

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva

Lara Juričić, Dinko Oletić

**Energetski svjestan bežični osjetilni
čvor napajan energijom iz ambijenta**

Zagreb, 2010.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za elektroničke sustave i obradu informacija pod vodstvom prof. dr. sc. Vedrana Bilasa i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2009./2010.

Popis i objašnjenje kratica

BitCloud – programska realizacija protokola *ZigBee* proizvođača *Atmel*

BMO – bežična mreža osjetila (engl. kratica je *WSN*, *wireless sensor network*)

BSP – engl. *board support package* – programska podrška za periferne jedinice u okviru programskog *ZigBee* stoga *BitCloud*

CS – engl. *config server* – sučelje za mijenjanje postavki *ZigBee* mreže u programskom stogu *BitCloud*

DC/DC – istosmjerni izvor napajanja s prekidanjem struje

FPGA – engl. *field programmable gate array* – porodica integriranih krugova programirljivih nekim od jezika za opis sklopovlja

GPRS – engl. *general packet radio service* – protokol za paketni prijenos podataka mrežama za mobilnu telefoniju druge generacije

HAL – engl. *hardware abstraction layer* - programska podrška za ulazno-izlazna sučelja mikrokontrolera u okviru programskog *ZigBee* stoga *BitCloud*

MPPT – engl. *maximum power point tracker* – slijedilo točke maksimalne snage solarnog panela

RTC – engl. *real time clock* – sklop za mjerenje protoka stvarnog vremena

ZigBee – industrijski mrežni protokol za bežični prijenos podataka, zasnovan na specifikaciji IEEE 802.15.4, namijenjen primjeni u bežičnim mrežama osjetila

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Postojeća istraživanja na području prikupljanja energije iz ambijenta i upravljanja prikupljenom energijom	2
2	Opći i specifični ciljevi rada	4
3	Materijal i metode	5
3.1	Trenutna verzija sustava Maslinet.....	5
3.2	Bežični senzorski čvor FER Čvorak v2.0.....	6
3.2.1	Sklopovske mogućnosti upravljanja potrošnjom čvora FER Čvorak v2.0.....	6
3.2.2	Programske mogućnosti upravljanja potrošnjom.....	10
3.2.3	Mjerenje potrošnje krajnjeg čvora ZigBee mreže	12
3.3	Solarni izvor napajanja.....	15
3.3.1	Mjerenje efikasnosti sklopovlja napajanja.....	17
3.4	Algoritam upravljanja potrošnjom.....	21
3.4.1	Princip rada algoritma	21
4	Rezultati.....	26
4.1	Testiranje algoritma za krajnji čvor s mjernim pretvornicima.....	27
4.2	Testiranje algoritma za krajnji čvor s kamerom	28
5	Rasprava	32
6	Zaključci.....	33
7	Zahvale.....	34
8	Popis literature	35
9	Sažetak.....	37
10	Summary	38

1 Uvod

Bežične mreže osjetila (engl. *wireless sensor networks*) već su nekoliko godina veoma izazovno područje istraživanja. Kratki uvod u osnovnu problematiku bežičnih senzorskih mreža dan je u (1), a detaljni pregled područja dan je u (2).

Ovaj rad nastavlja se na istraživačke aktivnosti u sklopu projekta Maslinet. Projekt Maslinet je razvojno istraživački projekt koji se od 2007. godine provodi na Zavodu za elektrotehničke sustave i obradu informacija Fakulteta elektrotehnike i računarstva uz potporu Siemens. Cilj projekta je razviti multimodalnu bežičnu mrežu osjetila za primjenu u maslinarstvu. Namjena mreže je praćenje dvaju modaliteta:

1. vizualno praćenje broja maslinovih muha (štetnik koji ugrožava nasade masline)
2. praćenje mikroklimatskih parametara - temperature i mokrine tla, temperature, tlaka i relativne vlažnosti zraka te razine osvjetljenja

Važnost primjene ove mreže u poljoprivredi leži u uštedi koja se može postići prevencijom štete nastale maslinovom muhom. Korisnost ovakve mreže osjetila posebice dolazi do izražaja u maslinicima na zabačenim lokacijama teško dostupnim poljoprivrednim savjetodavnim službama. Ovakvim sustavom postavljenim na otocima omogućio bi se jeftini centralizirani nadzor nasada iz udaljene lokacije bez potrebe za obilascima pojedinačnih lokacija na terenu. Detalji projekta Maslinet dostupni su na mrežnim stranicama projekta (3). Projekt je također već opisan u (1).

Kontekst i specifikacije projekta postavljaju određene zahtjeve na bežičnu osjetilnu mrežu razvijenu za potrebe projekta Maslinet. Temeljni zahtjevi su:

- kontinuirani višegodišnji rad u uvjetima bez stalnog izvora napajanja (bez pristupa javnoj elektroenergetskoj infrastrukturi)
- smještaj mreže u prirodi podrazumijeva rad u ekstremnim uvjetima temperature i vlažnosti
- otpornost na pogreške u radu u smislu sposobnosti detekcije nepredviđenih situacija i oporavka bez potrebe za ljudskom interakcijom
- upravljanje i održavanje mreže s udaljene lokacije putem mogućnosti bežične nadogradnje mreže (engl. *over the air download*)

Energetska autonomnost i svjesnost o količini dostupne energije najvažniji su preduvjeti za dugotrajni rad ovakve mreže. Budući da radi na udaljenoj lokaciji, bežična mreža osjetila se napaja iz ambijenta. Stoga je fokus ovog rada usmjeren upravo na osiguranje energetske autonomnosti ugradnjom svijesti o dostupnoj energiji u čvorove senzorske mreže.

1.1 Postojeća istraživanja na području prikupljanja energije iz ambijenta i upravljanja prikupljenom energijom

Najčešće korišteni obnovljivi izvori energije koji se koriste za napajanje bežičnih osjetilnih čvorova su Sunčeve energija, energija vjetra i energija vibracija. Solarna energija je najprikladniji izbor u kontekstu projekta Maslinet. O karakteristikama solarnih ćelija i solarnih panela može se naći u (4). Prilikom dizajniranja sklopovlja solarnog napajanja bežičnog senzorskog čvora, zbog težnje da se dimenzije napajanja što je više moguće smanje, treba voditi računa o maloj i promjenjivoj raspoloživoj izlaznoj snazi panela. U tu svrhu treba koristiti slijedilo točke maksimalne snage (engl. *MPPT, maximum power point tracker*). To je sklopovlje koje radnu točku (izlazni napon i struju) solarnog panela postavlja u točku maksimalne snage. Pritom treba paziti da MPPT sklopovlje ima malu potrošnju. Korisna je i mogućnost mjerenja količine prikupljene energije, da se omogući daljnja optimizacija upravljanja prikupljenom energijom.

U (5) uspoređene su različite metode slijeđenja točke maksimalne snage. Navedene metode razlikuju se s obzirom na kompleksnost izvedbe, s obzirom na mjerne pretvornike koje izvedba zahtjeva, s obzirom na brzinu približavanja točki maksimalne snage uslijed promjene ozračenja i/ili temperature i s obzirom na trošak izvedbe. Radovi (6) i (7) daju primjere postojećih izvedbi napajanja bežičnih osjetilnih čvorova koje koriste slijedilo točke maksimalne snage. Napajanje senzorskog čvora predstavljenog u (6) koristi MPPT koji se temelji na metodi mjerenja napona praznog hoda solarnog panela. Treba napomenuti da se za napajanje iz (6) ne koristi samo solarna energija, već i energija vjetra. Za rad napajanja opisanog u (6) nije potrebna kontrola mikrokontrolera iz osjetilnog čvora. Važnost činjenice da za rad napajanja nije potrebno upravljanje od strane mikrokontrolera jest u tome da će čvor smjeti ući režim rada smanjene potrošnje tzv. *sleep mode*. Izvedba napajanja opisana u (7) koristi MPPT, ali se slijeđenje točke maksimalne snage upravlja od strane mikrokontrolera iz osjetilnog čvora. Ovakva realizacija napajanja posjeduje veliku fleksibilnost jer postoji mogućnost odabira različitih metoda za praćenje točke maksimalne snage. Posebno zanimljiva zbog jednostavnosti realizacije je izvedba slijedila točke maksimalne snage predstavljena u (8). Prema klasifikaciji metoda slijeđenja točke maksimalne snage u (5) ova realizacija slijedila točke maksimalne snage koristi metodu napona praznog hoda (engl. *Fractional Open-circuit Voltage*) za praćenje točke maksimalne snage. Cijela izvedba koristi samo analogno sklopovlje, a jedini senzor koji se koristi je pomoćna solarna ćelija.

Mogući su različiti pristupi upravljanju prikupljenom energijom. Na dizajn izvora napajanja bežičnog senzorskog čvora za projekt Maslinet najveći utjecaj imali su pristupi opisani u (9),

(10), (11) i (12). Solarno napajanje iz (9) sadrži dva spremnika energije - superkondenzator i akumulator. Algoritam upravljanja prikupljenom energijom definira da se energija koju daje solarni panel sprema u superkondenzator, a ako je on pun višak energije se pohranjuje u akumulator. Bežični senzorski čvor napaja se ovisno o naponu superkondenzatora ili iz superkondenzatora ili iz akumulatora. U (10), (11) i (12) ne razmatra se upravljanje tokom energije iz solarnog panela u različite spremnike, već se upravlja potrošnjom sklopovlja na način da se potrošnja poveća onda kada se količina prikupljene energije iz solarnog panela ili pohranjene energije povećava. Težnja je razviti algoritam upravljanja potrošnjom čvora koji će nastojati da ukupna energija prikupljena od strane solarnog panela i pohranjena u elementima za pohranu bude konstantna. Taj režim rada bežičnog senzorskog čvora naziva se energetske neutralnim (engl. *energy neutral operation*). U (13) dana je klasifikacija i pregled mogućih načina adaptivnog uzimanja uzoraka. Adaptivno uzimanje mjernih uzoraka koristi se kako bi se produžio životni vijek osjetilnih čvorova u slučaju kada čvor u budnom stanju ima značajnu potrošnju zbog velike potrošnje osjetila tijekom mjerenja i potrošnje radiokomunikacijskog sklopovlja tijekom slanja prikupljenih podataka.

2 Opći i specifični ciljevi rada

Svaki zadatak kojeg krajnji čvor obavlja karakterizira vrijeme potrebno da se zadatak izvrši i prosječna snaga potrebna za izvršavanje. Dakle, upravljanje potrošnjom krajnjeg čvora svodi se na upravljanje zadacima koje krajnji čvor obavlja. Cilj energetske učinkovitog upravljanja zadacima je podrediti vremenski raspored izvršavanja zadataka prema količini energije u sustavu.

U okviru ovog rada predstavljen je bežični osjetilni čvor FER Čvorak v2.0 i prijedlog njegovog napajanja. Cilj ovog rada je predstaviti energetske svjestan algoritam za upravljanje zadacima u stvarnom vremenu koji uz poznato sklopovlje opisanog bežičnog čvora i definiranu građu njegovog napajanja (solarni panel, MPPT sklopovlje, superkondenzator i pričuvni akumulator) prati količinu energije u sustavu i na temelju toga obavještava korisničku aplikaciju o trenucima pogodnim za obavljanje zadaća.

Na temelju testiranja algoritma cilj je provjeriti može li se algoritam u fazi razvoja napajanja bežičnog senzorskog čvora iskoristiti kao razvojno okruženje za određivanje parametara napajanja – površine panela, kapaciteta superkondenzatora i je li za navedeni scenarij potrebno MPPT sklopovlje.

Također, cilj je ispitati kako se nakon odabira optimalnih parametara napajanja algoritam ponaša u zadanim uvjetima uz scenarijem definiranu minimalnu i maksimalnu frekvenciju izvršavanja zadaća zadane energetske zahtjevnosti.

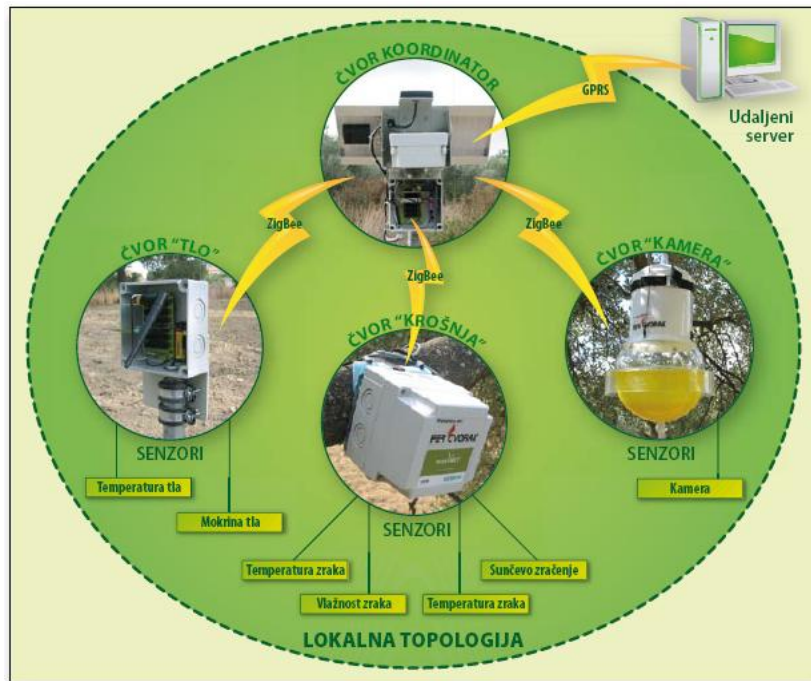
3 Materijal i metode

U nastavku je najprije kao referenca dan kratki prikaz trenutne funkcionalnosti cijelog sustava Maslinet. Nakon toga je fokus usmjeren na sklopovsku i programsku arhitekturu krajnjih čvorova ZigBee mreže te je opisan sustav napajanja krajnjeg čvora. Za potrebe izrade algoritma upravljanja potrošnjom izmjereni su potrošnja krajnjeg čvora i parametri sustava napajanja. Na kraju poglavlja je predložen sam algoritam upravljanja potrošnjom koji iskorištava opisane sklopovske, programske mogućnosti čvora i ograničenja sklopovlja napajanja u svrhu odabira trenutka izvršavanja energetski zahtjevnih zadataka na način da se optimalno iskoristi dostupna energija iz ambijenta.

3.1 Trenutna verzija sustava Maslinet

Stvarna bežična osjetilna mreža razvijena u sklopu projekta Maslinet namijenjena postavljanju na teren zvjezdaste je strukture. Sastoji se od triju osjetilnih čvorova i jednog koordinatorskog čvora. Jedan krajnji čvor mjeri mikroklimatske parametre tla, drugi čvor mjeri mikroklimatske parametre zraka i osvjetljenje, dok treći na sebi ima lovku za maslinove muhe i FPGA kamerom razvijenom za potrebe ovog projekta fotografira sadržaj lovke. Krajnji čvorovi većinu vremena provode u spavanju. Bude se periodički u fiksnim vremenskim intervalima i koordinatoru šalju servisni izvještaj – obavijest o naponu napajanja, snazi i kvaliteti radio-signala (RSSI i LQI), temperaturi u kućištu i trenutnoj verziji programske podrške. Mjerne podatke (uključujući sliku s kamere) u trenutnoj verziji mreže krajnji čvorovi šalju isključivo na zahtjev ZigBee koordinatora, koji taj zahtjev dobiva ili od krajnjeg korisnika ili generira samostalno u periodičkim vremenskim intervalima. Krajnji čvorovi napajaju se iz izvora napajanja opisanog u poglavlju 3.2. Krajnji senzorski čvorovi sa središnjim koordinatorskim čvorom komuniciraju ZigBee protokolom.

Koordinatorski čvor je centralni čvor ZigBee mreže. U trenutnoj verziji mreže Maslinet on je centralno mjesto donošenja odluka o vremenskom rasporedu prikupljanja podataka što je nedostatak jer povećava složenost i potrošnju koordinatorske programske podrške. Zbog specifikacije ZigBee protokola koordinatorski čvor mora biti uključen cijelo vrijeme (14). Prikupljene podatke prosljeđuje ugradbenom GPRS serveru koji omogućuje dvosmjernu povezivost ZigBee mreže sa udaljenim internetskim poslužiteljem koristeći GPRS protokol i široko dostupnu infrastrukturu GSM baznih stanica. ZigBee koordinatorski čvor i GPRS poslužitelj su ugrađeni u isto kućište i napajani iz zajedničkog solarnog izvora napajanja s MPPT sklopovljem koje nije predmet ovog rada. Krajnji korisnik mreže komunicira s bežičnom mrežom osjetila preko udaljenog internetskog poslužitelja. Struktura mreže opisana u ovom poglavlju prikazana je slikom 1.



Slika 1: Prikaz topologije bežične osjetilne mreže Maslinet

U nastavku slijedi opis sklopovlja i programske podrške bežičnog senzorskog čvora korištenog u mreži Maslinet za prikupljanje podataka na terenu. Naglasak će biti stavljen isključivo na dijelove neophodne za smanjenje potrošnje sustava i realizaciju energijski svjesnog algoritma za upravljanje potrošnjom. Ostali dijelovi sustava Maslinet su zanemareni.

3.2 Bežični senzorski čvor FER Čvorak v2.0

U sklopu projekta Maslinet dosad su razvijene dvije inačice bežičnih osjetilnih čvorova. Trenutno je u upotrebi druga inačica osjetilnog čvora nazvana FER Čvorak v2.0. Ovaj čvor razvijen je tijekom 2009. godine za potrebe nastavka rada na projektu Maslinet i postavljanje nove verzije mreže na teren tijekom 2010. godine.

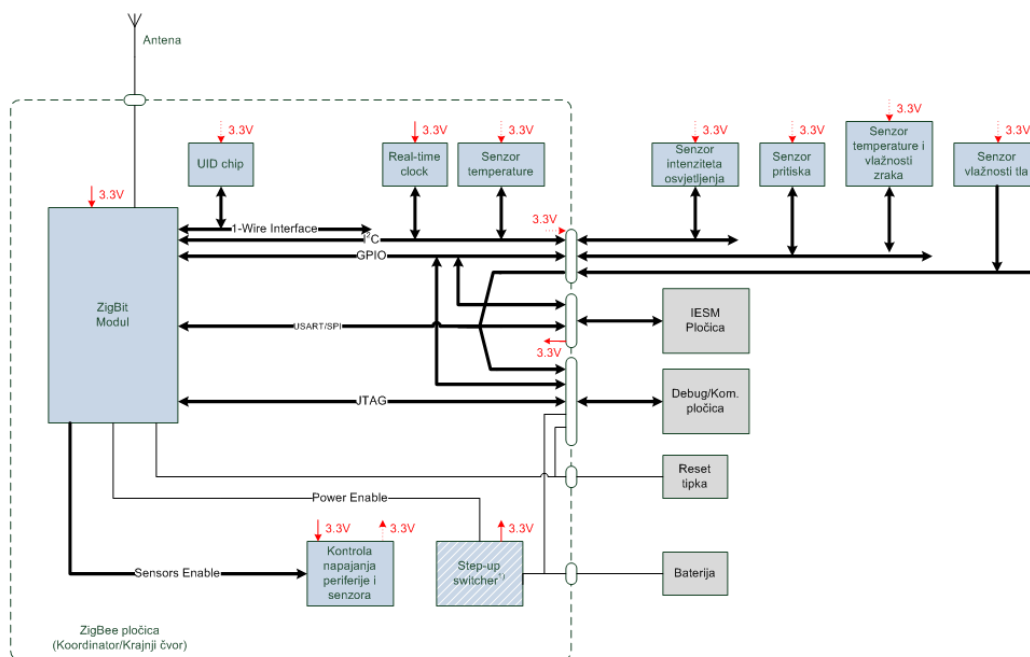
3.2.1 Sklopovske mogućnosti upravljanja potrošnjom čvora FER Čvorak v2.0

Kao temeljna komponenta oko koje je izgrađen bežični osjetilni čvor FER Čvorak v2.0 odabran je bežični komunikacijski modul ZigBit Amp proizvođača Atmel. Radi se o modulu izrađenom kao SiP (engl. *System in Package*) čije su glavne komponente mikrokontroler ATmega1281 i komunikacijski sklop komunikacijski sklop AT86RF230. ATmega1281 ima 128 kilobajta programske FLASH memorije i 8 kilobajta RAM memorije. Komunikacijski sklop AT86RF230 radi na frekvenciji 2,4 GHz i predviđen je za rad s IEEE 802.15.4/ZigBee mrežama. Karakteriziraju ga velika osjetljivost ulaznog pojačala prijemnika (-104 dBm) i velika snaga izlaznog pojačala predajnika (+20 dBm, što daje maksimalno dozvoljenih 100 mW izlazne snage u ISM području) (15).

Modul dolazi na kompaktnoj PCB pločici malih dimenzije (38.0 x 13.5 x 2.0 mm) namijenjenoj za površinsku montažu. Od ulazno-izlaznih sučelja, modul nudi 9 GPIO linija, 2 ulazne prekidne linije, 4 ADC linije, jednu zasebnu analognu liniju za praćenje napona napajanja, UART, USART, I2C, SPI i 1-Wire sučelje. Od toga se čak 30 linija može prenamijeniti u GPIO digitalne linije opće namjene (15).

Glavni razlozi za izbor ovog modula u odnosu na konkurentna rješenja bile su velika izlazna snaga odašiljača, mala potrošnja i veliki broj ulazno-izlaznih linija. Potrošnja u neaktivnom stanju iznosi do 6 μ A. U stanju bežičnog slanja podataka je deklarirana na 50 mA, a u primanju na 23 mA. Kasnije, u poglavlju 3.2.3 provjerene su navedene tvrdnje proizvođača (15).

FER2 Čvorak v2.0 je projektiran kao bežični čvor sastavljen od jedne univerzalne tiskane pločice koja može preuzeti ulogu bilo kojeg čvora lokalne ZigBee mreže. Blok shema čvora prikazana je slikom 2.



Slika 2: Blok shema osjetilnog čvora FER Čvorak v2.0

Na pločici su izvedena 3 konektora preko kojih se spaja periferija i koji time definiraju ulogu pločice u mreži:

- Sensorski konektor – namijenjen spajanju senzora na čvorovima za mjerenje mikrometeoroloških podataka
- Konektor za spajanje kamere

- Konektor za spajanje *Wavecom* GPRS mrežnog poslužitelja na koordinatorskom čvoru

Osim navedenih, na svim pločicama se nalazi i četvrti konektor za spajanje pomoćne pločice za testiranje i programiranje. Slikom 3 prikazana je tiskana pločica čvora prilikom testiranja senzora.



Slika 3: Tiskana pločica osjetilnog čvora ZigBit

Sve komponente na FER Čvorak v2.0 pločici birane su tako da im potrošnja bude čim manja. Osim ZigBit Amp modula, glavni izvori potrošnje energije na pločici su sljedeće komponente:

- RTC sklop DS1337 za mjerenje protoka stvarnog vremena. Sklop se konfigurira preko I²C sabirnice. Omogućava čitanje vremena i postavljanje dviju vrsta alarma: periodički alarm i pojedinačni alarm u predefinjano vrijeme. Na alarm, ovaj sklop generira prekid na liniji RTC_INT. RTC sklop koristi se u kasnije opisanom algoritmu upravljanja potrošnjom za očitavanje vremena i postavljanje vremena sljedećeg buđenja čvora. U aktivnom radu RTC troši 150 μ A, a u stanju čekanja (engl. *standby*) 1.5 μ A uz deklarirane struje curenja na ulazima i izlazima od najviše 1 μ A.
- Osjetilo temperature LM73 – digitalni senzor spojen na I²C sabirnicu koji služi mjerenju temperature na pločici. Kako će čvorovi na u prirodi biti hermetički zatvoreni u vodonepropusna kućišta i izloženi širokom rasponu temperatura, izmjerena temperatura u kućištu je veoma koristan dijagnostički podatak koji se mjeri i šalje koordinatoru svaki put kad se krajnji čvor probudi. Ovaj sklop se tretira kao senzor i gasi u spavanju pomoću signala SENS_EN. U radu komponenta troši najviše 495 μ A, a u spavanju 8 μ A

- Sklop DS2411R – služi za pohranu MAC adrese bežičnog čvora. Struja napajanja mu iznosi 100 μA , a struja u stanju čekanja (engl. *standby*) 1 μA .
- Analogne sklopke TS5A3159 – služe isključenju napajanja periferije kad se čvor nalazi u stanju spavanja. Struja napajanja iznosi im 0.1 μA , a najveće struje curenja na digitalnim ulaznim pinovima su reda veličine do 1 μA . Na pločici postoje 3 ovakve sklopke. Upravljanje su signalima sa ZigBit Amp modula. Njihove uloge su popisane u tablici 1:

Tablica 1: Analogne sklopke za gašenje periferije

Oznaka sklopke	Namjena	Upravljački signal s modula ZigBit Amp
U14	Isključivanje napona napajanja senzora.	SENS_EN
U16	Isključivanje napona napajanja kamere.	CAM_EN
U6	Dovođenje napona napajanja na ulaz A/D pretvornika na ZigBit Amp modulu.	SENS_EN

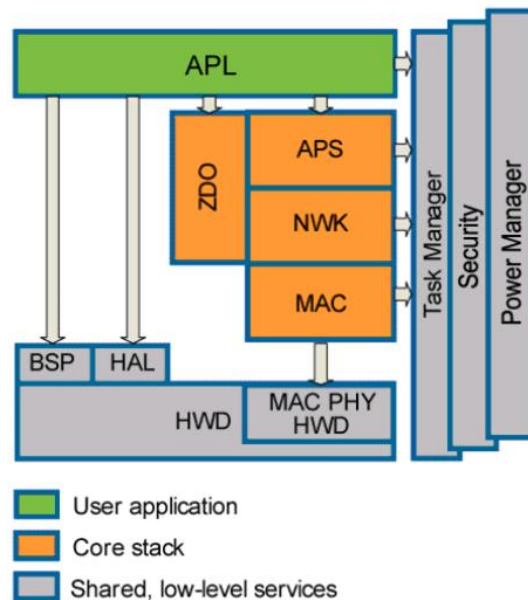
Osim potrošnje navedenih komponenti, u ukupnu potrošnju, posebice kod spavanja veoma je bitno uzeti još doprinos struja curenja na ulazima sklopova. Naime, premali iznos otpora otpornika kojim je ulaz pritegnut na napon napajanja može u konačnici uz veći broj paralelno spojenih priteznih otpornika uzrokovati disipaciju sumjerljivu disipaciji na komponentama u stanju smanjene potrošnje. Tipični iznosi struja curenja su reda veličine 1 μA .

Posebni podsustav na pločici čvora FER Čvorak v2.0 čine komponente napajanja. Glavna komponenta napajanja je *step-up* DC/DC pretvornik koji služi održavanju stabilnog napona napajanja od 3,3 V neovisno o priključenom naponu izvora koji se u periodima pražnjenja izvora smanjuje ispod 3,3 V. Korištena je komponenta L6920DC. Minimalnu ulazni napon mu je 0,8 V, a potrošnja mu iznosi 12 μA kad radi i 1 μA kad je isključen. DC/DC pretvornik se gasi ili automatski okidanjem praga komparacije sklopa LTC1540 ili ručno sa ZigBita postavljanjem signala PSU_EN u nisko stanje. Sklopke AP2280 služe otpajanju DC/DC pretvornika kad je napon izvora dovoljno velik za napajanje izravno iz izvora. Na sklopkama se troši oko 2 μA . Prag preklapanja sklopki i uključivanja/isključivanja pretvornika određuje komparator LTC1540. Ideja je da kad napon izvora padne ispod napona praga da se DC/DC pretvornik automatski uključi. Uz navedene iznose otpora, prag komparacije iznosi 2,636 V što je dovoljno za napajanje svih ključnih komponenata bez da DC/DC pretvornik radi. Komparator troši 0.6 μA . Korišteni logički NI-sklopovi troše 10 μA . Ukoliko je napon veći od 2,636 V, DC/DC pretvornik se svejedno može po potrebi uključiti dovođenjem visoke razine na izlaznu liniju ZigBita PSU_EN.

Za određivanje osvjetljenja solarnog panela korišten je digitalni senzor svjetline ISL29001. Podatak o osvjetljenju koristi se kao jedan od ulaznih parametara algoritma optimiranja potrošnje.

3.2.2 Programske mogućnosti upravljanja potrošnjom

Atmel je sklopovskoj platformi ZigBit Amp odredio ZigBee programski stog BitCloud. Struktura tog programskog stoga pokazana je slikom 4:



Slika 4: Organizacija slojeva programskog stoga *BitCloud* (16)

APL je aplikacijski sloj je namijenjen programskom kodu korisničke aplikacije. Od programera se zahtjeva strukturiranje vlastitog koda prema unaprijed zadanoj paradigmi programskog stoga BitCloud. Ta paradigma podrazumijeva događajima upravljani programski model (engl. *event driven programming*), strukturiranje korisničke aplikacije u obliku stroja s konačnim brojem stanja (engl. *statemachine*) korištenjem aplikacijskog upravitelja zadacima i izbjegavanje blokiranja ostatka programskog koda vodeći računa o duljini vremena izvršavanja korisničkog koda i korištenjem asinkronih poziva (korištenje *callback* funkcija). Naš algoritam upravljanja potrošnjom opisan u poglavlju 3.4 uklopljen je u takav kod korisničke aplikacije na aplikacijskom sloju (16).

BSP je kratica za *board support package*. BSP sloj služi kao veza sa sklopovljem izvan ZigBit modula (senzori, GPIO linije, tipke, LED diode itd.). BSP koji dolazi s originalnom verzijom BitClouda sadrži programsko sučelje za pristup sklopovlju na razvojnoj pločici MeshBean. Programski kod sloja BSP dostupan je korisniku. To omogućava pisanje upravljačkih funkcija/sučelja (engl. *driver*) za sklopove koje korisnik poželi izvana spojiti na ZigBit modul. Ukoliko se kod pisanja *drivera* slijede programska načela i struktura postojećih

BSP funkcija, moguće je osigurati jednostavnu nadogradivost postojećeg koda novom verzijom BitClouda bez izmjena na vlastitim BSP funkcijama.

Slijedeći tu paradigmu, za platformu FER Čvorak v2.0 su razvijena programska sučelja za pristup svim korištenim sensorima i vanjskim jedinicama korištenim u sklopu projekta Maslinet. Tako je razvijeno i programsko sučelje za rad s RTC sklopom DS1337. Ovo sučelje korišteno je u ovdje opisanom algoritmu za određivanje perioda buđenja. Pritom su korištene sljedeće funkcije iz zaglavlja *rtc.h*:

Tablica 2: Korištene BSP funkcije za pristup RTC sklopu korištenom u algoritmu optimiranja potrošnje

Naziv funkcije	Opis
<code>rtc_TimeGet()</code>	Dohvaća trenutno vrijeme iz RTC-a.
<code>rtc_AlarmSet()</code>	Postavlja vrijeme jednokratnog alarma.
<code>rtc_AlarmEnable()</code>	Pokreće odbrojavanje do jednokratnog alarma.
<code>rtc_TimerSet()</code>	Postavlja vrijeme periodičkog alarma.
<code>rtc_TimerEnable()</code>	Pokreće odbrojavanje do periodičkog alarma.

U gornjem popisu nisu navedeni formalni argumenti i povratne vrijednosti nabrojanih funkcija. Podrazumijeva se da su ove funkcije u duhu događajima upravljane BitCloud paradigme realizirane su kao asinkroni pozivi kojima su pridružene *callback* funkcije.

Programsko upravljanje potrošnjom svodi se na postavljanje krajnjeg čvora u neaktivno stanje (spavanje). U tom stanju mikrokontroler ostaje uključen ali radi u stanju smanjene potrošnje, dok se komunikacijski sklop potpuno gasi. Krajnji čvor se u stanje spavanja šalje postavljanjem asinkronog BitCloud zahtjeva *ZDO_SleepReq*. Nakon što se dobije odgovor preko *callback* funkcije *ZDO_SleepConf*, čvor odlazi na spavanje. Postoje dva načina buđenja iz stanja spavanja.

1. Buđenje nakon vremena određenog tzv. *Config Server* parametrom `CS_END_DEVICE_SLEEP_PERIOD`. Prilikom buđenja, čvor se javlja izvršavanjem *callback* funkcije *ZDO_wakeUpInd*
2. Buđenje na prekid – svaki registrirani prekid može probuditi krajnji čvor. Pritom jedino valja voditi računa o tome da su prekidi dio HAL (engl. *hardware abstraction layer*) sloja te da ostali slojevi BitClouda neće biti obaviješteni o buđenju. Zato je prilikom buđenja na prekid potrebno obavijestiti ostatak programskog stoga da se čvor probudio postavljanjem zahtjeva *ZDO_WakeUpReq* (16), (17).

Ovaj drugi način buđenja pomoću prekida korišten je u algoritmu upravljanja potrošnjom opisanom u poglavlju 3.4. Pomoću konstante CS_END_DEVICE_SLEEP_PERIOD namjesti se fiksni period buđenja koji odgovara maksimalnom periodu buđenja krajnjeg čvora. Nakon toga se period buđenja izračunat algoritmom, uvijek kraći od CS_END_DEVICE_SLEEP_PERIOD, zada RTC sklopu kao vremenski interval do uključivanja alarma. Čvor se pošalje na spavanje. RTC-ov alarm će izazvati prekid na liniji RTC_INT, što je indikator korisniku da je vrijeme za buđenje čvora pa se može pozvati funkcija *ZDO_WakeUpReq*.

Također, moguće je ostaviti mikrokontroler potpuno uključenim i ugasiti samo komunikacijski sklop. To može pomoći smanjiti potrošnju u aktivnom stanju. Komunikacijski sklop se zasebno može isključiti postavljanjem CS parametra CS_AUTO_POLL na *false*.

Potrošnja se programski može pokušati smanjiti i smanjenjem snage odašiljača. Snaga odašiljača može se namještati CS parametrom CS_RF_TX_POWER, no ta mogućnost nije iskorištena u ovom radu.

3.2.3 Mjerenje potrošnje krajnjeg čvora ZigBee mreže

3.2.3.1 Opis mjernih metoda

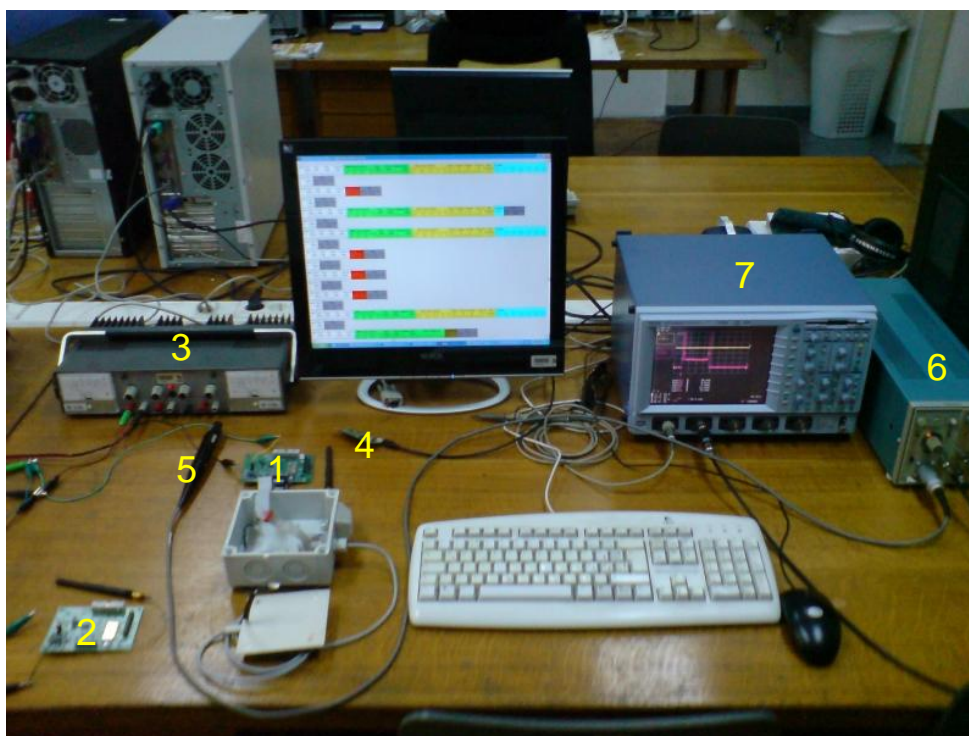
Algoritam upravljanja potrošnjom (rasporedom zadataka) opisan u poglavlju 3.4. za svoj rad treba podatke o potrošnji krajnjeg osjetilnog čvora FER Čvorak v2.0 u karakterističnim režimima rada:

1. spavanje
2. slanje servisnog izvještaja
3. slanje mjernih podataka

Algoritam uzima srednju snagu i trajanje ovih režima i njihovim množenjem dobiva ukupnu energiju koju je potrebno utrošiti za obavljanje pojedine zadaće. Iz tog razloga bilo je potrebno izmjeriti napon i struju napajanja u svakom trenutku trajanja željenog stanja (režima rada). Množenjem prikupljenih uzoraka napona i struje dobiven je valni oblik trenutne snage. Izmjereno je i trajanje željenih režima (slanje servisnog izvještaja, slanje mjernih podataka). Usrednjavanjem trenutnih snaga na intervalu trajanja željenog režima rada dobivena je srednja snaga koja se koristi u algoritmu. Množenjem srednje snage s trajanjem režima dobiva se ukupna potrošena energija.

Za potrebe mjerenja korišten je smanjeni laboratorijski postav osjetilne mreže koji se sastoji samo od jednog krajnjeg senzorskog čvora na kojem se mjeri trenutna snaga (tj. napon i struja napajanja) i jednog koordinatorskog čvora neophodnog za funkcioniranje bežične ZigBee mreže. Oba bežična čvora napajana su naponom 3,30 V iz laboratorijskog izvora

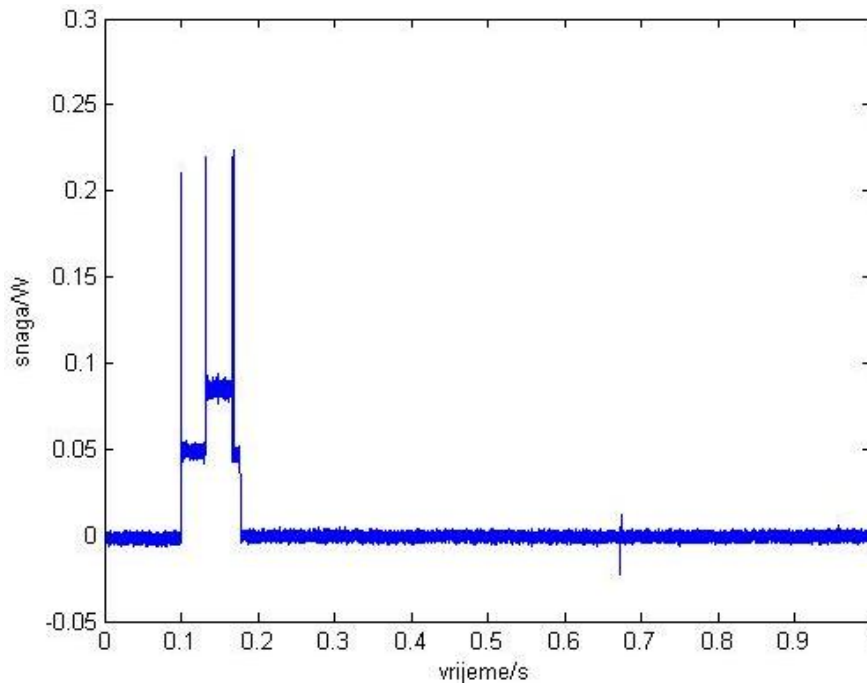
napajanja. Napon napajanja mjereno je naponskom sondom spojenom na prvi kanal digitalnog osciloskopa LeCroy Waverunner LT584. Struja kroz vod napajanja mjerena je strujnom sondom Tektronix A6802. Njen izlaz spojen je na pojačalo strujne sonde AM 503 10. Izlaz pojačala strujne sonde doveden je na drugi kanal osciloskopa LT584. Osjetljivost tog kanala podešena je na 10,0 mV/div kako je određeno na pojačalu strujne sonde. Prilikom mjerenja korišten je mrežni analizator ZENA za praćenje mrežnog prometa u svrhu kontrole radi li mreža kako je zamišljeno i praćenja u kojem se režimu (stanju) čvor trenutno nalazi. Slikom 5 prikazan je laboratorijski postav opisan u ovom poglavlju, korišten za mjerenja čiji su rezultati dani u poglavlju 3.2.3.2.



Slika 5: Laboratorijski postav za mjerenje potrošnje krajnjeg osjetilnog čvora: 1 – krajnji čvor s priključenim sensorima, 2 – koordinatorski čvor, 3 – izvor napajanja, 4 – analizator mrežnog prometa ZENA, 5 – strujna sonda AM 503 10, 6 – pojačalo strujne sonde Tektronix A6802, 7 – digitalni osciloskop LeCroy LT584

3.2.3.2 Rezultati mjerenja potrošnje krajnjeg čvora

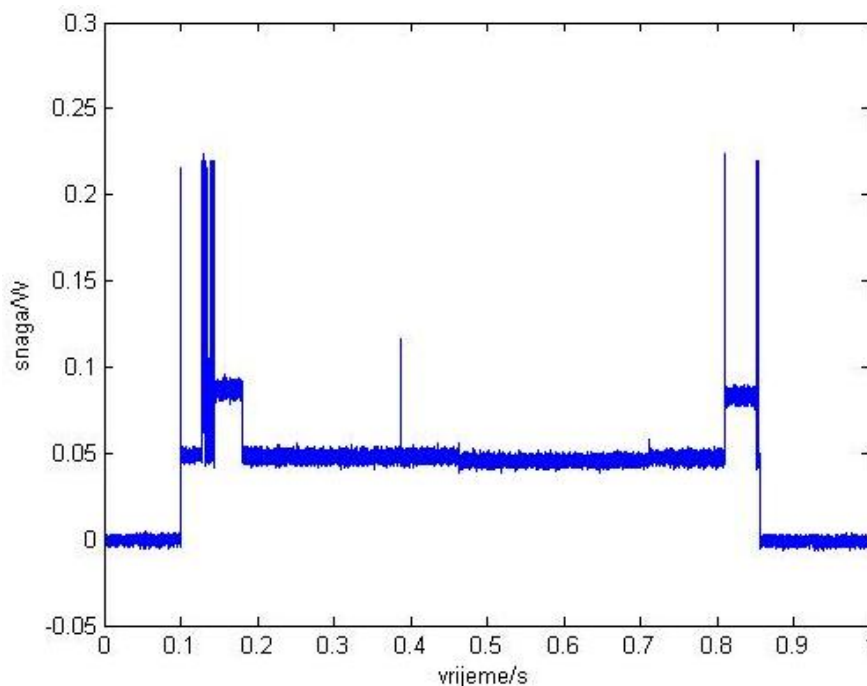
Izmjerena je potrošnja krajnjeg čvora pri slanju servisnog izvještaja. Radi se vremenski kratkoj zadaći niske potrošnje energije koja se izvršava kad je krajnji čvor u aktivnom stanju. Vremenska baza osciloskopa podešena je na 100 ms/div. Uz razlučivost 50 kS/s, i snimanje 50000 uzoraka, snimljena je sekvenca u trajanju 1,0 s. Razmak između uzoraka je bio, dakle, 20 μ s/uzorku. Dobiveni rezultat prikazan je slikom 6:



Slika 6: Izmjeren valni oblik snage tijekom sekvence slanja servisnog izvještaja

Na temelju izmjerenih rezultata dobivena je srednja snaga slanja servisnog izvještaja od **0,081 W** i trajanje **0.077 s** što daje energiju od $6.2335 \cdot 10^{-3}$ J za izvršavanje zadatke.

Na slici 7 prikazani su valni oblici dobiveni snimanjem sekvence akvizicije i bežičnog prijenosa podataka izmjerenih pomoću senzora. Mjerenje je bilo provedeno uz iste postavke mjerne opreme.



Slika 7: Izmjereni valni oblik trenutne snage tijekom sekvence slanja senzorskih podataka

Kod slanja senzorskih podataka dobivena je srednja snaga od **0,064 W** i trajanje **0.7557 s** što daje energiju od $4.8349 \cdot 10^{-2}$ J za izvršavanje zadaće.

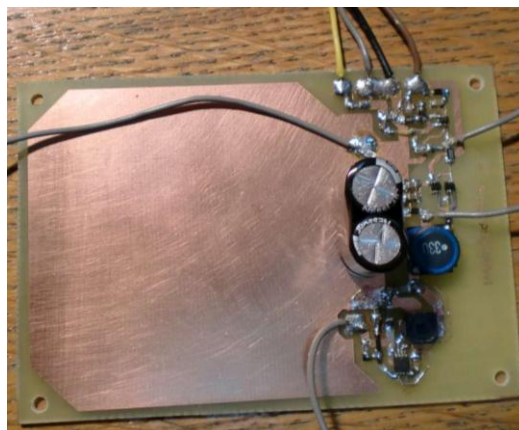
Srednja snaga u stanju spavanja zbog problema sa sklopovljem čvora FER Čvorak v2.0 nije izmjerena, već je procijenjena na **250 μ W**. Također, zbog nedovršenosti sklopovlja kamere koje će se koristiti s trenutnom verzijom osjetilnih čvorova FER Čvorak v2.0, uzeto je da je srednja snaga tijekom akvizicije slike (zadaće visoke energetske zahtjevnosti) **0.35 W** (1) i da prikupljanje i slanje slike prosječne veličine traje **77 s**.

3.3 Solarni izvor napajanja

Prema uzoru na izvedbu MPPT sklopa u (8) dizajnirano je slijedilo točke maksimalne snage za potrebe projekta Maslinet. Prilikom dizajniranja slijedila točke maksimalne opisanog u (8) iskoristene su upute za poboljšanje učinkovitosti MPPT-a dane u (18). Predložena realizacija slijedila točke maksimalne snage koristi metodu napona praznog hoda koja se temelji na činjenici da neovisno o temperaturi i ozračenju solarnog panela postoji približno linearna veza između napona solarne ćelije u točki maksimalne snage U_{MPP} i napona praznog hoda sunčane ćelije U_{OC}

$$U_{MPP} \approx k \cdot U_{OC}, \quad (1)$$

gdje se k kreće u rasponu od 0,71 do 0,78, a određuje se eksperimentno na temelju karakteristike solarnog panela. Problem ove metode je mjerenje napona praznog hoda U_{OC} . Prilikom mjerenja napona U_{OC} bilo bi potrebno odspojiti solarni panel od mreže kojoj služi kao napajanje. To se izbjegava korištenjem pomoćne ćelije sličnih karakteristika za mjerenje U_{OC} . Budući da je U_{MPP} izračunat aproksimacijom, ne mora značiti da je to napon točke maksimalne snage solarnog panela. Prednosti ove metode su jeftina i jednostavna izvedba jer nije potreban dodatni mjerni pretvornik struje ili napona, a ni mikrokontroler. Na slici 8 prikazana je sklopovska realizacije slijedila točke maksimalne snage.



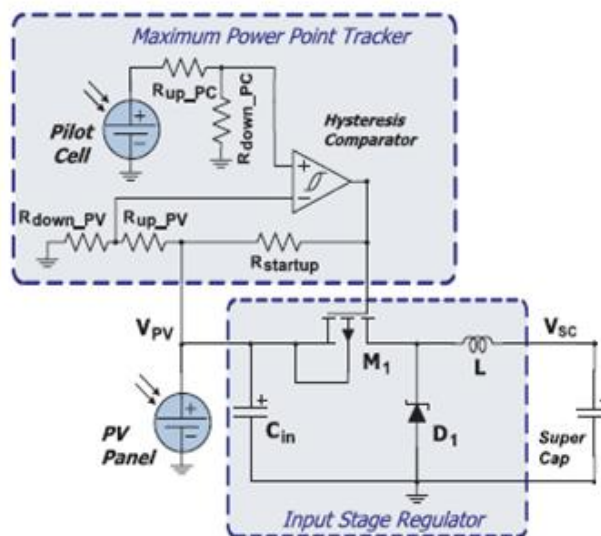
Slika 8: Razvojna verzija tiskane pločice slijedila točke maksimalne snage (MPPT)

Za solarno napajanje krajnjeg čvora korišteni su solarni panel SOLAREX 0,5W (10 cm x 5 cm), superkondenzator Nesscap 2,5 F (5,4 V) i pomoćna ćelija IXOLAR X0B17-04x3 (slika 9).



Slika 9: Korišteni solarni panel s pomoćnom solarnom ćelijom. Ispod panela prikazan je superkondenzator

Pomoćna sunčana ćelije ugrađena je u okvir solarnog panela kako bi uvjeti ozračenja sunčane ćelije bili čim sličniji onima od solarnog panela. Shema slijedila točke maksimalne snage pomoću koje će ukratko biti objašnjen princip rada sklopovlja prikazana je na slici 10.



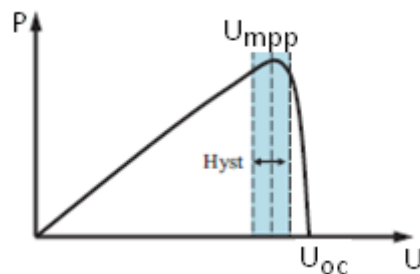
Slika 10: Shema slijedila točke maksimalne snage

Regulator ulaznog stupnja sklopovske realizacije povezuje solarni panel sa superkondenzatorom i odgovara *step-down* DC/DC pretvorniku. Napon superkondenzatora i napon solarnog panela povezani su relacijom

$$\frac{V_{SC}}{V_{PV}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (2)$$

gdje je t_{on} vrijeme uključenosti p-MOSFET sklopke M1, a T period koji obuhvaća jedno vrijeme uključenosti i isključenosti p-MOSFET sklopke. Dok je sklopka isključena, puni se kondenzator C_{in} do napona koji je određen gornjim pragom komparatora. Tada se zatvara

sklopka i počinje pražnjenje kondenzatora C_{in} kroz zavojnicu L i nabijanje superkondenzatora. Uvjet uz koji dolazi do pražnjenja kondenzatora C_{in} jest da struja kroz zavojnicu L mora biti veća od struje koju daje solarni panel. Kad napon kondenzatora C_{in} padne do donjeg praga komparatora isključuje se sklopka. Na zavojnici L trenutno se promijeni polaritet napona, provede dioda $D1$ i nastavi se punjenje superkondenzatora. Sklopkom p-MOSFET upravlja signal koji se generira na izlazu komparatora sa histerezom. Na ulaz komparatora dovedeni su napon solarnog panela i napon pomoćne sunčane ćelije preko otporničkog dijelila. Položaj i širina histereze komparatora određuju točnost slijeđenja točke maksimalne snage. Na slici 11 grafički je prikazana histereza. Srednja vrijednost gornjeg i donjeg praga komparatora odgovara aproksimiranoj vrijednosti napona sunčane ćelije u točki maksimalne snage, a širina histereze uzima se do 100 mV. Što je širina histereze manja to će sunčana ćelija raditi više u točki maksimalne snage.



Slika 11. Položaj histereze komparatora

Odabir vrijednosti i kriterij odabira komponenata MPPT sklopa nisu predmet razmatranja u ovom radu, a mogu se naći u (19).

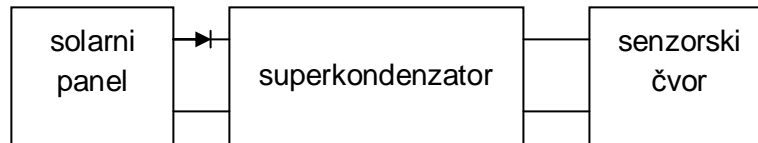
Ideja solarnog napajanja je iskoristiti superkondenzator za napajanje čvora čim više je to moguće. U slučaju da napon na superkondenzatoru padne ispod minimalnog napona DC/DC pretvornika na ulazu čvora, čvor se mora prespojiti na bateriju ili akumulator. U okviru ovog rada nije razmatran način punjenja tog akumulatora.

3.3.1 Mjerenje efikasnosti sklopovlja napajanja

Za potrebe testiranja rada algoritma bilo je potrebno izmjeriti efikasnost sklopovlja slijeđenja točke maksimalne snage i efikasnost punjenja superkondenzatora na kojeg je spojen osjetilni čvor kao trošilo. Cilj mjerenja efikasnosti sklopovlja napajanja je saznati efikasnost slijedila točke maksimalne snage, odnosno njegovu potrošnju. Slijedilo točke maksimalne snage povećava iskorištavanje dostupne sunčeve energije, ali se prikupljena energija dodatno troši za rad slijedila točke maksimalne snage.

3.3.1.1 Opis mjernih metoda

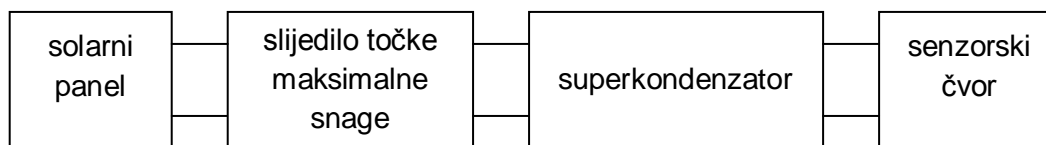
Za mjerenje efikasnost punjenja superkondenzatora uz slijedilo i bez njega, te za mjerenje efikasnost slijedila točke maksimalne snage korištene su dvije topologije. Prvu topologiju čine solarni panel, superkondenzator i senzorski čvor. Topologija je prikazana slikom 12.



Slika 12: Topologija korištena za mjerenje efikasnosti superkondenzatora bez MPPT sklopovlja

Između solarnog panela i superkondenzatora postavljena je Schottky dioda kako bi spriječila pražnjenje superkondenzatora kroz solarni panel. Tijekom mjerenja senzorski čvor stalno izvodi jednostavnu aplikaciju paljenje/gašenje LED dioda i spojen je paralelno sa superkondenzatorom. Ova topologija omogućuje mjerenje efikasnost direktnog punjenja superkondenzatora.

Drugu topologiju čine solarni panel, slijedilo točke maksimalne snage i senzorski čvor. Prikazana je slikom 13.



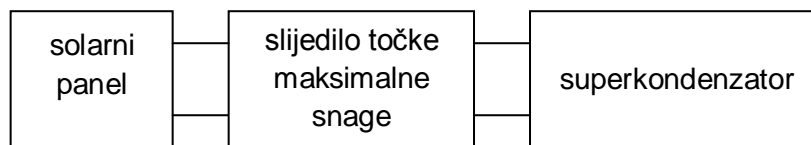
Slika 13: Topologija korištena za mjerenje efikasnosti superkondenzatora koristeći MPPT sklopovlje

Senzorski čvor spojen je paralelno sa superkondenzatorom i konstantno ga opterećuje. Ova topologija omogućuje mjerenje efikasnosti punjenja superkondenzatora korištenjem slijedila točke maksimalne snage. Usporedbom efikasnosti direktnog punjenja superkondenzatora i efikasnosti punjenja uz slijedilo točke maksimalne snage dobiti će se informacija o smislenosti slijedila.

Prije samog mjerenja superkondenzator je nabijen na 2,5 V i ta naponska razina održavana je sat vremena. Mjerenja su napravljena uz ozračenje solarnog panela halogenim reflektorom snage 500W. Velika snaga reflektora uzrokuje veliku disipaciju topline, zbog čega je bilo potrebno odvoditi toplinu prisilnim strujanjem zraka ventilatorima. Sat vremena prije mjerenja uključeni su reflektor i ventilatori kako bi se stabilizirala temperatura solarnog panela. Ozračenje solarnog panela reflektorima izmjereno je korištenjem pomoćne sunčane ćelije i uz napon napajanja reflektora od 210 V iznosilo je 750 W/m². Reflektor je napajan iz regulacijskog transformatora radi postizanja stabilnijeg napona napajanja. Od instrumenata

korišten je PC osciloskop Picoscope 4424, strujna sonda Tektronix A6802 sa pojačalom strujne sonde Tektronix AM503 i multimetar UT60A. Mjerenja su izvedena praćenjem valnih oblika signala dok se superkondenzator periodično puni do 3V, te prazni na 2,5V. Superkondenzator se puni dok je solarni panel priključen, a prazni kada se odspoji solarni panel. Signali su snimljeni u vremenskom intervalu koji je jednak 3 perioda punjenja/praznjenja superkondenzatora. Za svaku topologiju izvedena su tri mjerenja. U prvom mjerenju snimljeni su valni oblici napona i struje solarnog panela. U drugome mjerenju snimljeni su valni oblici napona superkondenzatora i struje u superkondenzator. U trećemu mjerenju snimljeni su valni oblici napona i struje na ulazu senzorskog čvora.

Za mjerenje potrošnje MPPT sklopovlja korištena je ista topologija kao kod mjerenja efikasnosti punjenja superkondenzatora, ali bez opterećenja superkondenzatora osjetilnim čvorom, kako je prikazano slikom 14.



Slika 14: Topologija korištena za mjerenje potrošnje MPPT sklopovlja

Prije mjerenja superkondenzator je pražnjen sat vremena kako bi bio čim niži napon superkondenzatora, zatim je punjen do 3 V i snimljeni su valni oblici napona i struje solarnog panela. Zatim se je superkondenzator praznio 15 minuta te je ponovljeno punjenje uz snimanje valnih oblika napona superkondenzatora i struje u superkondenzator. Snimljeni valni oblici korišteni su za procjenu efikasnosti slijedila točke maksimalne snage pri različitom naponu na superkondenzatoru i procjenu potrošnje slijedila točke maksimalne snage.

3.3.1.2 Rezultati mjerenja bez opterećenja superkondenzatora

Za prikupljanje iste količinu energije bez slijedila točke maksimalne snage treba 61 s, a uz slijedilo vrijeme se skraćuje na 37,5 s. Brzina iskorištavanja dostupne energije je veća sa slijedilom. Srednja snaga solarnog panela je jednaka 0,271 W uz korištenje slijedila točke maksimalne snage, a bez slijedila je 0,1658 W. Solarni panel daje 1,64 puta veću snagu u odnosu na snagu koju daje bez slijedila.

Efikasnost punjenja superkondenzatora definirana je omjerom energije koju superkondenzator primi i energije koju solarni panel prikupi u određenom vremenskom intervalu:

$$\eta_{punjenja} = \frac{\Delta E_{sc, punjena}}{\Delta E_{solar, punjenje}}. \quad (3)$$

Efikasnost punjenja ovisi o trenutnom naponu superkondenzatora. Što je napon veći, veća je i efikasnost punjenja. Tablica 3 prikazuje srednje vrijednosti efikasnosti punjenja superkondenzatora pri različitim intervalima napona superkondenzatora u slučaju kad je korišteno slijedilo.

Tablica 3: Srednje vrijednosti efikasnosti punjenja superkondenzatora pri različitim naponima superkondenzatora

Napon superkondenzatora (V)	0,4-0,7	0,7-1	1-1,3	1,3-1,6	1,6-2	2-2,3	2,3-2,8
$\eta_{\text{punjenja sa MPPT}}$	54%	67%	73%	82%	87%	90%	93%

Srednja vrijednost efikasnosti punjenja superkondenzatora od 0,3 V do 2,8 V korištenjem slijedila točke maksimalne snage je 83%. Potrošnja MPPT sklopovlja izražena formulom (4) jednaka je

$$P_{mppt} = P_{solar} \cdot (1 - \eta_{punjenja}) = 0,271 \cdot (1 - 0,83) = 46 \text{ mW}. \quad (4)$$

3.3.1.3 Rezultati mjerenja uz opterećenje superkondenzatora

Srednja snaga solarnog panela je ista kad koristimo slijedilo i bez njega u slučaju kada je superkondenzator opterećen senzorskim čvorom. Vremena punjenja superkondenzatora razlikuju se za oko 1,5 s zbog čega se razlikuju i energije koje daje solarni panel. Vremena pražnjenja superkondenzatora se razlikuju, za 3 s je kraće pražnjenje superkondenzatora u slučaju korištenja slijedila točke maksimalne snage. Razlog tome je činjenica da se superkondenzator brže puni slijedilom točke maksimalne snage i naboj koji dolazi u njega ne raspodjeljuje se jednoliko u superkondenzatoru, te kao posljedicu imamo prividno veći napon na superkondenzatoru, nego što bi taj napon bio u slučaju da se je naboj raspodijelio jednoliko.

Značajno se razlikuje količina energije koja se pohrani u superkondenzator prilikom punjenja korištenjem slijedila i bez njega. Izmjerena količina energije koju daje solarni panel bez slijedila točke maksimalne snage pri punjenju superkondenzatora je 5,22 J, a izmjerena količina energije koja se pohrani u superkondenzator je 2,61 J. Količina energije koju daje solarni panel sa slijedilom točke maksimalne snage je 4,64 J, a količina energije koja se pohrani u superkondenzator je 3,89 J. Što znači da je slijedilo zadržalo efikasnost punjenja superkondenzatora uz stalno opterećenje čvorom i ta efikasnost definirana formulom (5) iznosi

$$\eta_{punjenja} = \frac{\Delta E_{sc, punjena}}{\Delta E_{solar, punjenje}} = 83,84\% \quad (5)$$

dok je efikasnost direktnog punjenja superkondenzatora opterećenog čvorom jednaka 50% (tablica 4).

Tablica 4: Srednja vrijednost efikasnosti punjenja superkondenzatora (2,5V-3,0V) opterećenog senzorskim čvorom koristeći MPPT sklopovlje i bez njega

	MPPT	izravno
η_{punjenja}	83%	50%

Na temelju rezultata vidi se da se uz slijedilo može brže napuniti superkondenzator, odnosno u uvjetima naglih promjena ozračenja uz korištenje slijedila prikupiti će se veća količina energije.

3.4 Algoritam upravljanja potrošnjom

Algoritam upravljanja potrošnjom prati količinu energije u sustavu i na temelju toga obavještava korisničku aplikaciju o trenutnim pogodnim za obavljanje zadaće. Za realizaciju algoritma ključni su preduvjeti postojanje određenih sklopovskih i programskih rješenja na čvoru FER Čvorak v2.0:

- mogućnost mjerenja napona na
- RTC sklop ugrađen na svim čvorovima
- programska mogućnost promjene perioda buđenja.

3.4.1 Princip rada algoritma

Algoritam teži k održavanju konstantne količine energije u superkondenzatoru, ako postoji višak energije onda se ona smije potrošiti za obavljanje neke zadaće, ako imamo manjak energije mogu se obavljati samo nužne zadaće za održavanje mreže, a to je slanje servisnih podataka. Energija za obavljanje ostalih zadaća troši se samo kada imamo višak energije u superkondenzatoru. Što znači da moramo imati definirano neko energetske željeno stanje superkondenzatora koje nije jednako maksimalnoj, a ni minimalnoj mogućoj količini energije u superkondenzatoru. Energetske željeno stanje definirano je energijom koja je trenutno pohranjena u superkondenzatoru. Prema formuli (6) slijedi da je energetske željeno stanje određeno naponom na superkondenzatoru.

$$E_{sc} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_{sc}^2 \quad (6)$$

Energetske željeno stanje odgovara minimalnoj energiji koju želimo imati i uz koju će čvor moći raditi određeni broj sati dok nema prikupljanja energije iz ambijenta. Kada nema pritoka energije iz ambijenta, čvor smije slati samo servisne podatke uz minimalnu frekvenciju slanja. Kriterij za odabir željenog energetske stanja je omogućavanje napajanja čvora iz superkondenzatora određeno vrijeme dok nema pritoka energije iz ambijenta. U kontekstu projekta Maslinet, energetske željeno stanje mora omogućiti da se čvor napaja iz superkondenzatora cijelu noć pretpostavljenog maksimalnog trajanja od 12 sati. Čvor se

mora napajati iz akumulatora ako se smanji napon na superkondenzatoru ispod minimalnog napona koji mora biti na ulazu DC/DC pretvornika čvora.

Algoritam kao ulazne parametre prima podatak o ozračenju kojeg dobiva od osjetila svjetline P_{sun} , podatke o izmjerenom naponu superkondenzatora U_{SC} , podatak o željenom naponu na superkondenzatoru $U_{SC,željeno}$ i kapacitetu superkondenzatora C , podatak o maksimalnoj potrošnji prilikom obavljanja zadaće P_{zadaca} , podatak o vremenskom trajanju zadaće T_{zadaca} , podatak o minimalnoj potrošnji $P_{spavanje}$, podatak o vremenskom intervalu između dva trenutka buđenja T , te može primiti zahtjev za podacima te podatak o realnom vremenu od strane aplikacije osjetilnog čvora.

Na temelju izmjerene off-line potrošnje osjetilnog čvora pri obavljanju različitih zadaća P_{zadaca} i potrošnje u režimu rada smanjene potrošnje $P_{spavanje}$, te poznavanjem radnog omjera μ (engl. *duty cycle*) može se odrediti srednja snaga osjetilnog čvora. Zadavanjem minimalnog perioda T javljanja osjetilnog čvora koordinatoru može se prema formuli (7.) izračunati energija koju osjetilni čvor potroši unutar jednog budnog stanja i stanja smanjenje potrošnje.

$$E_{cvor} = P_{cvor} \cdot T = (\mu \cdot P_{zadaca} + (1 - \mu) \cdot P_{spavanje}) \cdot T \quad (7)$$

Prikupljanjem energije iz ambijenta raste napon superkondenzatora, odnosno raste količina energije u sustavu. Kada količina prikupljene energije postane veća od energije potrebne za obavljanje zadaće, algoritam javlja da je moguće obaviti zadaću. Na temelju poznavanja minimalnog vremenskog trajanja određene zadaće, možemo odrediti radni omjer potreban za tu zadaću prema relaciji (8.)

$$\mu_{zadaca} = \frac{T_{zadaca}}{T} \quad (8)$$

Količina energije u superkondenzatoru koja se smije potrošiti za obavljanje zadaće određuje relacija (9)

$$E_{sc,raspolo\ živa} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (U_{sc,trenutno}^2 - U_{sc,željeno}^2) \quad (9)$$

Izjednačavanjem raspoložive energije u superkondenzatoru i energije potrebne za obavljanje zadaće može se odrediti radni omjer. Konačni izraz za radni omjer je

$$\mu = \frac{\frac{1}{2} \cdot C \cdot (U_{sc,trenutno}^2 - U_{sc,željeno}^2) - P_{spavanje} \cdot T}{(P_{zadaca} - P_{spavanje}) \cdot T} \quad (10)$$

Ako je prema formuli (10) izračunati radni omjer μ manji od radnog omjera potrebnog za obavljanje zadaće μ_{zadaca} , neće se obaviti zadaća već će čvor poslati koordinatoru samo servisne podatke što odgovara zadaći s najmanjom potrošnjom. Ako je izračunati radni omjer μ veći od radnog omjera zadaće μ_{zadaca} , algoritam će signalizirati aplikaciji da se smije obaviti zadaća. Prilikom svakog buđenja šalje poruka sa servisnim podacima ili se obavi energetski zahtjevnija zadaća. Algoritam također prati trend napona na superkondenzatoru. Ako je u određeno vrijeme T_2 napon na superkondenzatoru opadao, omogućuje da se čvor budi

svakih $6T$, gdje je T minimalno vrijeme između dva buđenja čvora. To je moguće praktično realizirati na čvoru zahvaljujući mogućnosti promjene perioda buđenja.

Prema principu rada algoritma zaključujemo da bi se moglo desiti da imamo dana tijekom kojih se nijednom neće obaviti zadaća. Da bi osigurali obavljanje zadaće, u algoritmu je omogućeno obavljanje zadaće na zahtjev od strane aplikacije/koordinatora. Algoritam nakon primitka zahtjeva za obavljanje zadaće obavi istu korištenjem energije iz onog spremnika iz kojeg se trenutno napaja čvor.

S obzirom na funkcionalnost čvora možemo algoritam uz minimalne preinake prilagoditi da obavlja zadaću kad god je to moguće tj. svaki puta kad algoritam predloži da se smije obaviti zadaća ili može obavljati zadaću uz poštivanje minimalnog vremenskog razmaka između istih zadaća. Na primjer, za čvorove u mreži Maslinet koji mjere mikroklimatske uvjete bilo bi bolje da prikupljaju podatke kad god mogu zbog male potrošnje zadaća i povećanja kvalitete usluge, dok kod čvora sa kamerom imamo zadaću koju želimo obaviti 2-3 puta dnevno zbog energetski zahtjevnije akvizicije slike i slanja slike. Zadaća slanja slike obavljala bi se u minimalnom razmaku od 3 sata, ako bi naravno bio zadovoljen uvjet da se ta zadaća smije obaviti prema algoritmu.

3.5 Pseudokod algoritma za upravljanje potrošnjom

U pseudokodu pod nazivom napon_sc predstavljeno je polje u kojeg se spremaju 3 vrijednosti napona superkondenzatora: prvi član polja je napon izmjeren u trenutnom budnom stanju, drugi član polja je napon u prethodno budnom stanju, a treći član polja je napon izmjeren prije 2 budna stanja. Oznake T_{report} i P_{report} odnose se na vrijeme potrebno da se pošalju servisni podaci i potrošnja snage prilikom slanja servisnih podataka. Pod pojmom zadaća razmatraju se dva slučaja mjerenje i slanje podataka o mikroklimatskim uvjetima i akvizicija i slanje slike.

1. Inicijalizirane konstante potrebne za izvršavanje algoritma:

$U_{SC,željeno}$, C , T , $T_{zadaća}$, $P_{zadaća}$, $P_{spavanje}$, T_{report} , P_{report}

2. Izračunaj radni omjer $\mu_{zadaća}$ i μ_{report} prema formuli 8.

3. Ako je $napon_sc(3) > napon_sc(2)$ i $napon_sc(2) > napon_sc(1)$

4. povećaj vremenski interval između dva javljanja čvora na $6T$ sata

5. inače

6. vremenski interval između javljanja čvora je T

7. Ako je (ozračenje $> 200 \text{ W/m}^2$ i $napon_sc(1) > 3,37 \text{ V}$) ili postoji zahtjev za podacima

8. Izračunaj radni omjer μ prema formuli 10.

9. Ako je $\mu > \mu_{zadaća}$ ili postoji zahtjev za podacima

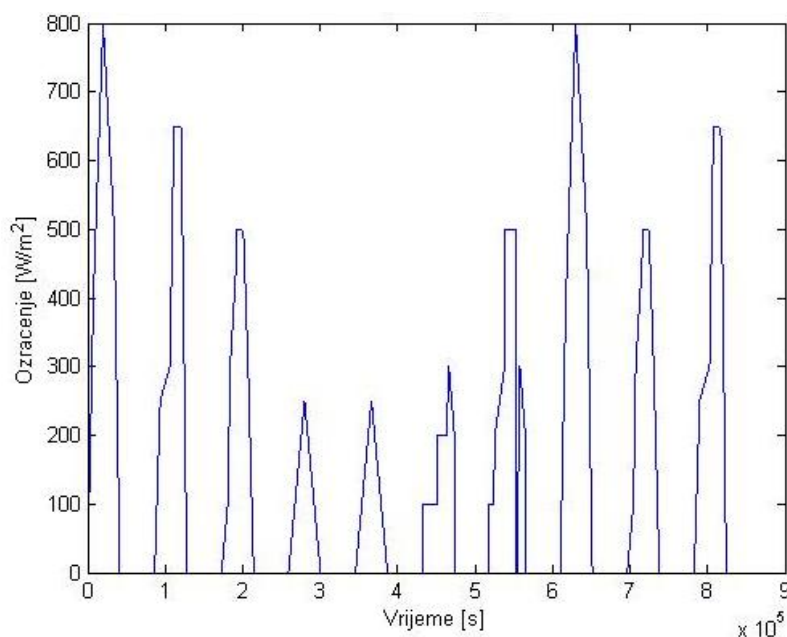
10. $\mu = \mu_{\text{zadaca}}$
11. inače
12. $\mu = \mu_{\text{report}}$
13. inače
14. $\mu = \mu_{\text{report}}$

Pseudokod algoritma za upravljanje potrošnjom krajnjeg čvora s kamerom ima drukčiju 9-u liniju pseudokoda. Uz uvjet dali je $\mu > \mu_{\text{zadaca}}$, postoji i uvjet da mora minimalno proći 3 sata od prethodnog slanja slike. Potrebna je još jedna varijabla $RTC_{\text{prethodno}}$ u koju se sprema vrijeme slanja slike. Slijedi dio pseudokoda algoritma upravljanja potrošnjom čvora s kamerom koji se razlikuje:

7. Ako je (ozračenje $> 200 \text{ W/m}^2$ i napon_sc(1) $> 3,37 \text{ V}$) ili postoji zahtjev za podacima
8. Izračunaj radni omjer μ prema formuli 10.
9. Ako je ($\mu > \mu_{\text{zadaca}}$ i $RTC_{\text{trenutno}} - RTC_{\text{prethodno}} > 3$ sata) ili postoji zahtjev za podacima
10. $\mu = \mu_{\text{zadaca}}$
11. $RTC_{\text{prethodno}} = \text{trenutna vrijednost u RTC-u}$
12. inače
13. $\mu = \mu_{\text{report}}$
14. inače
15. $\mu = \mu_{\text{report}}$;

3.6 Okruženje za testiranje rada algoritma

U programskom paketu Matlab izvedeno je testiranje rada algoritma. Za testiranje algoritma definirano je ozračenje solarnog panela u intervalu od 10 dana i modelirano je fizikalno ponašanje napona na superkondenzatoru. Ozračenje solarnog panela s kojim je testiran rad algoritma prikazano je na slici 15.



Slika 15: Korišteni testni podaci kretanja ozračenja solarnog panela tijekom 10 dana

Ponašanje napona na superkondenzatoru ovisi o energiji koju smo prikupili i energiji koju smo potrošili između dva trenutka buđenja. Da bi znali koliko je sunčeve energije prikupljeno potreban nam je podatak o snazi na izlazu slijedila točke maksimalne snage. Za procjenu te snage korištena je formula (11.)

$$P_{sc} = P_{solar} \cdot \eta_{MPPT} \cdot \eta_{sp} A_{sp} \quad (11)$$

gdje je P_{sc} snaga koju na izlazu daje slijedilo točke maksimalne snage, P_{solar} je snaga ozračenja izražena u W/m^2 , η_{MPPT} je efikasnost slijedila točke maksimalne snage, η_{sp} je efikasnost pretvorbe sunčeve energije u električnu energiju, A_{sp} je površina solarnog panela. Efikasnost solarnog panela η_{sp} je između 12-20 %, a za testiranje algoritma korišteno je najgori slučaj tj. $\eta_{sp}=0,12$. Kod testiranja algoritma kada se ne koristi MPPT sklop uzeto je $\eta_{MPPT}=0,5$ sukladno rezultatima mjerenja efikasnosti punjenja superkondenzatora bez slijedila točke maksimalne snage. Uz ozračenja manja od $500 W/m^2$ za η_{MPPT} uzeta je vrijednost $P_{solar}/1000$. Na temelju snage i poznatog trajanja vremenskog intervala između dva trenutka buđenja T može se izračunati količina prikupljene energije $E_{prikupljena}$

$$E_{prikupljena} = P_{sc} \cdot T. \quad (12)$$

Količina potrošene energije $E_{potrošena}$ odgovara potrošenoj energiji za prethodno obavljenu zadaću, a definirana je formulom (7). Na temelju razlike tih energija dobivamo podatak o energiji koja se pohranila u superkondenzatoru ΔE

$$\Delta E = E_{prikupljena} - E_{potrošena} \quad (13)$$

Ukupna energija pohranjena u superkondenzatoru E_{SC} jednaka je zbroju ukupne energije pohranjene u superkondenzatoru u prethodnom trenutku buđenja $E_{SC,prethodno}$ i promjene energije ΔE .

$$E_{SC} = E_{SC,prethodno} + \Delta E \quad (14)$$

E_{SC} ima maksimalnu vrijednost E_{SCmax} koja ovisi o maksimalnom naponu na superkondenzatoru. Taj napon određuje slijedilo točke maksimalne snage i iznosi 3,7 V. U modelu ponašanja superkondenzatora je gornja granica količina energije u superkondenzatoru definirana s E_{SCmax} , a donja granica jednaka je 0.

4 Rezultati

Algoritam je testiran uz zadano ozračenje prikazano na slici 12. Algoritam je testiran s dva seta ulaznih parametara. U prvoj iteraciji simulira se krajnji čvor koji mjeri mikroklimatske uvjete, a drugom krajnji čvor za akviziciju slike. Promjena funkcije krajnjeg čvora zahtjeva promjenu određenih ulaznih parametara algoritma. U tablici 5 dane su ulazne vrijednosti parametara algoritma koje su ili početne vrijednosti ili konstante za vrijeme izvršavanja algoritma.

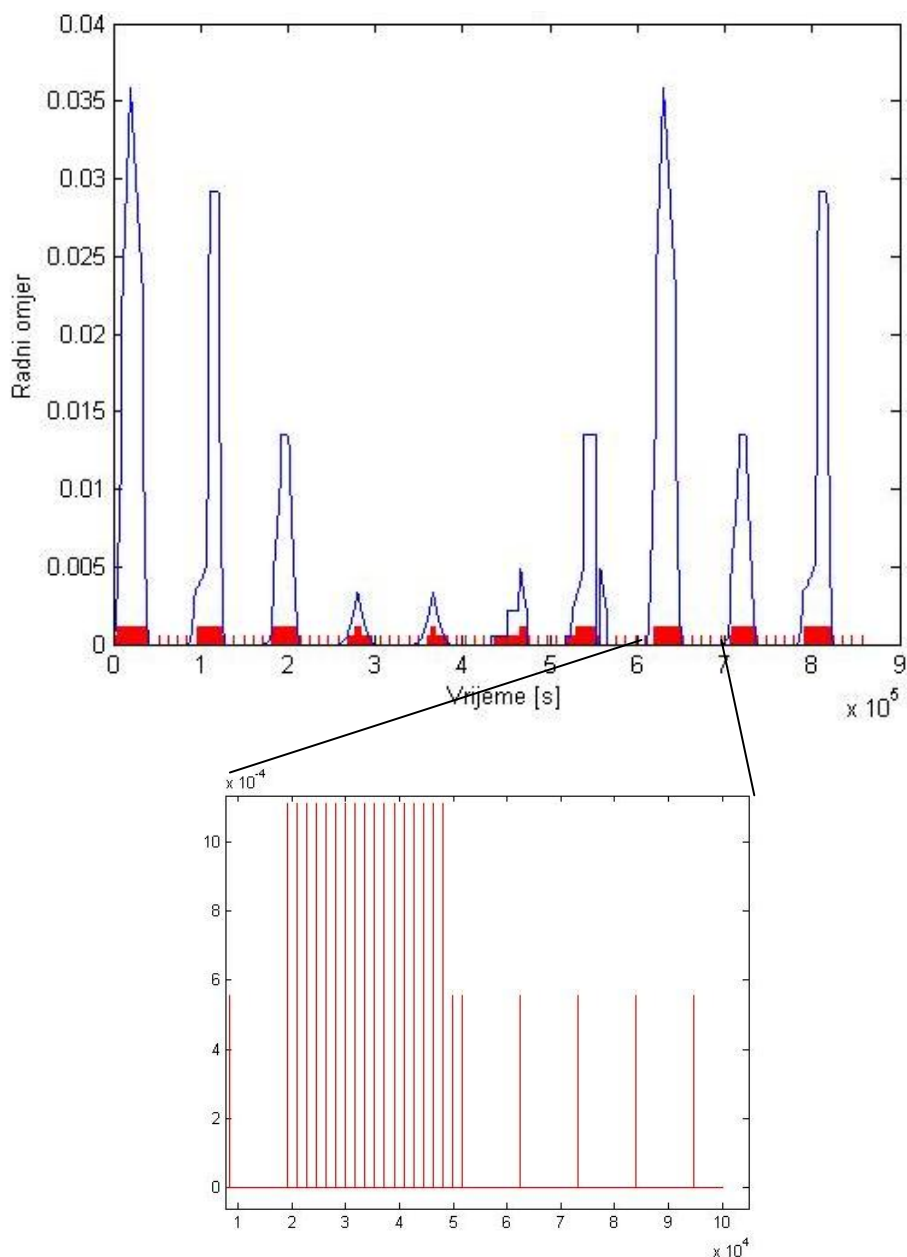
Tablica 5: Ulazne vrijednosti parametara algoritma

Parametar	Krajnji čvor s mjernim pretvornicima	Krajnji čvor s kamerom	Opis parametra
U_{SC}	2 V	2 V	Početna vrijednost napona na superkondenzatoru
$U_{SC,željeno}$	2,9 V	2,9 V	Napon koji definira željeno energetske stanje
E_{SCmax}	82 J	82J	Maksimalna moguća energija pohranjena u superkondenzatoru
C	2,5 F	11 F	Kapacitet superkondenzatora
P_{max}	64 mW	350 mW	Potrošnja zadaće
P_{min}	250 μ W	250 μ W	Potrošnja čvora u režimu smanjene potrošnje
T	30 minuta	30 minuta	Vrijeme između dva trenutka buđenja
T_{slika}	6 T	6 T	Minimalni vremenski period uzimanja slika
T_2	2T	2T	Vrijeme unutar kojeg mora napon superkondenzatora padati da se promijeni period buđenja na 6T
$\mu_{zadaća}$	2/T	77/T	Radni omjer zadaće
μ_{report}	1/T	1/T	Radni omjer slanja servisnih podataka

Kao rezultat simulacije algoritma dobivaju se po dvije slike. Plava pozadinska linija opisuje kretanje snage dostupne na izlazu MPPT sklopovlja tijekom deset dana simulacije. To je ekvivalent skaliranoj vrijednosti dnevnog kretanja Sunčevog ozračenja. Crvenom bojom

prikazana je vrijednost radnog omjera. Radni omjer definiran je kao omjer trajanja aktivnog stanja u odnosu na ukupno trajanje perioda između dva buđenja. Na temelju njegove vrijednosti iz slika se može zaključiti koju je zadaću čvor obrađivao zbog toga što se zadaće mogu diferencirati po trajanju. Druga slika prikazuje uzorke napona superkondenzatora na početku svakog budnog stanja.

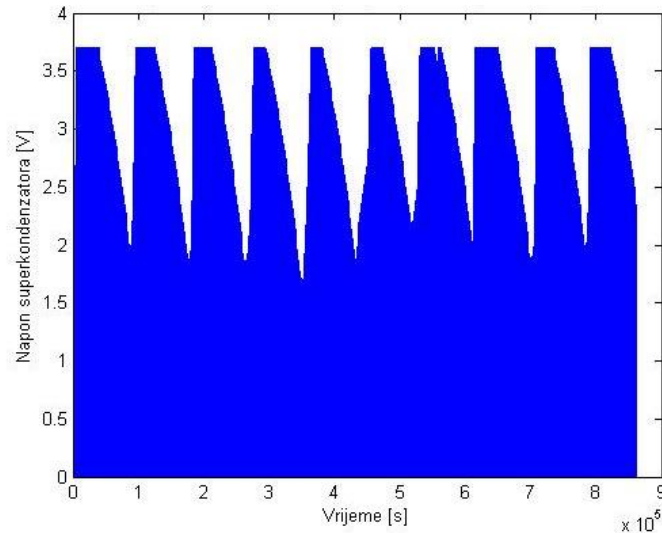
4.1 Testiranje algoritma za krajnji čvor s mjernim pretvornicima



Slika 16: Testiranje algoritma za scenarij slanja senzorskih mikroklimatskih podataka (čvor s mjernim pretvornicima)

Na slici 16 prikazan je radni omjer. Kada je vrijednost radnog omjera jednaka $5 \cdot 10^{-4}$ znači da će se u trenutnom budnom stanju poslati samo servisni podaci koordinatoru. Kada je

vrijednost radnog omjera duplo veća, obaviti će se mjerenja i poslati će se podaci koordinatoru. Iz povećane slike vidi se da se podaci šalju u svakom budnom stanju ako je ozračenje veće od $200\text{W}/\text{m}^2$. Iz povećane slike vidi se da se period slanja servisnih podataka povećao 3 puta jer je zabilježen trend padanja napona na superkondenzatoru.

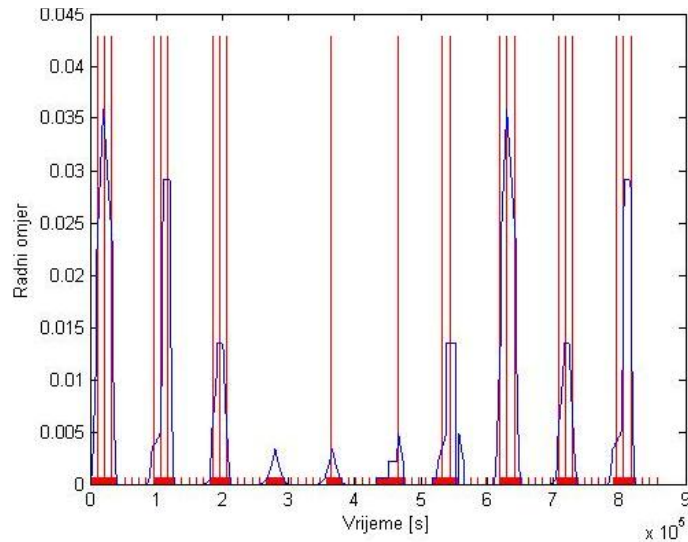


Slika 17: Napon superkondenzatora u scenariju slanja senzorskih mikroklimatskih podataka

Na slici 17 prikazan je napon superkondenzatora, vidi se kako napon na superkondenzatoru ne padne ispod 1,5V što je više od minimalnog napona DC/DC pretvornika na ulazu čvora. U zamišljenom scenariju čvor bi se stalno napajao iz superkondenzatora.

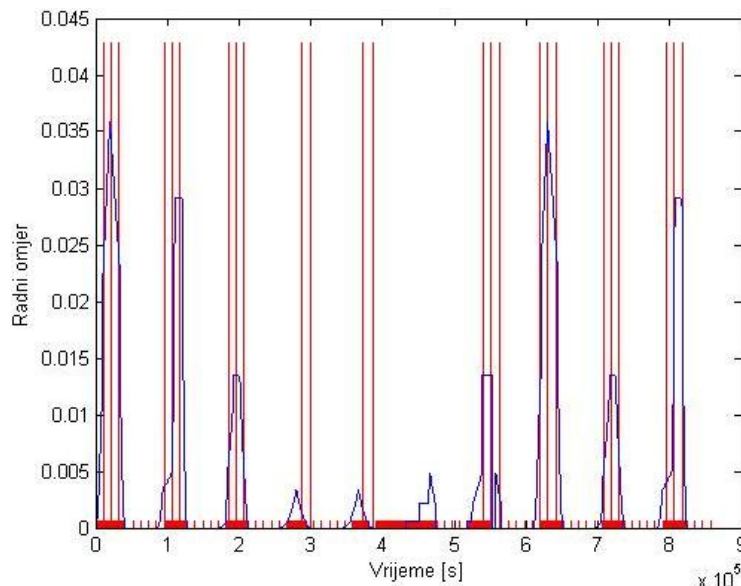
4.2 Testiranje algoritma za krajnji čvor s kamerom

Uz $C=2,5\text{ F}$ razlika između maksimalne i željene energije u superkondenzatoru nije bila veća od energije potrebne za akviziciju i slanje slike. Prilikom testiranja algoritma za krajnji čvor s kamerom bilo je potrebno uzeti veći kapacitet superkondenzatora da algoritma može sugerirati trenutak kad se smije obaviti akvizicija i slanje slike. Minimalni kapacitet uz kojeg je razlika između maksimalne i željene energije u superkondenzatoru veća od energije potrebne za akviziciju i slanje slike jednak je 11 F.

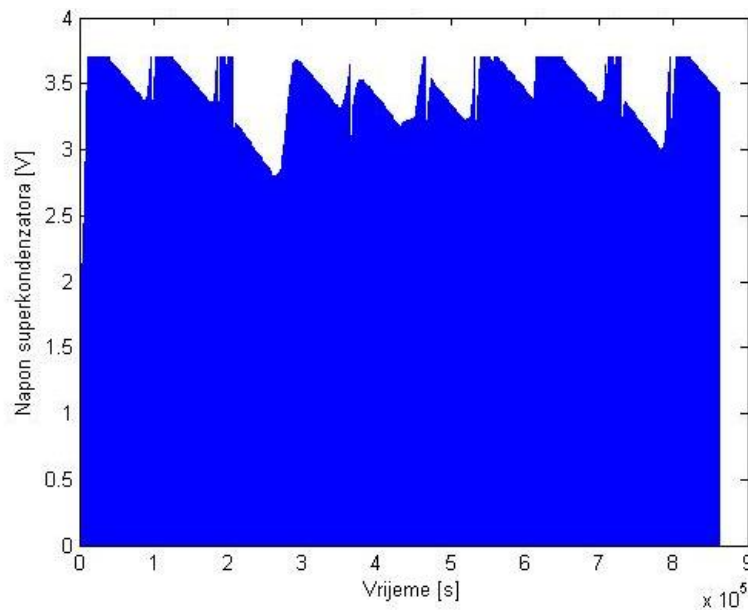


Slika 18: Testiranje algoritma za scenarij slanja slike

Na slici 18 prikazan je slučaj slanja slike. Kada je vrijednost radnog omjera jednaka $5,5 \cdot 10^{-4}$ znači da će se u trenutnom budnom stanju poslati samo servisni podaci koordinatoru. Kada je vrijednost radnog omjera 0,0428 obaviti će se akvizicija slanje slike koordinatoru. Kod slanja slike imamo ograničeno minimalno vrijeme koje mora proteći između dva slanja slike T_{slike} koje je jednako 3 sata. Prema algoritmu četvrti dan se ne bi slala slika. U okviru projekta Maslinet dovoljno bi bilo poslati 2-3 slike dnevno. Za dane kada algoritam ne predloži trenutak uzimanja uzorka, aplikacija će morati dati zahtjev za slikom. Druga slika se uzima isto na zahtjev 3 sata kasnije. Slučaj uzimanja slika na zahtjev prikazan je na slici 19.

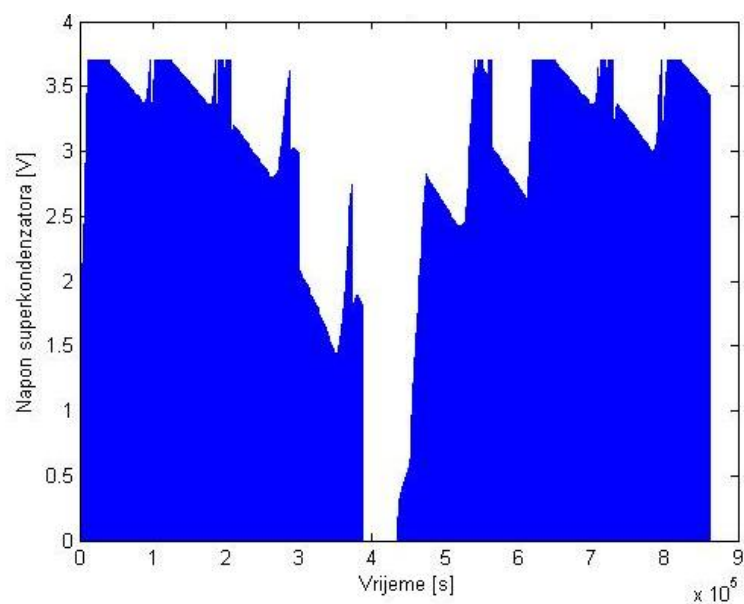


Slika 19: Testiranje algoritma za scenarij slanja slike uz zahtjeve za slikom primijene od koordinatora



Slika 20: Napon na kondenzatoru u scenariju slanja slike (bez primanja zahtjeva za slikom)

Na slici 20 prikazan je napon superkondenzatora pri napajanju krajnjeg čvora s kamerom bez generiranih zahtjeva, vidi se kako napon na superkondenzatoru ne padne ispod vrijednosti minimalnog napona DC/DC pretvornika na ulazu čvora, što znači da se u zamišljenom scenariju čvor stalno napaja iz superkondenzatora. Međutim, generiranjem zahtjeva napon na superkondenzatoru pada ispod 0,8V, što znači da bi se jedan dio vremena trebao čvor napajati iz akumulatora. Na slici 21 prikazan je napon superkondenzatora u slučaju generiranja zahtjeva za slikom. Tijekom napajanja čvora iz akumulatora, superkondenzator bi se napunio, te kad bi napon porastao iznad 2,9V priključio bi se čvor na superkondenzator.



Slika 21: Napon superkondenzatora pri slanju slike uz primljene zahtjeve za slikom

Prilikom testiranja rada algoritma u scenariju slanja slike uz model punjenja superkondenzatora direktno iz solarnog panela bez MPPT sklopa, dobiveni su isti rezultati kao na slici 18 i 20. Do toga dolazi zato jer je period punjenja superkondenzatora dovoljno dug pa se u oba slučaja superkondenzator stigne napuniti bez obzira na efikasnost njegovog punjenja.

5 Rasprava

Pokazalo se da ukoliko se na krajnjem čvoru koristi ovdje opisani algoritam upravljanja prikupljenom energijom, korištenje MPPT sklopa i njegovo izostavljanje daje iste rezultate, odnosno ne mijenja ponašanje testne aplikacije. Dakle, krajnji čvor se može napajati preko superkondenzatora spojenog izravno na solarni panel, kao što to prikazuje slika 12. Ovo je posljedica malih radnih omjera krajnjeg čvora, tj. superkondenzatoru se uvijek ostavlja dovoljno vremena da se napuni.

S druge strane, slijeđenje točke maksimalne snage ima smisla jedino kad je potrebno brzo i efikasno nadoknaditi potrošena energija. Tipičan primjer takve aplikacije u bežičnoj mreži osjetila su čvorovi koji moraju biti stalno upaljeni. ZigBee koordinator je primjer takvog čvora. Kod koordinatora imamo stalnu potrošnju energije koja je značajna iznosom i superkondenzator u sklopu solarnog izvora napajanja stalno bi se praznio, pa bi u takvome scenariju trebalo u svakom trenutku maksimizirati prikupljanje energije korištenjem slijedila točke maksimalne snage. Primjena algoritma upravljanja potrošnjom nema smisla kod koordinatora jer koordinator stalno radi i njegov radni omjer je konstantno jednak 1.

Na temelju rezultata testiranja algoritma za krajnji čvor s osjetilima za mjerenje mikroklimatskih uvjeta nije potrebno redimenzioniranje solarnog izvora napajanja. Zbog male potrošnje zadaće prikupljanja i slanja podataka, moguće je prikupljanje i slanje podataka mjernih pretvornika prilikom svakog buđenja.

Na temelju rezultata testiranja algoritma za krajnji čvor koji ima kameru utvrđeno je da je potrebno redimenzioniranje solarnog izvora napajanja. Minimalni iznos kapaciteta superkondenzatora je 11 F. Akvizicija slike i slanje slike predstavlja energetski zahtjevniju zadaću i u skladu s potrebama u projektu Maslinet nije potrebno uzimati sliku svaki puta kad algoritam predloži, već s minimalnim vremenskim razmakom od 3 sata. Algoritmom je definirano uzimanje i slanje slike prvi puta kad algoritam predloži i zatim svakih 3 sata ako ima dovoljno energije u superkondenzatoru što se vidi iz slika 18 i 19. Ako algoritam ne predloži trenutak obavljanja akvizicije i slanja slike 20 sati nakon zadnje poslano slike aplikacija na koordinatoru može dati zahtjev za slikom i nakon par sati ponoviti zahtjev da se pošalje minimalni broj slika dnevno. Uslijed slanja slika na zahtjev superkondenzator će se isprazniti. Iz činjenice da se to može dogoditi proizlazi potreba za pričuvnim napajanjem koje koristi bateriju ili akumulator. Treba se omogućiti napajanje čvora iz baterije ili akumulatora ako napon superkondenzatora padne ispod minimalno dozvoljenog ulaznog napona DC/DC pretvornika na ulazu čvora.

6 Zaključci

Testiranjem u simulaciji rada algoritma zaključeno je da solarno napajanje opisano u poglavlju 3.3 svojim kapacitetom udovoljava potrebama slanja senzorskih podataka. S druge strane, utvrđeno je da nema dostatan kapacitet za dugotrajne, energetske zahtjevne zadatke (zadaci s velikim prosječnim snagama i velikim radnim omjerima). Stoga se za takve zadatke predlaže redizajn sklopovlja napajanja. Pritom su glavne mogućnosti povećanje kapaciteta superkondenzatora i odabir solarnog panela veće površine. Pokazuje se da je najpraktičnije povećati superkondenzator jer zamjena solarnog panela povećava dimenzije sustava napajanja.

Na temelju rasprave provedene u prethodnom poglavlju, zaključeno je da upotreba sklopovlja za praćenja maksimalne snage ovisi o potrebnoj brzini punjenja superkondenzatora koju treba postići. U scenariju u kojem se uzorci uzimaju rijetko, upotreba MPPT sklopovlja povećava složenost sklopovlja napajanja, a ne donosi značajni dobitak. S druge strane, korištenjem MPPT sklopovlja moguće je postići brže punjenje superkondenzatora što je potrebno ako se uzorci moraju uzimati vrlo često.

Algoritam razvijen u ovom radu pokazao se uspješnim i pogodnim za pokusnu primjenu izvan simulatora, na terenu. Također, dovoljno je općenit i robustan za rad u promjenjivim uvjetima i različitim scenarijima bežičnih senzorskih mreža. Svejedno, glavno ograničenje mu je što je razvijen isključivo za konfiguraciju sklopovlja napajanja korištenu u projektu Maslinet. Također, zahtjeva da osjetilni čvor bude opremljen RTC sklopom, da ima mogućnost promjene perioda spavanja (ovdje je to izvedeno buđenjem na prekid RTC-a) i da može mjeriti osvjetljenje. Iz navedenih razloga ne može biti primijenjen uz neko drugo sklopovlje.

Predlažemo nastavak istraživanja s ciljem poboljšanja algoritma. Ponajprije, trebalo bi provesti eksperimentalno testiranje algoritma na terenu u postavljenoj mreži Maslinet. Nadalje, trebalo bi izmjeriti vlastitu potrošnju uslijed izvršavanja algoritma na osjetilnom čvoru. Također, u ovom radu nisu razmatrani tokovi energije između superkondenzatora i akumulatora koji služi kao pričuva u slučaju potpunog ispražnjenja superkondenzatora. Stoga se nastavak rada može usmjeriti i na redizajn sustava napajanja.

7 Zahvale

Zahvaljujemo se mentoru, prof. dr. sc. Vedranu Bilasu na vodstvu, koordinaciji i savjetima tijekom izrade ovog rada.

Posebna zahvala mr. sc. Marijanu Kuriju na savjetima i pruženoj tehničkoj podršci prilikom mjerenja parametara solarnog napajanja. Također, hvala mr.sc. Tihomiru Marjanoviću na ustupljenoj mjernoj opremi.

Zahvaljujemo se našim obiteljima i prijateljima na podršci i strpljenju tijekom izrade ovog rada.

8 Popis literature

1. *Modifikacija protokola ZigBee za energetska učinkovit i pouzdan prijenos slike u bežičnim multimedijским mrežama osjetila.* **Jeličić, Vana.** Zagreb : Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2009.
2. **Holger, Karl i Willig, Andreas.** *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Network.* s.l. : Wiley, 2005.
3. Maslinet. [Mrežno] 2009. [Citirano: 25. 4. 2010.] <http://www.maslinet.com/main.html>.
4. **Kulišić, P., Vuletin, J. i Zulim, I.** *Sunčane ćelije.* Zagreb : Školska knjiga, 1994.
5. *Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques.* **Esram, T.P. i L., Chapman.** s.l. : IEEE Trans. Energy Conv.
6. *Ambimax: autonomous energy harvesting platform for multi-supply wireless sensor nodes.* **Park, C. i Chou, P.** s.l. : Proceedings of the Sensor and Ad Hoc Communications and, 2006.
7. *Everlast: Long-life, supercapacitor-operated wireless sensor.* **Simjee, F., Chou, P.H.** s.l. : ISPLED, 2006.
8. **Brunelli, D., i dr.** *An Efficient Solar Harvester for Wireless Sensor Nodes.* 2008.
9. *Solar Inexhaustible Power Source for Wireless Sensor Node.* **Alberola, J., i dr.** Victoria, Vancouver Island, Canada : I²MTC 2008 – IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, May 12–15, 2008.
10. *Adaptive Control of Duty Cycling in Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks.* **Vigorito, C. M., Ganesan, D. i G., Barto A.**
11. **Brunelli, Davide.** *Electronic systems for ambient intelligence.* Bologna : Department of electronics, computer science and systems of University of Bologna, 2007.
12. *Power management in energy harvesting sensor networks.* **Kansal, A., i dr.** s.l. : ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2006.
13. *Energy Management in Wireless Sensor Networks with Energy-hungry Sensors.* **Cesare Alippi, Giuseppe Anastasi, Mario Di Francesco, Manuel Roveri.** s.l. : IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, April, 2009, Svez. 12.
14. **ZigBee Alliance.** ZigBee Specification. *ZigBee Alliance.* [Mrežno] 17. 1. 2008. [Citirano: 11. 11. 2009.] <http://www.zigbee.org/ZigBeeSpecificationDownloadRequest/tabid/311/Default.aspx>.
15. **Atmel.** *ZigBit™ 2.4 GHz Amplified Wireless Modules Datasheet.* s.l. : Atmel, 2009.
16. —. BitCloud: User Guide. *Atmel.* [Mrežno] 5. 2009. [Citirano: 13. 11. 2009.] http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8199.pdf.
17. —. *BitCloud Stack Documentation.* [Help file] s.l. : Atmel, 2009.

18. *Photovoltaic scavenging systems: Modeling and optimization.* **Brunelli, D., i dr.** s.l. : Microelectronics Journal, 2008.

19. **Jerković, Tomislav, i dr.** BMO za primjenu u poljoprivredi. Zagreb : an., 2010.

9 Sažetak

Lara Juričić, Dinko Oletić

Energetski svjestan bežični osjetilni čvor napajan energijom iz ambijenta

Ovaj rad nastavlja se na istraživačke aktivnosti u sklopu projekta Maslinet. Cilj ovog rada je pokazati energetski svjestan algoritam za upravljanje zadacima krajnjeg čvora bežične senzorske mreže u realnom vremenu. Na temelju algoritamske procjene, korisničkoj se aplikaciji sugerira trenutak pogodan za obavljanje određene zadaće. Ugradnja našeg energetski svjesnog upravitelja zadacima predstavlja zapravo metodu upravljanja prikupljenom energijom.

Na početku rada je dan kontekst projekta Maslinet za koji se razvija dani algoritam. Opisan je bežični osjetilni čvor FER Čvorak v2.0 razvijen u sklopu projekta Maslinet za koji se realizira algoritam optimiranja potrošnje. Opisane su njegove sklopovske i programske mogućnosti koje doprinose smanjenju potrošnje i omogućuju realizaciju algoritma za optimiranje potrošnje. Za potrebe dobivanja referentnih vrijednosti potrošnje izmjerena je potrošnja krajnjeg čvora. Nakon toga je opisano sklopovlje napajanja koje služi za prikupljanje energije iz ambijenta. Opisano sklopovlje napajanja se sastoji od solarnog panela, slijedila točke maksimalne snage, superkondenzatora i akumulatora. Za potrebe testiranja algoritma izmjerena je efikasnost slijedila točke maksimalne snage. Nakon toga opisan je energetski svjestan algoritam upravljanja zadacima. Algoritam kao ulazne varijable uzima kapacitet, trenutno izmjereni napon superkondenzatora, trenutno ozračenje (sa senzora svjetline) i prethodno izmjerene vrijednosti potrošnje u stanju spavanja i pri izvršavanju zadaća različite energetske zahtjevnosti. Algoritam u svom radu nastoji u čim većoj mjeri iskoristiti energiju spremljenu u superkondenzator i čim manje se oslanjati na pomoćni akumulator.

Višednevni rad algoritma u različitim vremenskim uvjetima pokazan je Matlab simulacijom. Pokazano je da je algoritam višestruko primjenjiv. Može se najprije iskoristiti u fazi razvoja kao razvojno okruženje prije ugradnje u čvor za dimenzioniranje komponenti napajanja. Nakon postavljanja čvora na teren služi za optimalno iskorištenje dostupne energije iz ambijenta. Algoritam se pokazao skalabilnim jer se može iskoristiti za upravljanje zadacima različitog energetske opterećenja.

Ključne riječi:

Energetski svjesna bežična mreža osjetila, prikupljanje energije iz ambijenta, optimiranje potrošnje, energetski svjesno planiranje zadataka, energetski svjesno adaptivno uzorkovanje

10 Summary

Lara Juričić, Dinko Oletić

Energy aware ambientally powered wireless sensor node

This work builds on research activities within the project Maslinet. The aim of this paper is to present an energy aware real-time task scheduling algorithm for use in wireless sensor node. Based on the algorithmic evaluation, user application is being suggested by the scheduling algorithm a suitable moment to perform a certain energy demanding task. Deployment of our energy aware task scheduler is in fact one of the energy management technique.

At first, we describe context of project Maslinet for which algorithm has been designed for. FER Čvorak v2.0 wireless sensor node is described, for which energy management algorithm is being implemented. Hardware and software features for minimizing power consumption of wireless sensor node are being shown, as well as features which enable employment of our energy aware scheduling algorithm. Then, power consumption of WSN end-node is being measured, as these offline-measured values serve as input for our algorithm. After that, energy harvesting circuit is being described. Our energy harvester consists of solar panel, maximum power point tracker, supercapacitor and backup accumulator. For the purpose of testing of our algorithm, efficiency of maximum power point tracker is being tested. Now, with all input parameters known and related, we describe our energy aware task scheduling algorithm. It takes supercapacitor capacity, currently measured supercapacitor voltage, current lighting (using light sensor) and offline-measured consumption data for sleep state and execution of tasks of different energy demand. Primarily, algorithm tends to use as much as energy as possible from supercapacitor and does not track energy content of the accumulator which serves as a backup storage unit.

Operation of the algorithm during multiple days in different weather conditions is simulated in Matlab. Versatility of algorithm is shown. It can be used in the development stage of a WSN before the installation of the node as a development environment for sizing components of the power supply. After that, it serves for optimal utilization of available energy from the environment. The algorithm has proven to be scalable because it can manage tasks of different energy demand.

Keywords:

Energy aware wireless sensor network, ambient energy harvesting, energy management, energy aware task scheduling, harvesting-aware adaptive sampling