

PRIKUPLJANJE I KONVERZIJA ENERGIJE ZA NAPAJANJE IoT UREĐAJA

Miloš Radojković¹, Zlatica Marinković²

¹Energoprojekt Entel, mradojkovic@ep-entel.com

²Univerzitet u Nišu - Elektronski fakultet, zlatica.marinkovic@elfak.ni.ac.rs

Sadržaj: *Jedan od najvećih izazova u razvoju IoT sistema je obezbeđivanje pouzdanog napajanja uređaja. Standardne baterije imaju relativno kratak vek trajanja i potrebna je njihova zamena, pa se posebna pažnja u istraživanjima posvećuje alternativnim načinima napajanja. U ovom radu dat je pregled najvažnijih istraživanja i rešenja vezanih za prikupljanje i konverziju energije koja postoji u okruženju u cilju obezbeđivanja napajanja za IoT uređaje. Posebna pažnja je posvećena konverziji RF energije koja potiče od komunikacionih sistema prisutnih u okruženju.*

Ključne reči: *Internet of Things, Energy Harvesting, Napajanje*

1. Uvod

Internet stvari (*Internet of Things* - IoT) obuhvata širok spektar aplikacija i servisa među koje se mogu svrstati aplikacije i servisi koji se koriste u pametnim kućama (*smart home*), pametnim zgradama (*smart buildings*), rešenjima pametnih gradova (*smart cities*), u rešenjima udaljenog nadzora, automatizacije u industriji, zdravstvu, poljoprivredi, saobraćaju itd. Smatra se da će do 2020. godine u svetu biti instalirano oko 20 milijardi IoT uređaja. Pošto IoT uređaji treba da omoguće neprekidan izvor informacija njihovo napajanje treba da bude neprekidno. Kako bi se smanjila potreba za zamenom baterija za napajanje IoT uređaja mnogi istraživači rade na optimizaciji životnog ciklusa baterija i primeni takozvane *Energy Harvesting* (EH) tehnike u napajanju IoT uređaja. Napajanje IoT uređaja putem EH tehnike zasniva se na nekoliko faktora od kojih su najbitniji: mogućnost za prikupljanje energije iz neposredne okoline IoT uređaja, prikupljanje i konverzija prikupljene energije, potrošnja IoT uređaja i skladištenje energije i upravljanje energijom [1].

U ovom radu, najpre će u sekciji 2 biti dat kratak pregled tehnika za prikupljanje i konverziju energije iz različitih izvora koji postoje u okruženju, sa osvrtom na izbor optimalnog rešenja za konkretne sisteme. U sekciji 3 će biti opisano prikupljanje i konverzija RF energije koja postoji u okruženju i potiče od komunikacionih sistema. Biće opisani osnovni principi rada RF EH tehnike, kao i realizacija pojedinih delova EH uređaja. U sekciji 4 biće diskutovana potrošnja IoT uređaja u zavisnosti od protokola koji se koriste, a u sekciji 5 skladištenje energije koja je dobijena primenom EH tehnike. Neka od komercijalno dostupnih rešenja baziranih na EH tehnici biće navedena u sekciji 6.

2. Mogućnost okoline za prikupljanje energije pomoću EH tehnike

EH je proces kojim se prikuplja i konvertuje energija različitih izvora okoline kao što su solarna, termalna, RF energija itd. u električnu energiju. EH tehnika se uglavnom koristi u napajanju uređaja male potrošnje – senzora i IoT uređaja. Najvažniji vidovi energije prisutni u okruženju se na osnovu svojih karakteristika i prirode mogu podeliti u sledeće grupe:

- Energija prirode gde spadaju solarna energija i energija vetra;
- Mehanička energija;
- Termalna energija;
- RF energija.

U zavisnosti od karakteristika i okoline nastanka izvori za EH tehniku mogu dati određenu gustinu energije (koja se izražava u W/cm^2). U Tabeli 1 prikazane su tipične vrednosti gustine energije za različite vrste izvora energije [2].

Tabela 1. Gustine energije različitih izvora energije

Izvor energije	Gustina energije
Vibracije	
Čovek	$4 \mu W/cm^2$
Industrijske vibracije	$100 \mu W/cm^2$
Solarna energija	
Termalna energija	
Čovek	$30 \mu W/cm^2$
Industrija	$1-10 mW/cm^2$
RF energija	
AM radio stanice	$159 \mu W/cm^2$
Bazna stanica mobilne telefonije	$32 \mu W/cm^2$
Wi-Fi ruter	$3.2 \mu W/cm^2$

Prikupljanje i konverzija solarne energije dostupne u okolini je danas veoma rasprostranjeno i koristi se za napajanje širokog spektra uređaja i potrošača. Ipak korišćenje solarne energije za napajanje uređaja male snage u IoT aplikacijama ograničeno je dostupnošću solarne energije. Kako se IoT uređaji koriste u bežičnim senzorskim mrežama male snage koje se uglavnom instaliraju i koriste u zatvorenim prostorijama nedostupnost solarne energije ograničava njenu primenu u ovoj oblasti. Takođe korišćenje solarne energije je uglavnom zastupljeno za napajanje uređaja veće potrošnje u odnosu na IoT uređaje.

Vibraciona energija je takođe dostupna u okolini a proizvode je razni izvori svojim kretanjem, kao što su pokreti čoveka, motornih vozila, raznih industrijskih mašina, itd. Prikupljanje i konverzija vibracione energije moguća je korišćenjem piezoelektričnih pretvarača. Razna istraživanja pokazuju da se prikupljanjem vibracione energije mogu bežično poslati oko 24 bita informacija.

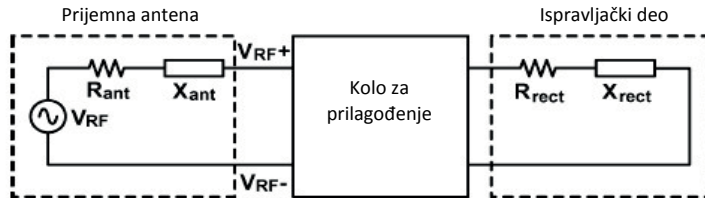
Najzastupljenija energija u okolini koje trenutno ima u neograničenim količinama i koja je dostupna u svim vremenskim prilikama i ne zavisi od doba dana i noći jeste energija izračena preko radio predajnika – RF energija. Radio predajnici su dostupni u svim sredinama, nebitno da li potiču od baznih stanica raznih mobilnih sistema, WiFi uređaja, televizijskih, radio, satelitskih i drugih predajnika. Prikupljanje i

konverzija RF energije, uz korišćenje menadžmenta napajanja i odgovarajućih baterija ili kondenzatora može biti dovoljana, da uz primenu adekvatne tehnike za bežični prenos, omogućujući autonomiju IoT uređaja [3].

3. Prikupljanje i konverzija RF energije

Kao što je već rečeno RF energija je zastupljena u okolini u neograničenim količinama i zato je veoma pogodna za napajanje uređaja male potrošnje u IoT aplikacijama, prevashodno imajući u vidu veliki broj IoT uređaja kojima treba obezbediti napajanje.

Na Slici 1 data je principiska šema sklopa za prikupljanje i konverziju RF energije. Naime, energija se prikuplja preko prijemne antene, a zatim se pomoću ispravljača (*rectifier*) pretvara u jednosmernu struju. Između antene i ispravljačkog dela postoji kolo za prilagođenje. Često se antena i ispravljački sklop realizuju kao jedinstveni sklop, tzv. rektena (*rectenna*). Primljeni RF signal se dalje konvertuje u jednosmerni napon. Konvertovana RF energija se zatim koristi za napajanje IoT uređaja i/ili skladišti na kondenzatoru velikog kapaciteta.



Slika 1. Principiska šema sklopa za prikupljanje i konverziju RF energije

Iako je RF energija veoma dostupna i rasprostranjena najveći problem se javlja usled slabljenja elektromagnetnih talasa u prostoru i smanjenja gustine snage sa povećanjem udaljenosti od predajnika. Napajanje IoT uređaja konverzijom RF energije je povezano sa izračenom snagom radio predajnika, njegovom frekvencijom i udaljenošću između predajne i prijemne antene sklopa za konverziju RF energije [4].

Intenzitet RF snage na mestu prijemne antene može se izračunati formulom

$$P_r = G_t G_r P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (1)$$

gde su:

- P_r - snaga RF signala na mestu prijema,
- P_t - snaga RF signala na mestu predaje,
- G_t - pojačanje predajne antente,
- G_r - pojačanje prijemne antene,
- d - udaljenost između predajnika i prijemnika.

Ukoliko se pretpostavi da EH sklop prikuplja RF energiju koja postoji u okruženju u nelicenciranom opsegu od 902-928 MHz prema formuli za slabljenje u slobodnom prostoru:

$$FSL(\text{dB}) = 27.55 + 20 \log d + 20 \log f \quad (2)$$

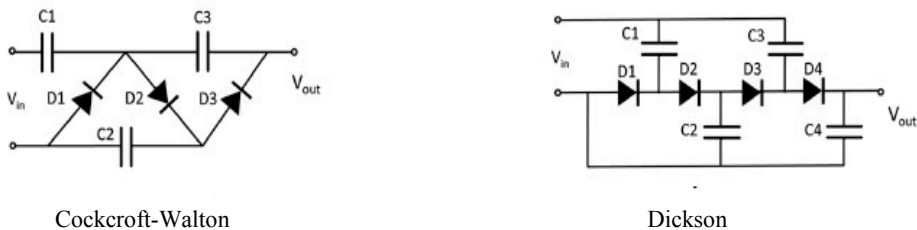
gde je d udaljenost od izvora zračenja u metrima, a f frekvencija u MHz, slabljenje signala na 10 metara od izvora na frekvenciji 902 MHz iznosi 59.55 dB, dok na frekvenciji 928 MHz slabljenje iznosi 59.8 dB.

IoT uređaji bi trebalo da se nalaze u neposrednoj blizini izvora RF energije (prema nekim preporukama, do 10 metara, što zavisi i od tipa izvora RF zračenja), pošto gustina dostupne RF energije u prostoru opada sa kvadratom rastojanja. Kako bi se obezbedila dovoljna količina RF energije, u neposrednoj blizini IoT uređaja mogu se postaviti radio predajnici namenjeni da povećaju gustinu dostupne RF energije.

Iz prikazanog može se zaključiti da EH sklop treba da bude projektovan da pasivno primljenu RF energiju, pravilnim prilagođenjem impedanse i omogućavanjem visokog Q faktora, sa što manje gubitaka prenese do ispravljačkog sklopa, jer je veoma bitno da do ispravljačkog dela dođe maksimalno moguća dostupna RF energija.

Ispravljački deo treba da omogući pretvaranje naizmeničnog RF signala u jednosmerni napon, kao i da omogući pojačanje jednosmernog napona povezivanjem više ispravljačkih sekcija. Ipak povezivanje većeg broja ispravljačkih sekcija može dovesti do pada napona na izlazu iz ispravljačkog sklopa ukoliko se poveže više sekcija od optimalnog broja.

Ispravljački deo sa više sekcija ima dvojaku funkciju, ispravljanje naizmeničnog napona i pojačavanje jednosmernog napona. Kao što je već rečeno, zbog slabljenja RF signala kroz prostor neophodno je izvršiti pojačanje napona kako bi IoT uređaji mogli da funkcionišu. Dve osnovne konfiguracije ispravljača sa više sekcija – pojačavača su *Cockroft-Walton-ov* i *Dickson-ov* pojačavač. Razlika između *Cockroft-Walton-ovog* i *Dickson-ovog* pojačavača je u dodatnim kondenzatorima, kod *Dickson-ovog* pojačavača, kojim se smanjuju parazitetni efekti u sekcijama. Izgled *Cockroft-Walton-ovog* i *Dickson-ovog* pojačavača prikazan je na Slici 2.



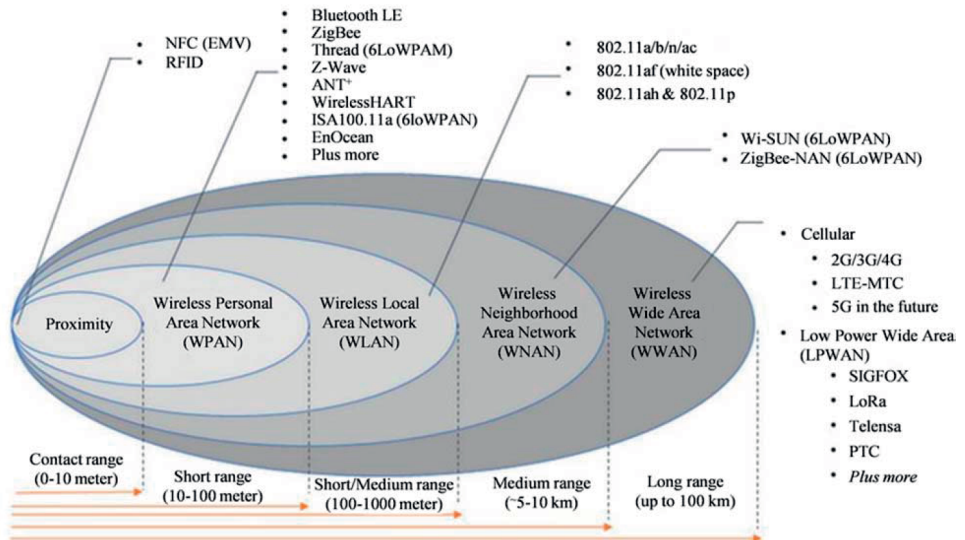
Slika 2. *Cockroft-Walton-ov* i *Dickson-ov* pojačavač

MOSFET tehnologija je adekvatna alternativa za zamenu pojačavača baziranih na diodama zbog manjeg praga provođenja, što dovodi do manjih gubitaka napona pri prolasku kroz višesekcijski pojačavač. Ipak, kao što je već rečeno optimalan broj sekcija se mora uzeti u obzir kako bi nivo izlaznog signala bio dovoljan za napajanje IoT uređaja [2].

5. Komunikacioni protokoli u IoT aplikacijama i potrošnja energije

Postoji veliki broj protokola koji se koriste za ostvarivanje bežičnog povezivanja u IoT aplikacijama. U zavisnosti od tipa protokola koji se koristi zavisi i potrošnja IoT uređaja, što je veoma bitan element koji mora biti sagledan u bežičnim mrežama male potrošnje.

Dometa koji se može ostvariti korišćenjem bežičnih protokola kreće se od nekoliko centimetara pa do nekoliko kilometara. Protokoli kao što su Bluetooth LE, LowPAN, Wi-Fi i ZigBee se preporučuju za komunikacije kratkog i srednjeg dometa, za komunikacije koje su poznate kao *Wireless Personal and Local Area Network (WPAN/LAN)*. Ovi protokoli male potrošnje su pogodni za IoT aplikacije. Tehnologije poput LPWA, SIGFOX i LoRa, kao i celularne mreže su pogodnije za komunikacije dugog dometa [1]. Na Slici 3 dat je prikaz koji su protokoli pogodni za različite domete na kojima se uspostavlja bežična komunikacija.



Slika 3. Protokoli u bežičnim komunikacijama [1]

Najzastupljeniji protokol u WPAN mrežama je ZigBee opisan u standardu IEEE 802.15.4. Ovaj protokol podržava i sekvencionisanje paketa kako bi se izbegao eventualni gubitak paketa u toku komunikacije. Senzorske mreže koje koriste ZigBee protokol mogu raditi u sledećim opsezima: 2.4 GHz, 868 MHz i 902-928 MHz. U svakoj ZigBee mrežnoj topologiji postoje krajnji čvorovi i mrežni kontroleri. Kako je ZigBee protokol namenjen za komunikacije srednjeg dometa dalje povezivanje i prenos informacija vrši se preko *Gateway* uređaja. Postoje tri načina komunikacije u ZigBee mrežama: nesinhronizovani prenos gde je kontroler uvek aktivan, nesinhronizovani prenos gde se kontroler aktivira u slučaju zahteva za prenos krajnjeg čvora i sinhronizovani prenos gde se komunikacija odvija preko definisanog kanala. U trenucima kada uređaj ne šalje ili prima informacije nalazi se u režimu mirovanja [5].

5. Skladištenje energije i upravljanje energijom

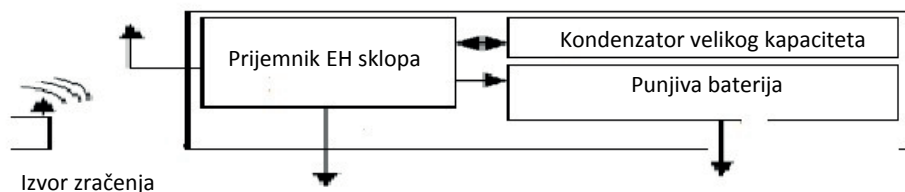
Baterije su u današnje vreme dosta usavršene i koriste se za napajanje velikog broja uređaja i potrošača. Ipak stalna zamena standardnih baterija na IoT uređajima je glavni problem održavanja jer je potrebno dosta vremena i resursa kako bi se opslužili svi aktivni uređaji. Kako bi se postigla velika autonomija rada senzora i IoT uređaja koriste se baterije koje imaju mogućnost punjenja i pražnjenja. Proteklih decenija tehnologija izrade baterija je značajno napredovala. Danas su dostupni različiti tipovi baterija čiji su pregled i karakteristike dati u Tabeli 2.

Tabela 2. Karakteristike baterija

Tip baterije	Gustina energije Wh/dm ³	Gustina energije Wh/kg	Samopražnjenje % na godinu	Ciklus punjenja i pražnjenja
Alkalne	300	125	4 %	1
Ni-Cd	100	30-35	15-20 %	300
Ni-MH	175	50	20 %	300
Li-ion	200	90	5-10 %	500

Kao što je prikazano u Tabeli 2. ograničenje baterije se javlja usled limitiranog broja ciklusa ponovnog punjenja i pražnjenja. Današnji razvoj tehnologije omogućio je izradu takozvanih super kondenzatora čiji se kapacitet meri u kF. Iako je ovo velika kapacitivnost, gustina energije je značajno manja u odnosu na baterije i kreće se oko 3 Wh/kg. Takođe, kod super kondenzatora postoji i problem samopražnjenja. Nove tehnologije u izradi laganih i fleksibilnih baterija, poput štampanih baterija koje nisu kompleksne za proizvodnju, i mogu biti napravljene u proizvoljnoj veličini i kapacitetu, ili poluprovodničkih baterija koje su pogodne za integrisanje sa integrisanim kolima i pogodne za minijaturizaciju, nisu još uvek dovoljno razvijene za širu primenu [1]. Zbog toga se u EH sklop kao deo za skladištenje energije dodaju i kondenzatori velikog kapaciteta jer imaju neograničeni ciklus pražnjenja i punjenja. Kondenzatori se koriste za napajanje uređaja u režimima prijema i predaje kada se u kratkom vremenskom periodu traži značajna količina energije. Baterije služe kao rezervno napajanje ukoliko je trenutni kvalitet RF signala nedovoljan za konverziju [6].

Na Slici 4. prikazana je šema skladištenja energije prikupljena EH sklopom.



Slika 4. Skladištenje energije prikupljene EH sistemom

Kombinacija baterija i kondenzatora velikog kapaciteta mora biti upravljana od strane sklopa za kontrolu napajanja čime se omogućuje pravilno odlučivanje koji će se izvor energije koristiti u određenom trenutku rada IoT uređaja, tako da uskladenost

između primopredajnog dela i dela za kontrolu napajanja mora biti postignuta kao preduslov za optimizaciju potrošnje i postizanja energijski neutralnog perioda kada se uređaj nalazi u stanju mirovanja. Dakle, funkcija sklopa za kontrolu napajanja ima za cilj da minimizuje potrošnju energije ili da maksimalno produži životni ciklus baterije [7].

7. Komercijalno dostupna IoT rešenja bazirana na EH tehnikama

Na tržištu danas postoje dostupna rešenja napajanja za IoT primene koja su bazirana na prikupljanju i konverziji energije iz okruženja. Ovde će biti navedena samo neka od njih. Primer rešenja prikupljanja i konverzije solarne energije je bežični senzor napajan solarnom energijom *Sol Chip SCC-S433* [8]. Ovaj senzor ne zateva dodatnu bateriju. Ima mogućnost komunikacije na 433 MHz i može se povezati sa *cloud* servisima. Ima primene u rešenjima pametnih gradova, preciznoj poljoprivredi i nadgledanju okoline. *Webicom ENVIRO* je rešenje bazirano na prikupljanju solarne energije bazirano na solarnoj ćeliji [9]. Daje izlazne snage do 13 mW i može se koristiti za napajanje senzora i Bluetooth LE modula. Može raditi do dva meseca u odsustvu solarne energije. Rešenje zasnovano na konverziji vibracione energije sa izlaznim snagama do 150 mW opisano je u [10]. Takođe, jedno od brojnih rešenja primene RFID tehnike konverzije energije koje daje izlazne snage do 4 mW je prikazano u [11]. Komercijalna rešenja za konverziju RF energije kompanije opisana u [12] mogu prikupljati RF energiju različitih modulacionih formata i konvertovati je sa efikasnošću do 75%. Rade i sa nižim nivoima RF signala i pogodni su i za komunikacije dugog dometa. Mogu biti primenjena za napajanje različitih senzora bez potrebe za dodatnim baterijama, kao i za dopunu super kondenzatora u nekim IoT rešenjima. Pored toga, mogu se koristiti i za napajanje sklopova manje potrošnje.

7. Zaključak

U cilju pronalaženja alternativnih načina napajanja senzora i ostalih sklopova u IoT sistemima, kao i u cilju produženja veka trajanja baterija koje se koriste, velika pažnja se posvećuje istraživanjima vezanim za prikupljanje i konverziju energije koja postoji u okruženju. Neka rešenja su već komercijalno dostupna, a radi se na poboljšanju efikasnosti konverzije, smanjenja dimenzija, kao i skladištenju energije i razvoju novih tehnika upravljanja energijom u cilju smanjenja potrošnje samih IoT uređaja.

Literatura

- [1] A. S. Adila, A. Husam, G. Husi, "Toward the Self-Powered Internet Internet of Things (IoT) by Energy Harvesting: Trend and Technologies for Green IoT", *2018 2nd International Symposium on Small-scale Intelligent Manufacturing Systems (SIMS)*, April 2018, Cavan, Ireland, pp. 1-5.
- [2] L.-G. Tran, H.-K. Cha, W.-T. Park, "RF Power Harvesting: A Review on Designing Methodologies and Applications", *Micro and Nano Systems Letters*, February 2017, pp. 5-14.
- [3] F. Yildiz, "Potential Ambient Energy-Harvesting Sources and Techniques", *The Journal of Technology Studies*, vol. 35, September 2009.

- [4] T. Le, K. Mazaram, T. Fiey, “Efficient Far-Field Radio Frequency Energy Harvesting for Passively Powered Sensor Networks”, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 43 , no. 5 , May 2008, pp. 1287 – 1302.
- [5] ZigBee/IEEE 802.15.4, Available at:
<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779579626799/Zigbee-sintese.pdf>
- [6] L. Mateu, F. Moll, “Review of Energy Harvesting Techniques and Applications for Microelectronics”, *VLSI Circuits and Systems II*, vol. 5837, 2005.
- [7] B.Varghese, N. Easow John, S. Sreelal, K.Gopal, “Design and Development of an RF Energy Harvesting Wireless Sensor Node (EH-WSN) for Aerospace Applications”, *Procedia Computer Science*, vol. 93, 2016, pp. 230-237.
- [8] “SOLCHIP, Iot Sustainability, Sol Chip Comm, SCC-S433, Wireless Solar Tag”, http://sol-chip.com/images/general/SCCS433_Product_Brief.pdf
- [9] WibiSmart The Power of Light, <http://wibismart.com/>
- [10] ReVibe Energy, <http://revibeenergy.com/productsservices/>
- [11] TEGO, “From RFID to Iot”https://tegoinc.com/rfid_redefines_iot/
- [12] <https://www.powercastco.com/products/powerharvester-receivers/>

Zahvalnica: Istraživanja prikazana u ovom radu podržana su od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja u okviru projekata TR32052.

Abstract: *One of the main challenges in the development of IoT systems is to provide reliable powering of the devices. Standard batteries have a relatively short life span and need to be replaced, therefore special attention is being put to the research related to alternative ways of powering. In this paper, an overview of the main research outcomes and proposed solutions related to the harvesting of the energy available in the environment and its conversion in the electric energy needed for the powering of IoT devices. Special attention is paid to harvesting of the RF energy originating of the communication systems present in the environment.*

Keywords: *Internet of Things, Energy Harvesting, Device Powering*

ENERGY HARVESTING FOR POWERING OF IoT DEVICES

Miloš Radojković, Zlatica Marinković