutnjak. Na osnovu rezultata, predložene tehnike su ispunile cilj i imaju najmanju srednju apsolutnu grešku predviđanja za kratkoročno, srednjeročno i dugoročno predviđanje. Tehnika WFET-Hybrid takođe ima najmanju srednju apsolutnu grešku predviđanja i srednju kvadratnu grešku za predviđanje za naredni vremenski interval, kao i kada se posmatraju greške po sunčanim satima u danu i mesecima u godini. Na osnovu rezultata može da se zaključi da tehnike koje koriste odnos merene i predviđene energije za prethodni vremenski interval daju najmanju grešku za naredni vremenski interval i u tom smeru treba nastaviti istraživanje. Takođe je pokazano da korišćenje verovatnoće padavina iz vremenske prognoze poboljšava rezultate tehnika zasnovanih na vremenskoj prognozi.

Na kraju je predložen novi algoritam za optimizaciju potrošnje i performansi koji integriše predloženu tehniku za smanjenje potrošnje i tehnike za predviđanje dostupne energije u budućnosti. Donošenje odluka je implementirano u vidu skupa pravila, gde se koriste podaci o stanju napunjenosti skladišta energije i predviđanje dostupne energije. Algoritam je testiran u simuliranom okruženju i na laboratorijskom prototipu. U simuliranom okruženju poređeno je korišćenje različitih tehnika za predviđanje dostupne energije. Rezultati pokazuju da korišćenjem predloženih tehnika za predviđanje mogu da se postignu najveće performanse, uz uzrokovanje najmanje degradacije performansi i obezbeđivanje energetski neutralnog rada. Za razliku od simuliranog okruženja, gde su posmatrani idealni uslovi gde nema senki, na rezultatima sa laboratorijskog prototipa primećuje se da postoje odlike tehnika i algoritma koje se mogu unaprediti. Konkretno, senka od okolnih objekata unosi greške u predviđanje, i u daljem istraživanju treba raditi na mogućnosti učenja o okolini i korišćenja tog saznanja radi unapređenja rada sistema.

Bibliografija

- [1] E. A. Lee, “Cyber physical systems: Design challenges,” in *2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, pp. 363–369, IEEE, May 2008.
- [2] I. Stojmenovic, “Machine-to-machine communications with in-network data aggregation, processing, and actuation for large-scale cyber-physical systems,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, pp. 122–128, Apr 2014.
- [3] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, “The internet of things: A survey,” *Computer Networks*, vol. 54, pp. 2787–2805, Oct 2010.
- [4] C. Bormann, A. P. Castellani, and Z. Shelby, “CoAP: An application protocol for billions of tiny internet nodes,” vol. 16, pp. 62–67, Mar 2012.
- [5] M. B. Yassein, M. Q. Shatnawi, S. Aljwarneh, and R. Al-Hatmi, “Internet of Things: Survey and open issues of MQTT protocol,” in *2017 International Conference on Engineering MIS (ICEMIS)*, pp. 1–6, May 2017.
- [6] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, and A. Passarella, “Energy conservation in wireless sensor networks: A survey,” *Ad Hoc Networks*, vol. 7, pp. 537–568, May 2009.
- [7] T. Arampatzis, J. Lygeros, and S. Manesis, “A survey of applications of wireless sensors and wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation Intelligent Control, 2005.*, pp. 719–724, June 2005.
- [8] S. Mansour, N. Nasser, L. Karim, and A. Ali, “Wireless sensor network-based air quality monitoring system,” in *2014 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, pp. 545–550, Feb 2014.
- [9] A. Mainwaring, D. Culler, J. Polastre, R. Szewczyk, and J. Anderson, “Wireless sensor networks for habitat monitoring,” in *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, WSNA ’02, pp. 88–97, Association for Computing Machinery, Sep 2002.
- [10] J. Burrell, T. Brooke, and R. Beckwith, “Vineyard computing: sensor networks in agricultural production,” *IEEE Pervasive Computing*, 2004.
- [11] C. Abreu and P. Mendes, “Wireless sensor networks for biomedical applications,” in *2013 IEEE 3rd Portuguese Meeting in Bioengineering (ENBENG)*, pp. 1–4, Feb 2013.
- [12] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey,” *Computer Networks*, vol. 38, pp. 393–422, Mar 2002.

- [13] A. Czubak and J. Wojtanowski, "On applications of wireless sensor networks," in *Internet – Technical Development and Applications* (E. Tkacz and A. Kapczynski, eds.), vol. 64, pp. 91–99, Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [14] R. Silva, J. Sa Silva, and F. Boavida, "Mobility in wireless sensor networks – survey and proposal," *Computer Communications*, vol. 52, pp. 1–20, Oct 2014.
- [15] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 10 pp. vol.2–, Jan 2000.
- [16] D. G. Reina, S. L. Toral, F. Barrero, N. Bessis, and E. Asimakopoulou, *The Role of Ad Hoc Networks in the Internet of Things: A Case Scenario for Smart Environments*, vol. 460, pp. 89–113. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [17] "Mpr/mib mote hardware user manual," user manual, Crossbow Technology, Inc., USA, 2005.
- [18] P. Sikka, P. Corke, L. Overs, P. Valencia, and T. Wark, "Fleck - a platform for real-world outdoor sensor networks," pp. 709–714, 01 2008.
- [19] J. Polastre, R. Szewczyk, and D. Culler, "Telos: enabling ultra-low power wireless research," in *IPSN 2005. Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2005.*, pp. 364–369, Apr 2005.
- [20] F. Simjee and P. H. Chou, "Everlast: Long-life, supercapacitor-operated wireless sensor node," in *ISLPED'06 Proceedings of the 2006 International Symposium on Low Power Electronics and Design*, pp. 197–202, Oct 2006.
- [21] M. Minami, T. Morito, and H. Morikawa, "Solar biscuit: A battery-less wireless sensor network system for environmental monitoring applications," in *In Proc. of the 2nd International Workshop on Networked Sensing Systems*, 2005.
- [22] A. Flammini, P. Ferrari, D. Marioli, E. Sisinni, and A. Taroni, "Wired and wireless sensor networks for industrial applications," *Microelectronics Journal*, vol. 40, pp. 1322–1336, Sep 2009.
- [23] M. K. Stojcev, M. R. Kosanovic, and L. R. Golubovic, "Power management and energy harvesting techniques for wireless sensor nodes," in *2009 9th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite, Cable, and Broadcasting Services*, pp. 65–72, IEEE, Oct 2009.
- [24] I. Choudhury, A. Hossain, and S. Bhuiyan, *Issues of Connectivity, Durability, and Reliability of Sensors and Their Applications*, pp. 121–148. Elsevier, 2014.
- [25] "Cisco annual internet report (2018–2023)," White Paper, CISCO, 2020. [Online] Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.pdf>.
- [26] L. G. Rios and J. A. I. Diguez, "Big data infrastructure for analyzing data generated by wireless sensor networks," in *2014 IEEE International Congress on Big Data*, pp. 816–823, Jun 2014.
- [27] M. Mohammadi, A. Al-Fuqaha, S. Sorour, and M. Guizani, "Deep learning for IoT big data and streaming analytics: A survey," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 20, no. 4, pp. 2923–2960, 2018.

- [28] M. Etinski, J. Corbalan, J. Labarta, and M. Valero, “Understanding the future of energy-performance trade-off via DVFS in HPC environments,” *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 72, pp. 579–590, Apr 2012.
- [29] O. A. G. Osorio, B. S. R. Dazai, and O. J. Salcedo, “Comparative study of performance for 804.15.4 zigbee and 6lowpan protocols,” in *SOFSEM (Student Research Forum Papers / Posters)* (R. M. Freivalds, G. Engels, B. Catania, R. Spánek, and M. Rimnac, eds.), vol. 1548 of *CEUR Workshop Proceedings*, pp. 59–71, CEUR-WS.org, 2016.
- [30] S. Mishra, N. K. Singh, and V. Rousseau, “Understanding power consumption fundamentals,” in *System on Chip Interfaces for Low Power Design*, pp. 13–27, Elsevier, 2016.
- [31] D. Flynn, R. Aitken, A. Gibbons, and K. Shi, *Low Power Methodology Manual: For System-on-Chip Design*. Integrated Circuits and Systems, Springer US, 2007.
- [32] B. Carlson and B. Giolma, “SmartReflex power and performance management technologies: reduced power consumption, optimized performance,” White Paper, Texas Instruments, 2008. [Online] Available: http://www.ti.com/pdfs/wtbu/smartreflex_whitepaper.pdf.
- [33] M. Bambagini, M. Marinoni, H. Aydin, and G. Buttazzo, “Energy-aware scheduling for real-time systems: A survey,” *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, vol. 15, pp. 1–34, Jan 2016.
- [34] S. Eyerman and L. Eeckhout, “Fine-grained DVFS using on-chip regulators,” *ACM Transactions on Architecture and Code Optimization (TACO)*, vol. 8, pp. 1:1–1:24, Feb 2011.
- [35] H. Aydin, R. Melhem, D. Mosse, and P. Mejia-Alvarez, “Power-aware scheduling for periodic real-time tasks,” *IEEE Transactions on Computers*, vol. 53, pp. 584–600, May 2004.
- [36] R. Xu, D. Mossé, and R. Melhem, “Minimizing expected energy consumption in real-time systems through dynamic voltage scaling,” *ACM Trans. Comput. Syst.*, vol. 25, Dec 2007.
- [37] S. Liu, Q. Qiu, and Q. Wu, “Energy aware dynamic voltage and frequency selection for real-time systems with energy harvesting,” in *Proceedings of the Conference on Design, Automation and Test in Europe*, DATE ’08, pp. 236–241, ACM, 2008.
- [38] H. Xu, R. Li, L. Zeng, K. Li, and C. Pan, “Energy-efficient scheduling with reliability guarantee in embedded real-time systems,” *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 18, pp. 137–148, 2018.
- [39] S. Liu, J. Lu, Q. Wu, and Q. Qiu, “Harvesting-aware power management for real-time systems with renewable energy,” *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 20, pp. 1473–1486, Aug 2012.
- [40] J. Lu, S. Liu, Q. Wu, and Q. Qiu, “Accurate modeling and prediction of energy availability in energy harvesting real-time embedded systems,” in *International Conference on Green Computing*, pp. 469–476, Aug 2010.
- [41] Y. Zhang and H. Li, “Energy aware mixed tasks scheduling in real-time systems,” *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 23, pp. 38–48, 2019.
- [42] L. Benini, A. Bogliolo, and G. De Micheli, “A survey of design techniques for system-level dynamic power management,” *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 8, pp. 299–316, Jun 2000.

- [43] W. Dargie, “Dynamic power management in wireless sensor networks: State-of-the-art,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, pp. 1518–1528, May 2012.
- [44] U. A. Khan and B. Rinner, “Online learning of timeout policies for dynamic power management,” *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.*, vol. 13, pp. 96:1–96:25, Mar 2014.
- [45] S. Mittal, “A survey of techniques for approximate computing,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 48, pp. 62:1–62:33, Mar 2016.
- [46] A. Agarwal, M. C. Rinard, S. Sidiroglou, S. Misailovic, and H. Hoffmann, “Using code perforation to improve performance, reduce energy consumption, and respond to failures,” 2009.
- [47] J. W. S. Liu, W.-K. Shih, K.-J. Lin, R. Bettati, and J.-Y. Chung, “Imprecise computations,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 82, pp. 83–94, Jan 1994.
- [48] G. R. Wiedenhof and A. A. Fröhlich, *Using Imprecise Computation Techniques for Power Management in Real-Time Embedded Systems*, pp. 121–130. Springer, Boston, MA, 2008.
- [49] S. Hua, G. Qu, and S. S. Bhattacharyya, “An energy reduction technique for multimedia application with tolerance to deadline misses,” in *Proceedings 2003. Design Automation Conference (IEEE Cat. No.03CH37451)*, pp. 131–136, Jun 2003.
- [50] A. Shye, B. Scholbrock, and G. Memik, “Into the wild: studying real user activity patterns to guide power optimizations for mobile architectures,” in *Proceedings of the 42Nd Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture, MICRO 42*, pp. 168–178, ACM Press, 2009.
- [51] A. Kansal, J. Hsu, S. Zahedi, and M. B. Srivastava, “Power management in energy harvesting sensor networks,” *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.*, vol. 6, Sep 2007.
- [52] H. Sharma, A. Haque, and Z. A. Jaffery, “Solar energy harvesting wireless sensor network nodes: A survey,” *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 10, p. 023704, Mar 2018.
- [53] Rekha and R. Garg, “Existing enabling technologies and solutions for energy management in iot,” in *Energy Conservation for IoT Devices* (M. Mittal, S. Tanwar, B. Agarwal, and L. M. Goyal, eds.), vol. 206, pp. 19–47, Springer Singapore, 2019.
- [54] F. Ait Aoudia, M. Gautier, M. Magno, O. Berder, and L. Benini, “Leveraging energy harvesting and wake-up receivers for long-term wireless sensor networks,” *Sensors*, vol. 18, p. 1578, May 2018.
- [55] G. Anastasi, M. Conti, and M. D. Francesco, “Extending the lifetime of wireless sensor networks through adaptive sleep,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 5, pp. 351–365, Aug 2009.
- [56] S. Kosunalp, “MAC protocols for energy harvesting wireless sensor networks: Survey,” *ETRI Journal*, vol. 37, no. 4, pp. 804–812, 2015.
- [57] H. H. R. Sherazi, L. A. Grieco, and G. Boggia, “A comprehensive review on energy harvesting mac protocols in wsns: Challenges and tradeoffs,” *Ad Hoc Networks*, vol. 71, pp. 117–134, Mar 2018.

- [58] P. Kaur, B. S. Sohi, and P. Singh, “Recent advances in mac protocols for the energy harvesting based wsn: A comprehensive review,” *Wireless Personal Communications*, vol. 104, pp. 423–440, Jan 2019.
- [59] S. Varshney and R. Kuma, “Variants of LEACH routing protocol in WSN: A comparative analysis,” in *2018 8th International Conference on Cloud Computing, Data Science Engineering (Confluence)*, pp. 199–204, Jan 2018.
- [60] I. Yoon, H. Kim, and D. Noh, “Adaptive data aggregation and compression to improve energy utilization in solar-powered wireless sensor networks,” *Sensors*, vol. 17, p. 1226, May 2017.
- [61] I. Yoon, J. M. Yi, S. Jeong, and D. K. Noh, “Adaptive sensing and compression rate selection scheme for energy-harvesting wireless sensor networks,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 13, p. 155014771771362, Jun 2017.
- [62] C. Alippi, G. Anastasi, M. Di Francesco, and M. Roveri, “Energy management in wireless sensor networks with energy-hungry sensors,” *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 12, pp. 16–23, Apr 2009.
- [63] F. K. Shaikh and S. Zeadally, “Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 1041–1054, Mar 2016.
- [64] N. Shenck and J. Paradiso, “Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics,” *IEEE Micro*, vol. 21, pp. 30–42, May 2001.
- [65] C. Dagdeviren, B. D. Yang, Y. Su, P. L. Tran, P. Joe, E. Anderson, J. Xia, V. Doraiswamy, B. Dehdashti, X. Feng, and et al., “Conformal piezoelectric energy harvesting and storage from motions of the heart, lung, and diaphragm,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111, pp. 1927–1932, Feb 2014.
- [66] H. J. Goldsmid, *The Physics of Thermoelectric Energy Conversion*. 2053-2571, Morgan & Claypool Publishers, 2017.
- [67] S. Sudevalayam and P. Kulkarni, “Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 13, no. 3, pp. 443–461, 2011.
- [68] M.-L. Ku, W. Li, Y. Chen, and K. J. Ray Liu, “Advances in energy harvesting communications: Past, present, and future challenges,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1384–1412, 2016.
- [69] N. Qi, K. Dai, F. Yi, X. Wang, Z. You, and J. Zhao, “An adaptive energy management strategy to extend battery lifetime of solar powered wireless sensor nodes,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 88289–88300, 2019.
- [70] C. Renner, S. Unterschütz, V. Turau, and K. Römer, “Perpetual data collection with energy-harvesting sensor networks,” *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 11, pp. 12:1–12:45, Sep 2014.
- [71] P. Saha, S. Dey, and M. Khanra, “Accurate estimation of state-of-charge of supercapacitor under uncertain leakage and open circuit voltage map,” *Journal of Power Sources*, vol. 434, p. 226696, Sep 2019.
- [72] D. K. Noh and K. Kang, “Balanced energy allocation scheme for a solar-powered sensor system and its effects on network-wide performance,” *Journal of Computer and System Sciences*, vol. 77, pp. 917–932, Sep 2011.

- [73] J. R. Piorno, C. Bergonzini, D. Atienza, and T. S. Rosing, "Prediction and management in energy harvested wireless sensor nodes," in *2009 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace Electronic Systems Technology*, pp. 6–10, May 2009.
- [74] C. Renner and V. Turau, "Adaptive energy-harvest profiling to enhance depletion-safe operation and efficient task scheduling," *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 2, pp. 43–56, Mar 2012.
- [75] A. Cammarano, C. Petrioli, and D. Spenza, "Pro-Energy: A novel energy prediction model for solar and wind energy-harvesting wireless sensor networks," in *2012 IEEE 9th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems (MASS 2012)*, pp. 75–83, Oct 2012.
- [76] Muhammad, H. K. Qureshi, U. Saleem, M. Saleem, A. Pitsillides, and M. Lestas, "Harvested energy prediction schemes for wireless sensor networks: Performance evaluation and enhancements," *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2017.
- [77] S. Draskovic, R. Ahmed, C. Lin, and L. Thiele, "A case for atmospheric transmittance: Solar energy prediction in wireless sensor nodes," in *2018 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*, pp. 427–434, Jul 2018.
- [78] M. Iqbal, *An introduction to solar radiation*. Academic Press, 1983.
- [79] A. Cammarano, C. Petrioli, and D. Spenza, "Online energy harvesting prediction in environmentally powered wireless sensor networks," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, pp. 6793–6804, Sep 2016.
- [80] C. Wooldridge and S. Hayman, "Cloud cover assessment grids for whole-sky images," *International Journal of Lighting Research and Technology*, vol. 26, no. 1, pp. 9–12, 1994.
- [81] N. Sharma, J. Gummeson, D. Irwin, and P. Shenoy, "Cloudy computing: Leveraging weather forecasts in energy harvesting sensor systems," in *2010 7th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, pp. 1–9, Jun 2010.
- [82] Y. Li, Z. Jia, and X. Li, "Task scheduling based on weather forecast in energy harvesting sensor systems," *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, pp. 3763–3765, Nov 2014.
- [83] Y. Li, J. Si, and S. Ma, "Using energy-aware scheduling weather forecast based harvesting for reconfigurable hardware," *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, pp. 109–117, 2018.
- [84] C. Renner, "Solar harvest prediction supported by cloud cover forecasts," in *Proceedings of the 1st International Workshop on Energy Neutral Sensing Systems, ENSSys '13*, pp. 1:1–1:6, ACM, 2013.
- [85] R. Reed, "An evaluation of cloud factors for estimating insolation over the ocean," tech. rep., NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-8, Pacific Marine Environmental Laboratory, Seattle, WA, USA, Sept 1976.
- [86] N. Sharma, J. Gummeson, D. Irwin, T. Zhu, and P. Shenoy, "Leveraging weather forecasts in renewable energy systems," *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 4, pp. 160–171, Sep 2014.

- [87] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*. Wiley, 2013.
- [88] M. P. d. S. Echer, F. R. Martins, R. T. d. Araujo, M. D. Á. Villaron, M. L. d. A. Pinto, and C. S. Corrêa, “Comparison of ground techniques used to estimate cloud cover in florianópolis, southern brazil,” *Revista Brasileira de Geofísica*, vol. 31, p. 85, Mar 2013.
- [89] S. Janković, D. El Mezeni, and L. Saranovac, “Improving energy usage in energy harvesting wireless sensor nodes using weather forecast,” *Telfor Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 38–43, 2018.
- [90] T. Huld, R. Müller, and A. Gambardella, “A new solar radiation database for estimating pv performance in europe and africa,” *Solar Energy*, vol. 86, pp. 1803–1815, Jun 2012.
- [91] N. Sharma, P. Sharma, D. Irwin, and P. Shenoy, “Predicting solar generation from weather forecasts using machine learning,” in *2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, pp. 528–533, Oct 2011.
- [92] J. Rodway and P. Musilek, “Harvesting-aware energy management for environmental monitoring wsn,” *Energies*, vol. 10, p. 607, May 2017.
- [93] F. A. Aoudia, M. Gautier, and O. Berder, “Fuzzy power management for energy harvesting wireless sensor nodes,” in *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–6, IEEE, May 2016.
- [94] C. Moser, L. Thiele, D. Brunelli, and L. Benini, “Adaptive power management for environmentally powered systems,” *IEEE Transactions on Computers*, vol. 59, pp. 478–491, Apr 2010.
- [95] K. Kwon, J. Yang, and Y. Yoo, “Adaptive control of the packet transmission period with solar energy harvesting prediction in wireless sensor networks,” *Sensors*, vol. 15, pp. 9741–9755, Apr 2015.
- [96] I. Popovic, S. Jankovic, and L. Saranovac, “Online power-aware scheduling strategy based on workload power profile measurement,” pp. 45–46, IEEE, May 2017.
- [97] S. Jankovic and V. Drndarevic, “Microcontroller power consumption measurement based on psoc,” *Telfor Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 44–49, 2016.
- [98] A. Pathak, Y. C. Hu, M. Zhang, P. Bahl, and Y.-M. Wang, “Fine-grained power modeling for smartphones using system call tracing,” in *Proceedings of the Sixth Conference on Computer Systems*, EuroSys ’11, pp. 153–168, ACM, 2011.
- [99] S. Jankovic and L. Saranovac, “High-level power modeling of CC430 SoC,” in *IcETRAN*, p. ELI3.2, Jun 2017.
- [100] ARM Ltd., “System control and management interface - platform design document – arm developer.” [Online] Available: <https://developer.arm.com/docs/den0056/a>.
- [101] S. Chakravarty and T. Rangarajan, “Arm scmi specification - evolution & road-map to support improvements in system & power management.” [Online] Available: <https://connect.linaro.org/resources/bkk19/bkk19-pm05/>.
- [102] Octavo Systems, “Osd335x lesson 2: Linux device tree.” [Online] Available: https://octavosystems.com/app_notes/osd335x-design-tutorial/osd335x-lesson-2-minimal-linux-boot/linux-device-tree/.

- [103] M. Simonovic, V. Zivojnovic, D. Mista, S. Jankovic, and L. Saranovac, "Energy proportional management of residential gateways," in *Telecommunications Forum (TELFOR)*, 2013 21st, pp. 636–639, Nov 2013.
- [104] L. Sha, T. Abdelzaher, K.-E. Årzén, A. Cervin, T. Baker, A. Burns, G. Buttazzo, M. Caccamo, J. Lehoczky, and A. K. Mok, "Real time scheduling theory: A historical perspective," *Real-Time Syst.*, vol. 28, pp. 101–155, Nov 2004.
- [105] C. L. Liu and J. W. Layland, "Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard-real-time environment," *J. ACM*, vol. 20, pp. 46–61, Jan 1973.
- [106] B. Moyer, "Low-power design for embedded processors," *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, pp. 1576–1587, Nov 2001.
- [107] S. Jankovic and L. Saranovac, "Prediction of harvested energy for wireless sensor node," *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 26, no. 1, pp. 23–31, 2020.
- [108] H. C. Hottel, "A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres," *Solar Energy*, vol. 18, no. 2, pp. 129–134, 1976.
- [109] B. Y. H. Liu and R. C. Jordan, "The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation," *Solar Energy*, vol. 4, pp. 1–19, Jul 1960.
- [110] C. Furlan and A. P. d. Oliveira, "Hourly diffuse solar radiation in the presence of clouds and other environmental parameters: the city of São Paulo," *Working Paper Series*, no. 17, pp. 1–15, 2008.
- [111] J. Rodway, P. Musilek, E. Lozowski, M. Prauzek, and J. Heckenbergerova, "Pressure-based prediction of harvestable energy for powering environmental monitoring systems," in *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, pp. 725–730, IEEE, Jun 2015.
- [112] Republic Hydrometeorological Service of Serbia, Meteorological station Beograd – Automatic weather station Košutnjak. [Online] Available: <http://hidmet.gov.rs/eng/osmotreni/kosutnjak.php>.
- [113] Dark Sky, "Powered By Dark Sky." [Online] Available: <https://darksky.net/poweredby>.
- [114] SimPy, "Discrete event simulation for python." [Online] Available: <https://simpy.readthedocs.io>.
- [115] skfuzzy, "Fuzzy logic toolbox for scipy." [Online] Available: <https://scikit-fuzzy.readthedocs.io>.
- [116] C. Tao, D. Shanxu, and C. Changsong, "Forecasting power output for grid-connected photovoltaic power system without using solar radiation measurement," in *The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, pp. 773–777, IEEE, Jun 2010.
- [117] Olimex Ltd., "Msp430-ccrf." [Online] Available: <https://www.olimex.com/Products/MSP430/Starter/MSP430-CCRF/>.

Biografija

Strahinja Janković je rođen 30.01.1988. godine u Ćupriji, Srbija. Osnovnu školu „Nada Popović“ i Gimnaziju završio je u Kruševcu, kao Vukovac i đak generacije. Kao učenik četvrte godine Gimnazije učestvovao je na 38. međunarodnoj olimpijadi iz fizike održanoj 2007. godine u Isfahanu, IR Iran.

Elektrotehnički fakultet u Beogradu upisao je 2007. godine. Diplomirao je na odseku za elektroniku 2011. godine sa ukupnom prosečnom ocenom 9.83 i ocenom 10 na završnom radu na temu „Implementacija Linux operativnog sistema na razvojnom okruženju EA3250“ pod mentorstvom profesora dr Lazara Saranovca. Diplomске akademske - master studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na modulu elektronika, upisao je u oktobru 2011. godine. Položio je sve ispite sa prosečnom ocenom 10 i odbranio master rad na temu „Upravljački programi i optimizacija potrošnje energije u mobilnim operativnim sistemima“ pod mentorstvom profesora dr Lazara Saranovca. Doktorske studije na modulu Elektronika započeo je 2012. godine. Položio je sve ispite sa prosečnom ocenom 10 i ispunio sve obaveze propisane studijskim programom sakupivši predviđenih 120 ESPB.

U jesenjem semestru školske 2010/11. i 2011/12. godine bio je angažovan kao student-demonstrator na Katedri za elektroniku. Od januara 2012. godine zaposlen je kao saradnik u nastavi, a od marta 2013. godine kao asistent na Katedri za elektroniku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. U zvanju asistenta bio je do marta 2019. godine kada je počeo da radi u svojstvu višeg laboratorijskog inženjera. Od marta 2016. godine do marta 2018. godine bio je angažovan kao sekretar Katedre za elektroniku.

Kao saradnik u nastavi, odnosno asistent, na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu učestvovao je u izvođenju računskih vežbi na predmetima: „Osnovi digitalne elektronike“ za odsek Elektronika, „Uvod u projektovanje VLSI sistema“, „Integrirani računarski sistemi“, „Sistemi u realnom vremenu“, „Praktikum iz softverskih alata u elektronici“, „Osnovi digitalne elektronike“ za odsek Računarska tehnika i informatika i „Namenski računarski sistemi“ za odsek Signali i sistemi na osnovnim studijama i „Digitalni VLSI sistemi“, „Integrirani višeprosesorski sistemi“ i „Projektovanje digitalnih sistema“ na master studijama.

Učesnik je projekta ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja „Razvoj i modelovanje energetski efikasnih, adaptivnih, višeprosesorskih i višesenzorskih elektronskih sistema male snage“. Učestvovao je na projektu za unapređenje obrazovanja „Programiranje hardverskih sistema i aplikacija“ i na komercijalnom istraživačkom međunarodnom projektu sa firmom SANS R&D LLC „Razvoj širokopojasnog modema i internet sviča“ od 2017-2018. godine.

Od 2007. godine učestvuje u radu seminara Primenjene fizike i elektronike u IS Petnica kao mlađi saradnik, odnosno stručni saradnik od 2011. godine, gde je radio sa učenicima srednjih škola na različitim istraživačkim projektima i držao nekoliko različitih predavanja. U toku 2010. i 2011. godine, kao član tima Strawberry Energy, učestvovao je u realizaciji uređaja Javni solarni punjač mobilnih telefona sa kojim su osvojeni: 1. mesto na takmičenju u okviru Nedelje održivog razvoja, održanom u Briselu u aprilu 2011. godine, u kategoriji proizvoda koji podstiču smanjenje javne potrošnje, nagrada grada Beograda za stvaralaštvo mladih 2010. godine i nagrada Inženjerske komore Srbije.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Страхиња Јанковић

Број индекса 5015/2012

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Енергетски неутрални соларно напајани бежични сензорски чворови

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Београду, 08.06.2020.

Потпис аутора



Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Страхиња Јанковић
Број индекса 5015/2012
Студијски програм Електроника
Наслов рада Енергетски неутрални соларно напајани бежични сензорски чворови
Ментор др Лазар Сарановац, редовни професор

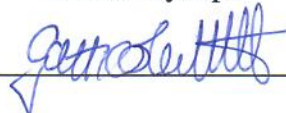
Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, 08.06.2020.

Потпис аутора



Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Енергетски неутрални соларно напајани бежични сензорски чворови

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

☒ 3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

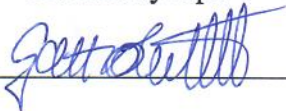
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

У Београду, 08.06.2020.

Потпис аутора



1. **Ауторство.** Дозвољаваје умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваје умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваје умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваје умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваје умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваје умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода